



AgNW KAPLAMALI TEKSTİLLERİN FARKLI IŞIK KAYNAKLARI ALTINDAKİ FOTOTERMAL PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Hasan SİNAN^{1,*}, Demet YILMAZ²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Tekstil Teknolojisi Programı, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Pasif ısıtma tekstilleri,
Fototermal ısıtma,
Gümüş ısıtma performansı,
Gümüş nanotel (AgNW),
Termal konfor.*

Öz

Günümüzde enerji tüketiminin önemli boyutlara çıkması ve geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerinin toplam enerji maliyeti içerisindeki payının oldukça yüksek olması nedeniyle kişisel termal yönetim sistemleri önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda, son zamanlarda kişisel termal yönetime imkân sağlayan tekstil ürünlerinin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi konusunda çalışmalar artmış durumdadır. Bu çalışmada da kişisel termal yönetim ile ilgili mevcut çalışmalar incelenerek bu tekstillerin önemi, taşınması gereken özellikler, bu özellikleri belirlemeye yönelik test ve analizler ile bu alandaki eksiklikler konusunda bir bilgi altyapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan metal esaslı malzemelerden gümüş nanotel (AgNW) seçilerek, yaygın ve kolay uygulanabilir bir metot olması nedeniyle emdirme-kurutma metodu ile %50/50 pamuk/polyester karışımı dokuma kumaşlara 5 tekrarlı olarak uygulanmıştır. Daha sonra, tekstil yüzeylerinin farklı ışık kaynakları altındaki termal performansı araştırılmıştır. Deneysel testler, 100 Watt ve 300 Watt ultraviyole (UV) ve 250 Watt kızılötesi (IR) lambalar kullanılarak gerçekleştirilmiş; her bir ölçüm, 4 dakikalık ısınma ve 10 dakikalık soğuma periyotlarını içermektedir. Sıcaklık değişimleri, termokupl sensörler aracılığıyla zamanla kaydedilmiş ve kaplamasız kumaş ile AgNW kaplamalı numunelerin ısıtma davranışları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, AgNW kaplamalı numunelerin tüm ışık kaynaklarında daha yüksek yüzey sıcaklıklarına ulaştığını göstermiştir. IR ışık altında elde edilen maksimum sıcaklık farkı 14 °C'ye kadar çıkmış ve bu sonuç fototermal dönüşüm verimliliğine işaret etmiştir. Dolayısıyla bu yapılar, enerji verimli pasif ısıtma sistemleri, akıllı giyilebilir tekstiller ve sürdürülebilir termal konfor uygulamaları için güçlü bir potansiyel taşımaktadır.

EVALUATION OF PHOTOTHERMAL PERFORMANCE OF AgNW COATED TEXTILES UNDER DIFFERENT LIGHT SOURCES

Keywords

*Passive heating textiles,
Photothermal heating,
Silver Thermal performance,
Silver nanowires (AgNW),
Thermal comfort.*

Abstract

The growing global demand for energy and the significant share of traditional heating and cooling systems in overall energy consumption have increased the importance of personal thermal management technologies. In this context, research on textile-based materials that enable efficient personal thermal regulation has expanded considerably in recent years. This study aims to provide a comprehensive overview of existing work on personal thermal management textiles, emphasizing their significance, required functional properties, relevant testing and characterization methods, and current gaps in the field. Silver nanowires (AgNWs), one of the most widely used metal-based materials in the literature, were selected. AgNWs suspension was deposited in five coating cycles onto 50/50% cotton/polyester woven fabrics by padding-drying method due to their ease of application. The thermal performance of the coated textile surfaces was then investigated under different irradiation sources. Experimental tests were conducted using 100 Watt and 300 Watt ultraviolet (UV) lamps and a 250 Watt infrared (IR) lamp. Each measurement consisted of 4 minutes of heating followed by 10 minutes of cooling. Temperature variations were recorded over time using thermocouple sensors, and the thermal responses of uncoated and AgNW-coated samples were compared. The results demonstrate that AgNW-coated fabrics achieve higher surface temperatures under all irradiation conditions. Under IR exposure, the maximum temperature difference reached up to 14 °C, indicating effective photothermal conversion. These findings show that AgNW-based textile structures hold strong potential for energy-efficient passive heating systems, smart wearable textiles, and sustainable thermal comfort applications.

Alıntı / Cite

Sinan, H., Yılmaz, D., (2026). AgNW Kaplamalı Tekstillerin Farklı Işık Kaynakları Altındaki Fototermal Performansının Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 14(1), 313-327.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Sinan 0000-0003-0353-1301
D. Yılmaz 0000-0003-4450-5935

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	19.11.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	05.12.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	12.12.2025
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2026

* İlgili Yazar / Corresponding author: hasansinan@isparta.edu.tr

EVALUATION OF PHOTOTHERMAL PERFORMANCE OF AGNW COATED TEXTILES UNDER DIFFERENT LIGHT SOURCES

Hasan SİNAN^{1,†}, Demet YILMAZ²

¹Isparta University of Applied Sciences V.S. Of Technical Sciences, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Textile Engineering, 32260, Isparta, Türkiye

Highlights

- Silver nanowire (AgNw) coating was applied to cotton/polyester woven fabrics using a simple and repeatable multi-cycle deposition process.
- Thermal behavior of coated and uncoated fabrics was evaluated under UV (100 Watt- 300 Watt) and IR (250 Watt) irradiation sources.
- AgNW-coated textiles exhibited consistently higher surface temperatures in all irradiation conditions.
- Results demonstrate strong potential for AgNW-based fabrics in passive heating, wearable thermal management, and sustainable comfort applications.

Purpose and Scope

In this study, existing research on personal thermal management (PTM) textiles was examined to establish a knowledge base regarding their importance, required properties, test and analysis methods, and current limitations in the field. Additionally, the study aims to compare the surface temperature variations of silver nanowire (AgNW)-coated fabrics with uncoated fabrics under different irradiation sources (UV-A 100 Watt, UV-A 300 Watt, and IR 250 Watt).

Design/methodology/approach

A suspension consisting of water, surfactant, and AgNWs (deionized water + 20% Permucil + 2 g AgNWs) was prepared and applied to 50/50% cotton/polyester woven fabrics using the padding-dry method. Temperature variations were analyzed using a measurement setup composed of a thermocouple sensor and a fabric specimen placed on a polyurethane foam substrate.

Findings

Measurements conducted under UV-A and infrared (IR) irradiation sources showed that the temperatures of AgNW-coated fabrics increased compared to the raw fabric while the light source was on, resulting in temperature differences ranging from 7 to 14 °C depending on the irradiation type. When the light source was turned off, the AgNW-coated fabric still exhibited higher temperatures compared to the uncoated fabric.

Research limitations/implications

Future studies should analyze different AgNW concentrations, the number of coating cycles, and various fabric types. Additionally, the performance should be evaluated under sunlight and after exposure to washing, abrasion, and similar external factors.

Practical implications

The study demonstrates that AgNW-coated fabrics can effectively increase surface temperature under various irradiation sources, demonstrating their applicability in passive heating, wearable thermal comfort systems, and energy-efficient textiles.

Social Implications

Compared to conventional heating and cooling systems, textile materials that enable personal thermal management can contribute to significant energy savings

Originality

This study provides a comparative evaluation of AgNW-coated and uncoated fabrics under multiple irradiation sources (UV-A 100 Watt, UV-A 300 Watt, and IR 250 Watt) using a uniform experimental setup, offering comprehensive insight into their photothermal response. The work contributes to the PTM textile literature by combining practical coating methodology with controlled thermal measurements, highlighting the potential of AgNWs for sustainable thermal management applications.

[†] Corresponding author: hasansinan@isparta.edu.tr

1. Giriş (Introduction)

İnsan yaşamının sürdürülebilmesi için vücut sıcaklığının dar bir aralıkta tutulması büyük önem taşımaktadır. Ortalama olarak 36,5–37,5 °C aralığında sabit kalan vücut ısısı hem metabolik işlevlerin dengede sürdürülmesi hem de termal konforun sağlanması açısından kritik bir fizyolojik gereksinimdir. Vücudun enerji metabolizması ve çevreye ısı yayılımı bir dengeye ulaştığında, kişi kendini rahat hisseder. Dış ortam sıcaklığındaki değişimlerin, insan vücudunun ısı alışverişi üzerindeki etkisi hem fiziksel hem de psikolojik sağlık üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır (Pennisi, 2020; Peng vd., 2020;). Aşırı soğuk veya sıcak gibi çevre koşullarında, insan vücudunun ürettiği ısı çevre ile dengesiz hale gelirse, kişi kendini rahatsız hissetmekte, bu durum insanların fiziksel ve zihinsel sağlığını etkilemekte ve hatta ciddi kazalara yol açabilmektedir. Soğuk ortamlarda vücut ısının kaybı; damar büzülmesi, kan basıncı artışı, motor fonksiyonların zayıflaması ve ciddi durumlarda hipotermi gibi sağlık problemlerine neden olabilmektedir. Bu nedenle, vücut ısının pasif veya aktif yollarla korunması yalnızca konfor değil, aynı zamanda insan sağlığı açısından da hayati bir gerekliliktir.

Günümüzde bu amaçla kullanılan geleneksel ısıtma ve soğutma sistemleri; merkezi ısıtma, klimalar, fanlar, elektrikli ısıtıcılar ve sobalar büyük miktarda enerji tüketmektedir. Küresel enerjinin %47'si hâlâ yalnızca iç mekan ısıtmasına ve bunun %42'si özel olarak konut binalarının ısıtılmasına harcanmaktadır (Hsu vd., 2015). Öte yandan, bina sektöründe tüketilen toplam enerjinin çok daha büyük bir kısmı (22,5%) alan ısıtmasına ayrılırken, alan soğutmasına ayrılan kısım (14,8%) çok daha düşük düzeydedir (Cai vd., 2017). İnsan vücudunun termal konforunu korumak için tüm binanın geniş boş alanını ısıtma ihtiyacı, önemli ölçüde enerji israfına yol açmakta ve enerji krizi ile küresel ısınmaya önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (Cai vd., 2017). Çalışmalar, ısıtmanın toplam sera gazı emisyonunun %33,5'ine kadar katkıda bulunduğunu göstermiştir, bu da ısıtmanın çevremiz üzerindeki önemli etkisini bir kez daha açıklamaktadır (Hsu vd., 2015). Bu istatistikler, ısıtmanın dünyanın enerji sorunundaki hayati rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

Enerji kullanımının bu muazzam kısmını düşündüğümüzde, ısıtma için kullanılan enerjinin nasıl azaltılacağı küresel enerji krizini çözmede kritik bir öneme sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Yalıtım ve tasarım iyileştirmeleri yanında enerji tasarruflu binalar hızla gelişse de enerjinin büyük bir kısmı hala boş alanları ve insan dışı nesneleri ısıtmak için harcanmaya devam etmektedir (Hsu vd., 2015). Bu da önemli ölçüde enerji israfına, küresel enerji tüketimi ve karbon emisyonlarının artmasına neden olmaktadır (Peng ve Cui, 2020). İklim değişikliği, fosil yakıt bağımlılığı ve artan enerji maliyetleri göz önüne alındığında, enerji tasarrufu sağlayan, çevre dostu ve sürdürülebilir termal yönetim yaklaşımlarına olan gereksinim her geçen gün artmaktadır.

Bu doğrultuda geliştirilen kişisel termal yönetim (Personal Thermal Management, PTM) teknolojileri, insan vücudunun çevresinde mikro iklim oluşturarak doğrudan termal konfor sağlamayı amaçlamaktadır (Wu vd., 2024; Zong vd., 2021). PTM, ciltteki mikro çevre içindeki ısı değişimini düzenleyerek insan vücudu için termal konforu artırmak üzere tasarlanmış yeni bir teknolojidir (Tang vd., 2025). PTM sistemleri, enerji tüketen geleneksel ısıtma yöntemlerine kıyasla, bireyin çevresinde ısı transferini optimize etmekte ve yalnızca kişisel termal konforu hedef almaktadır. Bu sayede bina düzeyindeki ısıtma ihtiyacını azaltarak enerji verimliliğini artırmaktadır. Araştırmalar, ısıtma ve soğutma ayar noktalarının her birinin 4 °C artırılmasının sırasıyla %45 ve %35'e varan büyük enerji tasarruflarına yol açabileceğini göstermektedir (Cai vd., 2017).

Bu bağlamda pasif termal yönetim sistemleri, enerji girişi olmadan vücut ısının korunmasını sağlayan en verimli çözümlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle tekstil tabanlı pasif sistemler, insan vücuduna en yakın katman olarak termal düzenlemede belirleyici rol oynamaktadır (Wu vd., 2024). Giysiler, insan cildi ile dış ortam arasında bir tampon bölge oluşturarak ısı kayıplarını azaltmaktadır. Giysi sistemi, tüm oda alanından ziyade insan vücudunun ve yerel mikro çevresinin sıcaklık değişimlerine odaklanmaktadır. Ancak pamuk, polyester veya yün gibi liflerden üretilen geleneksel tekstillerin yüksek orta kızılötesi (mid-IR) emisiviteleri ($\epsilon \approx 0.8-0.9$) (yayılım), vücut ısının büyük bölümü radyasyon yoluyla ortama yayılmasına, bu da düşük sıcaklıklarda termal verimliliğin azalmasına ve ısı kaybına neden olmaktadır (Luo vd., 2019). Özellikle soğuk ortamlarda, elbisenin içindeki durgun havayı korumak ve ısı taşınımını en aza indirmek için giysi kalınlığı veya katman sayısını artırma yoluna gidilmektedir (Yu vd. 2025). Bu da hoş olmayan bir görünüm, hantal tasarım, sınırlı yalıtım kabiliyetine neden olmakta ve giyim konforunu azaltmaktadır. (Yu vd., 2025; Li vd., 2024). Dolayısıyla, geleneksel giysilerin soğuk ortamlarda sıcaklık sağlama kapasitesi doğası gereği sınırlıdır.

Bu bağlamda, çevre şartlarına bağlı olarak insan ısı konforunu korumak için verimli ve çevre dostu çözümlere halen ihtiyaç bulunmaktadır. Son zamanlarda, araştırmacılar sürdürülebilir enerji tasarrufu gelişimi için kişisel termal yönetim (PTM) için radyaktif ısıtma etkileri konseptini önermişlerdir (Hong vd. 2019; Hsu vd. 2017; Yang vd. 2023; Zhao vd. 2018). İnsan vücudu genellikle termal radyasyon, termal iletim ve hava konveksiyonu yoluyla çevreleyen ortama ısı yaymaktadır. Bu üç ısı transfer mekanizmasının oranı ortam şartlarına bağlı olarak

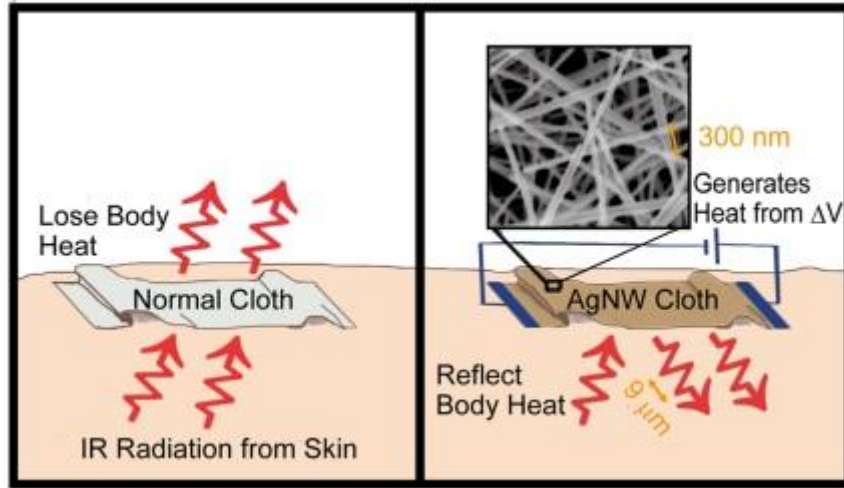
değişmektedir. İç mekan durumlarında, hareketsiz bir vücut tarafından yayılan ısıнын yaklaşık %50-60'si orta kızılötesi (IR) dalga boylarındaki (7 ila 14 μm arasında) termal radyasyon yoluyla gerçekleşmektedir (Li vd., 2022; Peng ve Cui 2020). Dolayısıyla, kızılötesi (IR) radyasyonun yönetimi PTM teknolojilerinin merkezinde yer almaktadır (Tang vd., 2025; Lei vd., 2023).

Radyant veya termal ısı yönetimi, vücut yüzeyinin ısı radyasyonu düzenleyerek pasif ısıtma veya soğutma sağlamaktadır. Pasif ısıtma tekstilleri (Passive Heating Textiles, PHT), soğuk ortamlar için düşük IR emisivitesine sahip, yüksek güneş absorptivitesi gösteren "radyant ısıtma" özelliğine sahip tekstil sistemleridir. Pasif ısıtma tekstilleri (Passive Heating Textiles, PHT), düşük IR emisiviteye sahip malzeme yüzeyleri sayesinde, vücuttan yayılan termal radyasyonu yansıtarak ısı kaybını en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Aynı zamanda, güneş ışığını görünür ve yakın IR bölgelerinde etkin biçimde absorbe ederek fototermal ısı üretmektedir (Li vd., 2022). Bu iki mekanizmanın birleşimiyle, PHT'ler enerji harcamadan vücut sıcaklığını artırabilmektedir. Örneğin, siyah sweatshirtler gibi geleneksel ısıtma tekstilleri, görünür dalga boyu aralığında geniş bantlı emilimleri nedeniyle bölgesel ısıtma sağlamakta; ancak, yüksek yüzey emisiviteyi nedeniyle kaçınılmaz olarak yüksek radyasyon kaybına da neden olmaktadır (Luo vd., 2019). Öte yandan, yaz aylarında geleneksel tekstil ürünleri yüksek kızılötesi absorpsiyon ve düşük kızılötesi emisivite özelliklerine sahiptir. Bu da sıcak yaz aylarında ısı kaybını ciddi şekilde engellemektedir. Bu nedenle, sıcak bir ortamda insan vücudunun konforunu artırmak için bir tür "radyant soğutma" gereklidir (Xie vd., 2021). Bu tür giysilerde, kumaşın termal radyasyon geçirgenliği veya güneş yansıtma oranı iyileştirilerek ısı kaybı artmakta ve konfor sağlanabilmektedir.

Orta kızılötesi (Far-IR, 4–14 μm) bölgede radyasyon kontrolü sağlayan tekstiller yalnızca enerji verimliliği açısından değil, fizyolojik faydalar bakımından da dikkat çekmektedir. Termal radyasyonu, cilt yüzeyinde mikro sirkülasyonu artırarak doku oksijenlenmesini geliştirmekte ve termofizyolojik konforu desteklemektedir (Militký vd., 2021). Bu nedenle kızılötesi (IR) radyasyonu yansıtan veya yayan tekstiller hem termal yalıtım hem de sağlık odaklı akıllı giyilebilir sistemler için potansiyel taşımaktadır.

Soğutmaya kıyasla, pasif ısıtma tekstilleri geliştirerek çok daha fazla enerji tasarrufunun sağlanması mümkündür. Pasif ısıtma tekstillerinde temel prensip, spektral seçicilik ilkesine dayanmaktadır. Tekstilin güneş spektrumunun (250–2500 nm) görünür bölgesinde yüksek emiciliğe, insan termal radyasyon aralığında (7–14 μm) ise düşük emisiviteye sahip olması gerekmektedir (Cai vd., 2017). Düşük IR emisiviteye sahip malzeme yüzeyleri, vücuttan yayılan termal radyasyonu vücuda yansıtarak ısı kaybını en aza indirmektedir. Aynı zamanda, güneş ışığını görünür ve yakın IR bölgelerinde etkin biçimde absorbe ederek fototermal ısı üretmektedir (Li vd., 2022). Bu iki mekanizmanın birleşimiyle, PHT'ler enerji harcamadan vücut sıcaklığını artırabilmektedir. Ancak bu dengenin sağlanması oldukça zordur; çünkü yüksek emicilik genellikle düşük yansıtıcılıkla ters orantılı olmaktadır (Militký vd., 2021).

Öte yandan, insan vücudu tarafından üretilen ısıнын çevreye yayılmasını önlemek için, bilinen ısı yalıtım giysileri bazen bir alüminyum folyo tabakası ile donatılmaktadır. Ancak, bu giysilerin önemli bir dezavantajı, su buharının taşınmasına izin vermemeleridir. Bu da kullanıcıya rahatsızlık hissi vermekte ve düşük ortam sıcaklıklarında giyside nem birikmesi sonucu hipotermiye neden olabilmektedir. Nefes alabilirliği geliştirmek için delikli forma sahip alüminyum folyo tabakasına sahip bir giysi tasarımı her ne kadar geçirgen bir yapı sunsa da insan vücudunun ürettiği ısıнын korunmasında yetersiz kalmaktadır (Militký vd., 2021). Dolayısıyla, pasif ısıtma tekstillerinin geliştirilmesi konusunda pek çok çalışma yapılsa da hem optimum ısıtma kapasitesine hem de iyi giyilebilirlik özelliklerine sahip pasif ısıtma tekstil örnekleri henüz yaygın durumda değildir. Mevcut çok az sayıdaki ticari pasif tekstil ürününün hepsinde ciddi eksiklikler bulunmaktadır. Örneğin, yoğun metalik yansıtıcı filmle kaplanmış katı plastik tabakadan (genellikle polietilen tereftalat (PET) film) oluşan Mylar battaniye, vücut ısıısının %90'ından fazlasını yansıtabilmektedir. Ancak, nefes alabilirlikten yoksundur ve bu durum Mylar battaniyenin günlük kullanımını rahatsız hale getirmektedir (Tavakkol vd., 2023; Cai vd., 2017). İnsan vücudunun ısını yansıtmak için giysilerin iç kısmına seyrek metalik noktalar basan Columbia'nın Omni-Heat teknolojisi, iyi bir giyilebilirliğe sahip olsa da düşük yansıtma özelliği (%31,9) ve zayıf radyasyonla ısıtma performansı sorunları yaşamaktadır (Tavakkol vd., 2023; Cai vd., 2017). Son zamanlarda geliştirilen Ag nanotel (AgNW) kaplamalı tekstil yapısı (yaklaşık %40) düşük bir IR yansıtma özelliğine sahiptir ve insan vücudunu normal tekstillerden sadece 0,9 °C daha fazla ısıtmaktadır (Cai vd., 2017). Ayrıca, Larciprete ve arkadaşları, iyi termal yansıtma özelliğine sahip paslanmaz çelik liflerden yapılmış dokunmuş tekstil ürünleri bildirmişlerdir, ancak bu tür tekstil ürünleri kırılğan, ağır ve rahatsız olabilir (Tavakkol vd., 2023). Bu eksiklikler temel olarak iki faktöre bağlanabilir. İlk olarak, mevcut tüm pasif ısıtma tekstilleri, ısı kaybını azaltmak için insan vücudunun IR radyasyonunu geri yansıtma konseptine dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşım insan vücudunun ısıtması için en etkili IR radyasyon kontrol yaklaşımı değildir. İkincisi, optimum ısıtma performansı ile iyi giyilebilirlik (geçirgen, mukavim ve esnek yapı vb.) arasında her zaman bir ikilem vardır. Bu ikilem, gelişmiş bir fotonik yapı tasarımına ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Son zamanlarda, bu sorunu çözmek için çok çaba sarf edilmektedir (Tavakkol vd., 2023; Cai vd., 2017).



Şekil 1. Termal radyasyon yalıtımı ve aktif ısıtma özelliğine sahip nanotel kumaşın işleyiş mekanizması (The operating mechanism of nanowire fabric with thermal radiation insulation and active heating properties) (Hsu vd., 2015)

Bununla birlikte, mevcut pasif yalıtım sistemleri çoğunlukla statik niteliktedir; yani değişen çevresel koşullara karşı adaptif bir tepki verememektedir. Güneşli ancak soğuk günlerde aşırı ısınma, bulutlu havalarda ise yetersiz ısıtma gibi durumlar, kullanıcı konforunu olumsuz etkileyebilmektedir (Tang vd., 2025). Bu nedenle, son dönem araştırmalar “akıllı, ayarlanabilir pasif yalıtım tekstilleri” kavramına odaklanmış durumdadır.

Metaller (alüminyum, gümüş, bakır ve çelik), metal olmayanlar (TiO_2 ve SiO_2) ve yarı iletkenler (indiyum kalay oksit (ITO) ve Al katkılı çinko oksit (AZO)) gibi yüksek IR yansımali (veya düşük emisiviteli) malzemeler, ısıyı emebilen termal yalıtım malzemeleri veya faz değiştiren malzemeler termal yönetim sistemlerin eldesinde kullanılmaktadır (Peng vd., 2019). Metaller, yüksek IR yansıtıcı malzemelerdir. Metallerdeki serbest elektronlar, gelen kızılötesi fotonları yansıtarak metal yüzeylerde yüksek bir IR ışığı yansımaya neden olabilmektedir. Son zamanlarda, metal nanopartiküller, termal engelleme amacıyla sentetik veya doğal liflerden üretilen kumaşlarına kaplama, elektroliz kaplama veya vakum biriktirme gibi yöntemlerle kaplanmaktadır (Gu vd., 2022). Çeşitli metalik nanoyapı türleri arasında, yüksek IR yansıma verimliliği, yüksek elektriksel iletkenlik, güçlü antibakteriyel özellikler ve mükemmel UV engelleme yeteneği nedeniyle gümüş nanopartiküllerin ve gümüş nanotellerin (AgNW'ler) kullanımı araştırılmaktadır (Gorji vd., 2022).

Bu çalışma, pasif ısıtma tekstillerinde termal performansın geliştirilmesine yönelik deneysel bir yaklaşım sunmaktadır. Giriş bölümünde pasif termal yönetim kavramı, enerji verimliliği ve kullanıcı konforu açısından önemi tartışılmıştır. Materyal ve Metot bölümünde, deneylerde kullanılan tekstil yüzeyleri, kaplama yöntemleri ve ölçüm düzenekleri ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Bulgular bölümünde, farklı ışık kaynakları (UV-A 100 W, UV-A 300 W ve IR-250 W) altında elde edilen sıcaklık-zaman verileri grafiksel olarak değerlendirilmiş, AgNW kaplamalı kumaş ile ham kumaşın ısı davranışları karşılaştırılmıştır. Sonuç ve Tartışma kısmında, elde edilen bulgular pasif ısıtma prensipleri çerçevesinde analiz edilerek, AgNW kaplamanın yüzey sıcaklığına ve ısı tutma performansına etkisi detaylı biçimde tartışılmıştır. Son olarak, Sonuç bölümünde genel değerlendirmeler sunulmuş, enerji verimli tekstil uygulamaları için gelecekteki araştırma yönelimlerine ilişkin öneriler geliştirilmiştir.

2. Literatür Taraması (Literature Survey)

Konu ile ilgili literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir.

Tang vd. (2025) çalışmalarında, radyatif ve elektrikli ısıtmayı birleştiren, orta derecede fototermal özelliğe sahip ayarlanabilir bir PTM tekstili geliştirmek için iki adımlı bir proses kullanmışlardır. NaOH ile ön muamele edilmiş pamuklu kumaşa (CF) önce in-situ polimerizasyonu yöntemi ile PANI (CF@PANI), daha sonra serigrafi baskı yöntemi ile gümüş pasta (AgPA) aplike etmişlerdir. 30 dakika 90 °C'lık bir vakumlu fırında kürlleme işlemi yapılmıştır. Elde edilen pamuklu numune kumaş AgCFP kompozit kumaş olarak adlandırılmıştır. Hazırlanan PTM tekstilinin her iki tarafındaki güneş spektrumu (300–2500 nm) emiciliği sırasıyla %97,3 (PANI tarafı) ve %63,5 (AgPA tarafı) olarak belirlenmiştir. Farklı ışık yoğunluklarında ölçüm yapılmış (500, 1000, 1500 ve 2000 W m⁻²) ve AgCFP'nin fototermal sıcaklığının saf pamuk kumaşa kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Fototermal döngü kararlılığını belirlemek için simüle edici ışık kaynağı 10 kez açılıp kapatılmış ve AgPA ve PANI tarafının ilk ve son döngüdeki sıcaklıklarının aynı olduğu gözlenmiştir. Saf pamuğun ve AgCFP'nin her iki yüzünün güneş ısı dağılımını değerlendirmek için bir IR kamera kullanılmış ve numunelerin her iki yüzünün 60 saniye güneş ışığı

altında saf pamuk kumaşa kıyasla uniform sıcaklık dağılımı gösterdiği, PANI ve AgPA tarafının yüzey sıcaklıklarının sırasıyla 72,2 °C ve 49,7 °C'ye ulaştığı belirlenmiştir. AgCFP'nin her iki yüzünün gerçek fototermal kabiliyetleri sırasıyla güneşli ve bulutlu bir günde sabah 9:00'dan 17:00'ye kadar dış mekan koşullarında özel bir test düzeneği ile test edilmiştir. Sıcaklık-süre eğrileri ve maksimum sıcaklık değerleri saf pamuk ve ticari olarak satın alınan siyah bir deri ile karşılaştırılmış ve sonuçta AgCFP'nin her iki yüzünün daha yüksek sıcaklık değerleri sağladığı belirlenmiştir. Öte yandan, PTM tekstili olarak önerilen AgCFP'nin AgPA tarafı ayrıca düşük orta kızılötesi (mid-IR) emisivite (%44,1) ve yüksek iletkenliğe ($1,7 \times 10^4$ S/m) sahip olduğu ve dolayısıyla geliştirilen kumaşın radyatif ve elektrikli ısıtma performansı sergilediği belirtilmiştir. Numunelerin radyatif ısıtma sıcaklığını değerlendirmek için basit bir cihaz tasarlanmış ve çıplak ve farklı numunelerle kaplanmış simüle edilmiş derinin zaman-sıcaklık eğrileri incelenmiştir. AgCFP ile kaplanmış simüle edilmiş derinin sıcaklığı (38,6 °C) saf pamuk, siyah ticari deri ve çıplak derinin (35,7 °C) sıcaklığına kıyasla sırasıyla 2,0 °C, 0,9 °C ve 2,9 °C daha yüksek olduğu belirlenmiştir. AgCFP'nin gerçek radyatif ısıtma performansını daha fazla araştırmak için, numuneler insan kolunun üzerine kaplanmış ve çıplak insan kolundan ve saf pamukla ve deriyle kaplanmış insan kolundan sırasıyla 2,1, 1,0 ve 0,6 °C daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, PTM tekstili, mekanik özellikler, hava geçirgenliği, esneklik ve antibakteriyel aktivite açısından da yeterli özellikler sağladığı belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda elde edilen PTM tekstilinin çok senaryolu termal yönetim için güçlü bir aday olabileceği belirtilmiştir.

Li vd. (2024) çalışmalarında gümüş (Ag) nanopartikülleri pamuklu kumaşa applike etmişler ve tasarlanan pasif ısıtmalı kumaşın yüksek güneş ışığı emilimi ($\sim 80\%$) ve orta kızılötesi yansıtma ($\sim 40\%$) özelliği sergilediği, insan vücudundan yayılan radyan ısıyı azalttığı belirlenmiştir. Ag ile kaplanmış kumaşa, iç mekan ortamında pamuklu kumaştan neredeyse 2 °C daha yüksek bir sıcaklığa ulaşıldığı, Ag içeren kumaşla kaplanmış suni deride ortalama 8 °C'lik bir sıcaklık artışı sağlanabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, Ag nano kaplamanın iletken yapısı sayesinde 1 V'da 40,7 °C yüzey sıcaklığına ulaşıldığı, Ag içerikli-kumaşın üstün Joule ısıtma özellikleri sergilediği belirlenmiştir.

Tang vd. (2024) bir diğer çalışmalarında sürekli değişen kış ikliminde hassas kişisel termal yönetimi (PTM) sağlamak için Janus tekstili olarak adlandırılan asimetrik optik özelliklere sahip yenilikçi ısıtma tekstil yapısının geliştirilmesi odaklanılmışlardır. Pamuklu bir kumaşın bir yüzü gümüş nanotellerle (AgNW) kaplanırken, diğer yüzüne metal karbürleri/nitrürleri (MXene) uygulanmıştır. MXene tarafının yüksek güneş soğuruculuğu ve düşük orta kızılötesi emisivite, AgNW tarafının orta düzeyde güneş soğuruculuğu ve orta kızılötesi emisivite özelliği göstermesi hedeflenmiştir. MXene ve AgNW tarafının 7-17 μm 'deki ortalama orta kızılötesi spektral emisivitesi sırasıyla (düşük orta-IR) %18,9 ve %47,3, görünür ışık dalga boyu aralığında (400-780 nm) ortalama emiciliği (güneş emiciliği) yaklaşık olarak sırasıyla %87,6 ve %59,8 ölçülmüş olup, bu değerlerin saf pamuğunkinden (%92,9 ve %10,8) önemli ölçüde daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca göre, Janus tekstilin her iki tarafının da olağanüstü termal radyasyon yakalama kabiliyetine sahip olduğu sonucu çıkartılmıştır. Isıtıcıdan oluşan özel tasarlanmış bir ölçüm kutusunda 1 saat süresince yapılan ölçümler sonunda simüle edilmiş deri, deri ve pamukla kumaşa karşılaştırılması yapılmış ve MXene tarafının 2,5-5,1 °C, AgNW tarafının 0,8-3,4 °C daha yüksek yüzey sıcaklığına sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmada MXene tarafı ile sağlanan maksimum sıcaklığın 8 kat, AgNW tarafı ile sağlanan maksimum sıcaklığın 5 kat pamuklu kumaşın katlanması ile elde edildiği tespit edilmiştir. Numuneler insan vücudunda yüz, kol ve sırt tarafına yerleştirilmiş ve pamuklu kumaş ve deriye kıyasla MXene tarafının 1,8-1,2 °C, AgNW tarafının 1,0-0,4 °C daha yüksek sıcaklık sağladığı belirlenmiştir. Termal kamera ile yapılan ölçümlerde MXene tarafının AgNW tarafına kıyasla daha fazla vücut ısısındaki yayılımı veya radyasyonu engelleme kabiliyetinden dolayı daha düşük sıcaklığa sahip olduğu, yaklaşık 1,7°C kadar ısı yalıtım sağladığı gözlenmiştir. Güneş ısıtma etkinliği değerlendirmek için 500-2000 W m^{-2} ışık yoğunluğuna sahip bir Xenon lamba 3 dakika açık, 2 dakika kapalı tutulmuş ve her iki tarafın ısınma hızı ve sabit durum sıcaklığının artan ışık yoğunluğuyla neredeyse sabit bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Janus kumaşın ısıtma kararlılığını belirlemek için 100 W m^{-2} ışık yoğunluğuna sahip bir Xenon lamba 3 dakika açık, 3 dakika kapalı tutulmuş ve 10 defa yapılan ısıtma-bekleme döngüsünden sonra Janus kumaşın hala kararlı bir davranış sergilediği tespit edilmiştir. Karmaşık ve değişken hava koşullarında fototermal performansını göstermek için sabah, öğle ve akşam olmak üzere 8.30-17.30 saatleri arasında ölçüm yapılmış (ortalama ortam sıcaklığı 14,0 °C ve güneş ışığı ve 445,5 W m^{-2}) ve sonuçlar pamuk, siyah pamuk, PVDF-HFP membran (poliviniliden florürko-hekzafloropropilen) ile karşılaştırılmıştır. Janus kumaşın her iki tarafının daha yüksek sıcaklık değerleri sağladığı belirlenmiştir. Örneğin, kalın giysiler giyilmediğinde insanların üşümesine neden olabilecek sabah saatleri için MXene tarafının siyah kumaşa kıyasla 2,7 °C daha yüksek sıcaklık değeri sağladığı tespit edilmiştir. Eğme-bükme gibi mekanik deformasyonlarda elektrik ısıtma performansının sağlandığı belirlenmiştir. Çalışmada, geliştirilen kumaşın termal kamuflaj performansı da değerlendirilmiş ve insan eli Janus ve pamuklu kumaşla kaplanmıştır. 15 dakika sonunda pamuğun termal görüntüsünün rengi insan elinin rengiyle aynı iken Janus kumaşın görüntüsü ortama benzer mavi bir renk gösterdiği, dolayısıyla geliştirilen kumaşın insan vücudu için gece kamuflajı olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Gu vd. (2022) çalışmalarında, elektroliz kaplama yöntemi ile gümüş kaplamalı kumaş bileşeni ve faz değişim malzemesi (PCM) kaplamadan oluşan ısı emici bileşen içeren çift işlevli bir IR kamuflaj kumaşı tasarlamayı

amaçlamışlardır. Çalışmada, iyi bir IR kamufajı elde etmek için PCM ile sıcaklık kontrolü, gümüş ile de düşük emisyon özelliğinin kumaşa kazandırılması planlanmıştır. NaOH ile ön muamele edilen polyester kumaşa PANİ ve daha sonra AgNO₃ muamele edilmiştir. PCM ve suda çözünür poliüretandan oluşan çözelti indirgeme işleminden geçmiş, elektrolizsiz gümüş kaplanmış polyester kumaşa kaplanmıştır. IR emisivite ölçüm cihazı ile yapılan ölçümler sonucunda IR kamufaj kumaşının metalize yüzeyi sayesinde 0,692 (1–22 µm), 0,687 (8–14 µm) ve 0,655 (3–5 µm) gibi düşük IR emisivite değerleri verdiği belirlenmiştir. Kaplamayı içeren kumaş 65 °C'lik bir sıcak plaka üzerine yerleştirildiğinde, işlenmemiş kumaşla maksimum 21,6 °C'lik bir gerçek sıcaklık farkı olduğu ve yüzeyin gerçek sıcaklığının 300 saniyeye kadar 38 °C'de tutulabildiği tespit edilmiştir. Sıcak plakanın sıcaklığı yükseltildiğinde, maksimum gerçek sıcaklık farkının arttığı, sıcak plakanın sıcaklığı düşürüldüğünde, gerçek sıcaklık kontrolü için gerekli sürenin uzadığı gözlemlenmiştir. İşlenmemiş kumaş ve IR gizleme kumaşı sırasıyla 45 °C ve 80 °C sıcaklıktaki sıcak plakada ısıtıldıktan sonra, IR kamera ile gözlemlenmiş ve IR kamufaj kumaşının IR sinyallerini engelleme ve bozma konusunda etkili olduğu belirlenmiştir. Geliştirilen kumaşın yıkama, eğme-bükme gibi etkiler sonrasında emissivite değerlerinde az değişim olsa da kamufaj özelliğini koruduğu tespit edilmiştir.

Li vd. (2022) çalışmalarında, önceki malzeme tasarım yönteminden farklı olarak, kumaşın kızılötesi emisivitesini azaltmak için nanolif çapının azaltılmasını araştırmıştır. PAN polimeri içerisine belirli oranda boyarmadde eklenmiş ve elektrostatik lif çekim yöntemi ile boyalı nanolifler elde edilmiştir. Ag tabakası, magnetron püskürtme işlemiyle nanolifli kumaşın üzerine uygulanmıştır. Çalışmada, dış mekân (14 °C ve güneş ışığı altında) ve iç mekan (24 °C ve güneş ışığı olmadan) senaryolarını simüle etmek için numune bir ısı yalıtım odasına yerleştirilmiş ve simüle edilen cilt sıcaklığı $31 \pm 0,5$ °C olarak ayarlanmıştır. $\approx 300 \text{ W m}^{-2}$ 'lik bir tepe güneş yoğunluğu (kışın güneş ışığı) ve 14 °C'lik bir sıcaklık altında, renkli NanoPAN/Ag esaslı numunelerin klasik tekstil kumaşlarına (32,3–32,9 °C) kıyasla daha yüksek yüzey sıcaklığı (34,6 °C) sağladığı belirlenmiştir. Stefan-Boltzmann Yasası kullanılarak kumaşların ısı depolama gücü hesaplanmış ve dış ortamda geleneksel kumaşlara kıyasla ($\approx 10 \text{ W m}^{-2}$) renkli NanoPAN/Ag kumaşların daha (22,1 W m^{-2}) yüksek değerler sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuç, kızılötesi radyasyonun düşük olduğunu ve kumaş ile cilt arasında bir ısıtma etkisi yarattığını göstermiştir. Ayrıca, renkli nanolifli kumaşların nefes alabilirlik, su buharı geçirgenliği ve mekanik stabilite açısından yeterli değerler sağladığı tespit edilmiştir.

Xie vd. (2022) iç ve dış mekanlarda termal yönetim için kolay yöntemlerle giyilebilir tekstil ürünlerinin üretilmesi hala zor olduğu için çalışmalarında, Nylon 66 elyaf demetini kimyasal kaplama yöntemi ile gümüş (Ag) ile kaplamışlardır. Elyaf demetinin IR yansıtma özelliğini belirlemek için beyaz bir karton üzerine sarılan iplik ısı kaynağının (70 °C) 2 cm üzerine yerleştirilmiş ve yatay olarak yerleştirilen termal kamera ile yüzey sıcaklığı ölçülmüştür. IR radyasyonunun belirlenmesi için elyaf demeti PE substrat üzerinde tek ve üç katman halinde sıkıca sarılmış ve benzer bir yöntemle dik şekilde yerleştirilen termal kamera ile ölçüm yapılmıştır. Kızılötesi emisyonunun belirlenmesi için beyaz karton, ısı kaynağına tutturulmuş ve 5 dakika sonra sıcaklık sabit tutulmuştur. Termal kamera ile görüntü alınmıştır. Çalışmada yapılan ölçümler ve simülasyon çalışmaları sonunda gümüş kaplanmış Nylon 66 elyaf demetinin, kaplanmamış Nylon 66'a göre daha yüksek kızılötesi yansıtma ve daha düşük kızılötesi emilim oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Ag@PA elyaf demetinden üretilen örme kumaşın yüzeyindeki gümüş kaplamanın çoklu yansıma özelliği sayesinde IR geçirgenliği, %150 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Geleneksel PA tekstillerle karşılaştırıldığında, cilt sıcaklığı iç mekanlarda 1,1 °C ve dış mekanlarda 0,9 °C'ye kadar düşürülebildiği belirlenmiş, böylece insan vücudu için "pasif soğutma" sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Xie vd. (2021) bir diğer çalışmalarında, bir kartona sardıkları PA iplikleri kimyasalız kaplama (electroless plating) yöntemi ile gümüş nanotellerle (AgNw) kaplamışlardır. Çalışmada, Ag@PA lif demeti ve PA lif demetinin emisivitesi (ϵ) 0,69 ve 0,87 olarak hesaplanmıştır. Ag@PA kumaşının kızılötesi geçirgenlik radyansı, PA kumaşınıninkinden %20-50 daha fazla olarak belirlenmiştir.

Zong vd. (2021) çalışmalarında, giyilebilirlikten ödün vermeden optimum EMI koruması ve pasif radyasyon ısıtma performansını aynı anda gerçekleştirmek için kaplama yöntemi ile gümüş nanoteller (AgNw) pamuklu kumaşa 1 ile 9 arasında değişen sayılarda aplike edilmiştir. Daha sonra Fe₃O₄ sprey yöntemi ile uygulanmıştır. 9 defa AgNw kaplanan kumaşta güneş enerjisi emilimi %62,1'e kadar, orta-IR emisivitesi (ϵ) ise 0,16 olarak belirlenmiş ve daldırma-kaplama döngüsü daha da artırıldığında kumaşın optik özelliklerinin belirgin bir şekilde değişmediği gözlenmiştir. Nisan ayında saat 12.00-14.00 ile 20.00-20.30 olmak üzere gündüz ve gece saatleri arasında yapılan ölçümlerde benzer kalınlığa sahip geleneksel pamuklu kumaşa kıyasla 9 defa AgNW ile kaplanmış kumaşta simüle edilmiş derinin ortalama sıcaklığı, 49,5 °C'den 62,0 °C'ye 12,5 °C artarak dış mekan pasif radyasyon ısıtma performansında önemli bir iyileşme gösterdiği belirlenmiştir. Termal görüntülerde, bu kumaşların daha düşük sıcaklığa sahip olduğu ve bu nedenle vücudun ısı radyasyon kaybını etkili bir şekilde azaltarak daha sıcak tutabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Lian vd. (2020) çalışmalarında farklı konsantrasyonlarda hazırlanan gümüş nanotelleri (AgNW) pamuklu kumaşlara bekletme-kurutma tekniği ile uygulamışlardır. FTIR (2–16 μm) ve termal kamera ile IR yansımaları yapılan ölçümler sonunda normal pamuklu kumaşla (%10,84) karşılaştırıldığında, AgNW kaplamalı kumaşların önemli ölçüde yüksek IR yansımaları sergilediği, kaplama döngüsü 1'den 10'a arttıkça IR yansımalarının %22,30'dan %51,60'a yükseldiği belirlenmiştir. AgNW kaplamalı kumaşların geleneksel pamuklu tekstillere kıyasla ortam sıcaklığının ayar noktasında 5 °C'lık bir düşüş sağladığı tespit edilmiştir. Her katman, insan vücudu tarafından yayılan kızılötesi radyasyonu (IR) yansıtılabildiği ve ısı yalıtım özelliğini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

Cai vd., (2017) çalışmalarında nanogözenekli metalize polietilen (PE) kullanarak pasif kişisel ısıtma için özel kızılötesi (IR) özelliğine sahip nanofotonik yapı bir tekstil yapısını geliştirmişlerdir. Nano gözenekli metalik (Ag) film, nano PE üzerine elektroliz kaplama ile kaplanmış ve daha sonra metalize nanoPE pamuk kumaşa lamine edilmiştir. FTIR ile yapılan ölçümler sonucunda geliştirilen nano gözenekli Ag filmin %98,5'lik yüksek bir IR yansıtma oranına sahip olduğu, bu değer pamuk gibi normal tekstil ürünlerinin (%8,4), Omni-Heat'in metalik noktalarının (%31,9) ve Mylar battaniyenin yoğun metal filminin (%91,2) yansıtma oranlarından çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonucun, nano-Ag/PE'nin tekstil dış yüzeyinde %10,1 gibi düşük bir IR emisiviteye sebep olarak ısı kaybını azaltabileceği ve bu değer Mylar battaniye (%60,6), Omni-Heat (85,4%) ve pamuk (89,5%) ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Termal kamera ile yapılan ölçümler sonucunda normal tekstil ürünlerine kıyasla ısı kaybında 7,1 °C'lık bir azalma sağlayarak, diğer radyasyonlu ısıtma tekstillerinden 3 °C'den fazla daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonucun, bina ısıtma enerjisinde %35'inden fazla tasarruf sağlanabileceği ve nihayetinde küresel enerji ve iklim sorunlarının hafifletilmesine katkıda bulunabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Giyilebilirlik özelliğini değerlendirmek için yapılan testler sonucunda geliştirilen yapının normal tekstiller gibi hafif, nefes alabilir, dayanıklı, yıkanabilir ve boyanabilir olduğunu göstermiştir.

Hsu vd. (2015) çalışmalarında binalarda ısıtma ve soğutma için enerji tasarrufu sağlamak için gümüş nanotelleri (AgNW) ve karbon nanotüpü (CNT) kumaşa emdirme yöntemi ile applike etmişlerdir. FTIR ile yapılan ölçümlerde AgNW kumaş ve normal kumaşın yansımaları spektrumu 2 ile 15 μm arasında ölçülmüştür. Termal kamera ile yapılan ölçümlerde insan vücudunda ölçülen sıcaklık 33-34 °C iken AgNW kumaşta 30-31 °C ölçülmüştür. Normal kumaş 4,3°C'lık bir sıcaklık düşüşüne sahipken, AgNW kumaş 5,2°C'lık bir sıcaklık düşüşü sağladığı, bu nedenle radyasyon kaybının azaltılmasından dolayı AgNW kaplamanın %21 daha fazla ısı yalıtımı sağladığı belirlenmiştir. Giyilebilirlik özelliğini değerlendirmek için kumaşların ilgili özellikleri incelenmiş ve su buharı geçirgenlik değerinde %2 gibi bir kayıp olduğu, 3 yıkama sonrasında bile kumaşların özelliklerini koruduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, aktif ve pasif termal yönetim sistemleri, enerji verimliliği yüksek, çevre dostu ve insan merkezli termal yönetim stratejileri olarak öne çıkmaktadır. Ancak, günümüzde kullanılan kişisel termal yönetim (PTM) tekstillerinin termal ayarlama kabiliyetleri statik ve ayarlanamaz niteliktedir. Özellikle gündüz sıcaklıklarında önemli değişimlerin yaşandığı iklimlere, karmaşık hava koşulları ve dalgalanmalarına uyum sağlama konusunda halen eksikleri bulunmaktadır (Tang vd., 2025; 2024). Dinamik hava koşullarına uyum sağlamaya çalışırken hem ısıtma hem de soğutma yeteneklerine sahip çift modlu akıllı kumaşların geliştirilmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Öte yandan, PTM tekstillerinin geliştirilmesi için karmaşık yöntemlerin kullanılması nedeniyle radyant tekstilleri hayata geçirmek büyük bir zorluk olmaya devam etmektedir (Xie vd., 2022). Öte yandan, mekanik özellikler yanında giyilebilirliği temsil eden yıkanabilirlik, esneklik, nefes alabilirlik gibi özelliklerin geliştirilmesi gerekmektedir (Tavakkol vd., 2023). Dolayısıyla, bu alanda söz konusu eksikleri gidermeye yönelik yeni yöntem ve malzemelerin geliştirilmesi konusunda çalışmaların yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu çalışmada, PTM tekstilleri ile ilgili mevcut çalışmalar incelenerek bu tekstillerin önemi, taşınması gereken özellikler, bu özellikleri belirlemeye yönelik test ve analizler ile bu alandaki eksiklikler konusunda bir bilgi altyapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan metal esaslı malzemelerden gümüş nanotel (AgNw) seçilmiştir. Gümüş nanotelleri (AgNw) ile su bazlı süspansiyonlar hazırlanmıştır. AgNw süspansiyonları, %50/50 pamuk/polyester dokuma kumaşlara kolay uygulanabilir ve yaygın bir metot olması nedeniyle emdirme metodu ile applike edilmiştir. Aplikasyon sonrasında kumaşların termal performansını belirlemek için literatürdeki çalışmalardan yola çıkarak bir test düzeneği hazırlanmıştır.

3. Materyal ve Metot (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada, tekstil yüzeylerinde pasif yalıtım özelliği kazandırmaya yönelik olarak gümüş nanotel (AgNw) kullanılmıştır. Gümüş nanoteller, Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir ve 45–75 nm çap aralığına sahiptir. Gümüş nanotel içeren süspansiyonların hazırlanması aşamasında çözelti homojenliğini ve stabilitesini

sağlamak amacıyla yüzey aktif madde (Permusal) kullanılmıştır. Çözücü olarak çevresel etkileri azaltmak ve pratik uygulama kolaylığı sağlamak amacıyla saf su tercih edilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda kumaş olarak, ön terbiye işlemlerinden geçirilmiş, 10×10 cm boyutlarına sahip %50/50 pamuk/polyester dokuma kumaş kullanılmıştır. Kumaş gramajı 260 g/m², çözgü sıklığı 34 tel/cm, atkı sıklığı 30 tel/cm'dir.

3.2. Metot (Method)

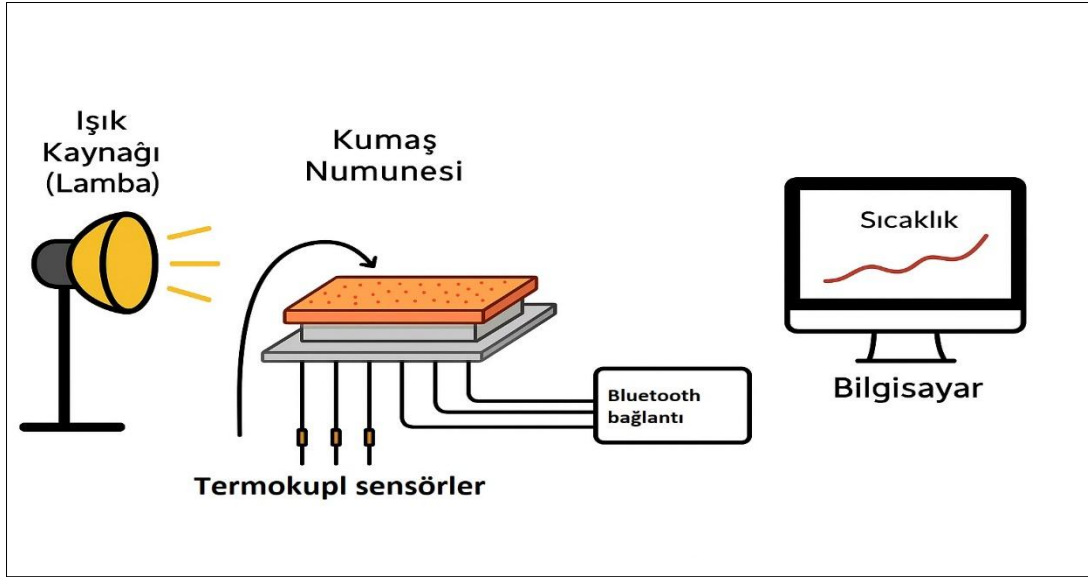
Gümüş nanotelin (AgNw) uygulanması için su, yüzey aktif madde ve AgNw'dan oluşan bir süspansiyon (saf su + %20 Permusal + 2 g AgNw) hazırlanmıştır (2g AgNw /20mL saf su + toplam hacmin %20'si Permusal). Süspansiyonda 4 mL Permusal kullanılmıştır. Çalışmada, noniyonik yapıda yüzey aktif maddeler olan Triton X100 ve Triton 80 ile de süspansiyonlar (80 mg AgNw /20mL saf su +toplam hacmin %10'u Triton X100-Triton 80) hazırlanmış, ancak anyonik yapıdaki Permusal ile süspansiyon kararlılığının daha iyi olduğu, çökme durumunun daha uzun sürede gerçekleştiği gözlenmiştir. Süspansiyon hot plate üzerinde mıknaatıslı karıştırıcı ile 30 dakika karıştırılarak uniform bir süspansiyon elde edilmiştir. Daha sonra 10 cm x 10 cm boyutlarına sahip %50/50 pamuk/polyester karışımı dokuma kumaş numunesine aplied edilmiştir. Aplikasyonda, kolay uygulanabilir ve yaygın bir metot olması nedeniyle emdirme-kurutma yöntemi tercih edilmiştir. Yatay fulard cihazı ile süspansiyon numunelere 3 bar basınç altında ve 4 m/dk hızla aplied edilmiştir. Numuneler, 60 °C'de etüvde kurutulmuştur. Kurutma sonrasında yatay fulard cihazında tekrar süspansiyon kumaşlara emdirilmiş ve kurutulmuştur. Daha önceki çalışmalardaki bulgulardan yola çıkarak emdirme-kurutma işlemi, toplam 5 kez tekrarlanmıştır (Özen vd., 2021).

3.3. Ölçüm Metodu (Measurement Method)

Çalışmada, pasif ısıtma özelliklerine sahip tekstil yüzeylerinin termal performansını belirlemek amacıyla bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Literatürdeki çalışmalarda, insan vücudunu temsil etmesi için polistiren köpük (Ma vd., 2024), ısıtma masası (Yuan vd., 2023), sıcaklık değişimini belirlemek için termocupl sensör veya termal kamera kullanılmıştır. Bu çalışmada da güneş ışığını temsil eden yapay ışık kaynağı, kumaş numunesi ve sıcaklık ölçüm sensöründen (termocupl) oluşan bir düzenek ile ölçüm yapılmıştır (Şekil 2). Ölçüm için poliüretan köpük üzerine termocupl sensör ve sensörün de üzerine kumaş numunesi yerleştirilmiştir. Numune yatay bir platform üzerine sabitlenmiş ve ölçüm süresi boyunca çevresel hava sirkülasyonundan izole edilmiştir. Literatürde, yapay ışık kaynağı olarak 200 W m⁻², 500 W m⁻², 1000 W m⁻² gibi ışık yoğunluklarına sahip ksenon veya UV lambalar kullanılmıştır (Yu vd., 2025; Wu vd., 2024). Bu çalışmada da ölçümde, yapay ışık kaynağı olarak 100 ve 300 Watt değerine sahip UV-A türü (315–400 nm dalga boyu aralığına sahip) lambalar kullanılmıştır. Işık kaynağı türünün etkisini incelemek amacıyla 250 Watt değerine sahip infrared lamba ile de ölçüm yapılmıştır. Işık kaynağı ile kumaş numunesi arasındaki mesafe 45 cm olarak ayarlanmıştır. Her ölçüm için 4 dakika yapay ışık uygulanmış, daha sonra kapatılmıştır. 10 dakika beklenmiştir. Yapay ışık uygulaması ve kapatılması sonrası kumaş numunesindeki sıcaklık değişimi izlenmiştir. AgNW'in etkisi olup olmadığının belirlenmesi için AgNw içermeyen ham kumaşta benzer şartlarda ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda, sıcaklık-zaman grafikleri elde edilmiştir. Test sonuçlarının değerlendirilmesinde, zaman içindeki sıcaklık değişim oranını analiz etmek için sıcaklık değişim eğrilerine logaritmik eğilim çizgileri uygulanmıştır (Alay Aksoy ve Yılmaz, 2025). Logaritmik eğilim çizgileri, R² (belirleme katsayısı veya regresyon faktörü) değerini %90'ın üzerinde tutmak için kullanılmıştır. Logaritmik eğilim çizgisi için kullanılan formül aşağıda verilmiştir:

$$T=a \ln(t)+ b \quad (1)$$

T bağımlı değişkendir (t zamanındaki sıcaklık), a doğal logaritmaya ve doğrusal zamana göre sıcaklık değişim oranını tahmin eden sabit katsayıdır ve b başlangıç ofsetini temsil eden bir sabittir. Bu analiz, yapay ışık altında AgNw içeren kumaşların yüksüz referans kumaşlara kıyasla sıcaklıklarındaki değişimin etkinliğini anlamaya yardımcı olması amacıyla gerçekleştirilmiştir.



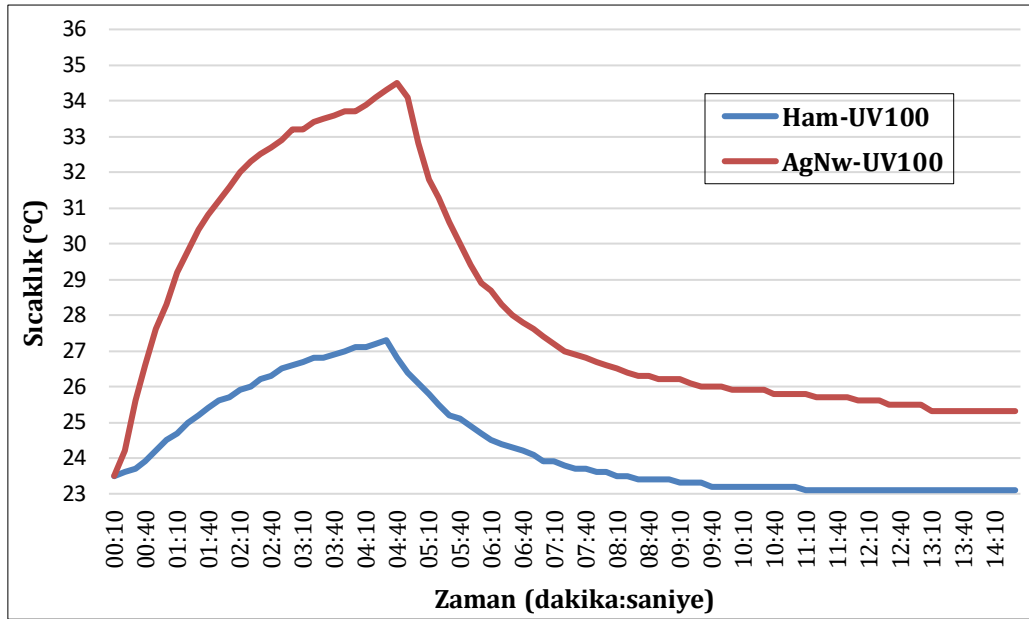
Şekil 2. Ölçüm düzeneği (Measuring device)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

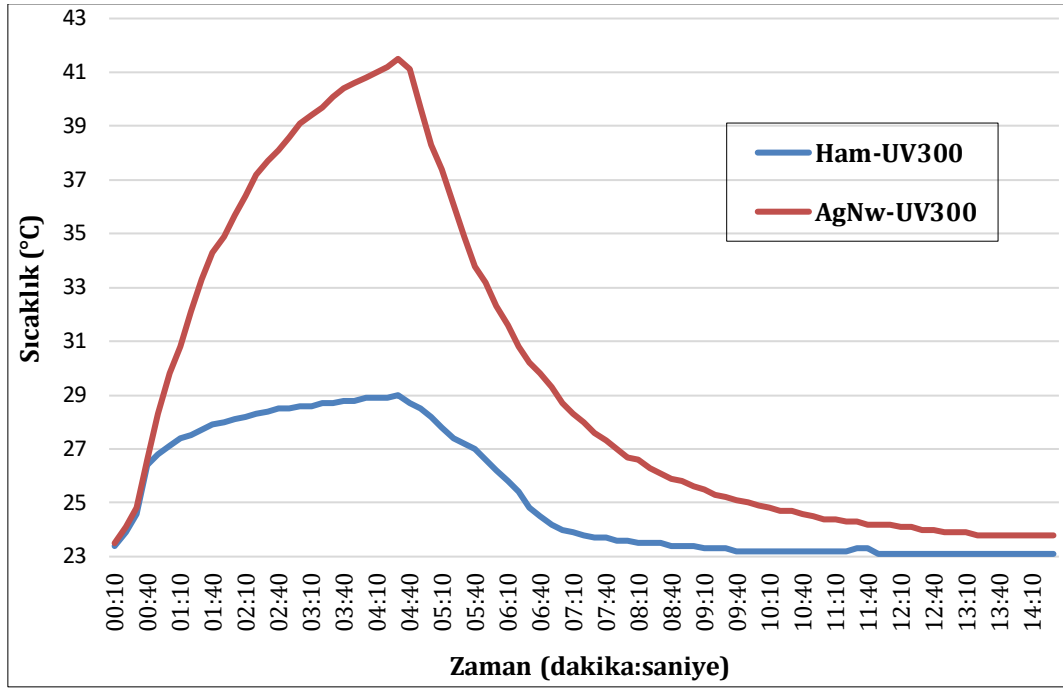
AgNw aplike edilen kumaşların termal özellikleri, UV-A ve infrared ışık kaynakları altında termokupl sensörler ile ölçülmüş ve kumaş numunelerinin yüzey sıcaklıklarındaki değişimler analiz edilmiştir.

4.1. UV-A lamba ile yapılan ölçümlere ait sonuçları

100 ve 300 Watt güce sahip UV-A lamba ile yapılan ölçüme ait sıcaklık-zaman grafikleri, Şekil 3 ve 4'de görülmektedir. Ölçümlerde, ışık kaynağı 4 dakika açık ve 10 dakika kapalı durumda tutulmuştur.



Şekil 3. Ham ve AgNw içeren kumaşların 100 Watt güce sahip UV-A lamba ile ölçüme ait sıcaklık-zaman grafikleri
(Temperature-time graphs of raw and AgNw containing fabrics measured with a 100 Watt UV-A lamp)



Şekil 4. Ham ve AgNw içeren kumaşların 300 Watt güce sahip UV-A lamba ile ölçüme ait sıcaklık-zaman grafikleri
(Temperature-time graphs of raw and AgNw containing fabrics measured with a 300 Watt UV-A lamp)

Şekil 3 ve 4 incelendiğinde, ham ve AgNw kaplamalı kumaşların sıcaklıkları ilk 4 dakika içerisinde artma eğilimi göstermiştir. Her iki UV lambada da AgNW kaplamalı numunelerin sıcaklık artış hızı, ham kumaşlara kıyasla belirgin biçimde daha yüksektir. En yüksek sıcaklık değerleri incelendiğinde, 100 Watt lambada ham kumaşın sıcaklığı yaklaşık 27,5 °C'ye ulaşırken, AgNW kaplamalı kumaşın sıcaklığı 34,5 °C civarında gerçekleşmiştir. 300 Watt güce sahip lambada ise bu değerler sırasıyla 29 °C ve 41 °C olarak ölçülmüştür. Ham ve AgNw kaplamalı kumaşların en yüksek sıcaklık değerleri arasındaki fark, 100 Watt güce sahip lambada 7 °C iken 300 Watt'lık lambada ise 12 °C civarındadır. Dolayısıyla, lambanın gücü arttıkça kumaşlar arasındaki sıcaklık farkı da beklediği gibi artma eğilimi göstermektedir. Öte yandan, ışık kaynağının 4 dakikalık açık olması sürecinde ham ve AgNw kaplamalı kumaşların sıcaklık farkı ortalama 100 Watt için 3 °C, 300 Watt için 9,2 °C'dir. Bu sonuçlar, AgNW kaplamasının yüksek yansıtıcılık ve iletkenlik özellikleri sayesinde gelen UV enerjisinin daha etkin bir biçimde absorbe edilip ısıya dönüştürüldüğünü göstermektedir (Yang vd., 2018).

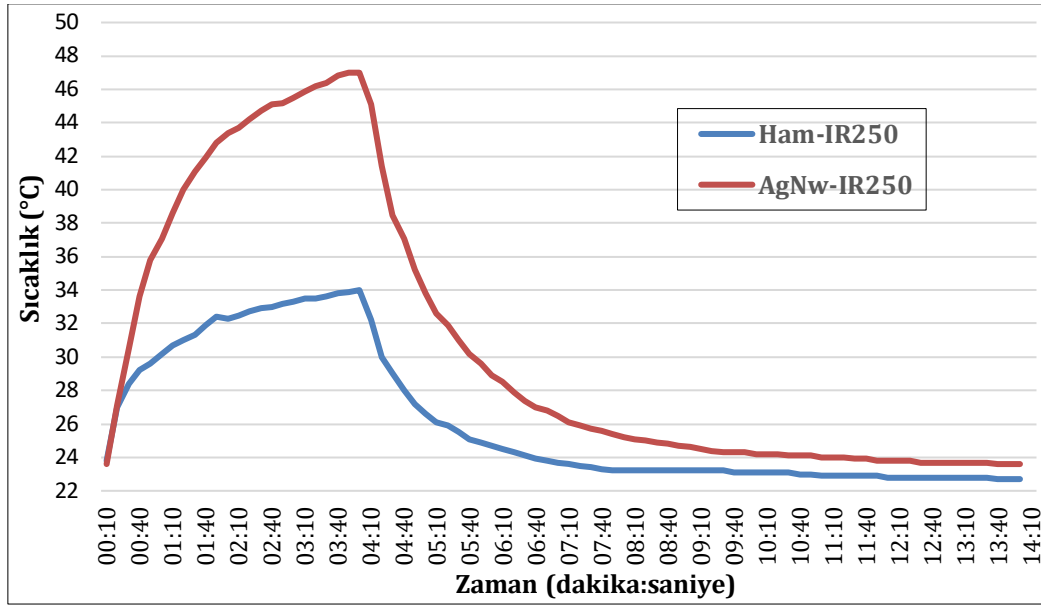
Isıtma periyodunun sona ermesiyle başlayan soğuma aşamasında, ham ve AgNw kaplamalı kumaşların sıcaklıkları azalma eğilimi göstermiştir. Sıcaklıklar 2,5 dakika sonunda (06:40) hızlı, daha sonra daha yavaş bir şekilde azalmıştır. Özellikle, AgNW kaplamalı numunelerin başlangıç sıcaklıklarının daha yüksek olmasına bağlı olarak ilk dakikalarda daha hızlı bir sıcaklık düşüşü gözlenmiştir. Ancak ilerleyen dakikalarda sıcaklık farkı azalarak her iki numune yaklaşık benzer kararlı sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Bu durum, AgNW kaplamanın ısı iletkenlik özelliği nedeniyle sıcaklığın çevreye daha hızlı aktarılabilirdiğini düşündürmektedir.

Lamba gücünün 100 Watt'tan 300 Watt'a çıkarılmasıyla birlikte hem ham hem de AgNW kaplamalı kumaşlarda en yüksek sıcaklık değerlerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Özellikle AgNW kaplamalı numunelerde sıcaklık artışının daha yüksek olması, bu malzemenin UV enerjisine karşı güçlü bir termal yanıt gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, AgNW kaplamalı tekstil yüzeylerinin pasif termal yönetim (soğutma) amacıyla kullanılabileceğini, ayrıca enerji verimli giyim ve koruyucu tekstil uygulamalarında potansiyel bir malzeme alternatifi olabileceğini göstermektedir.

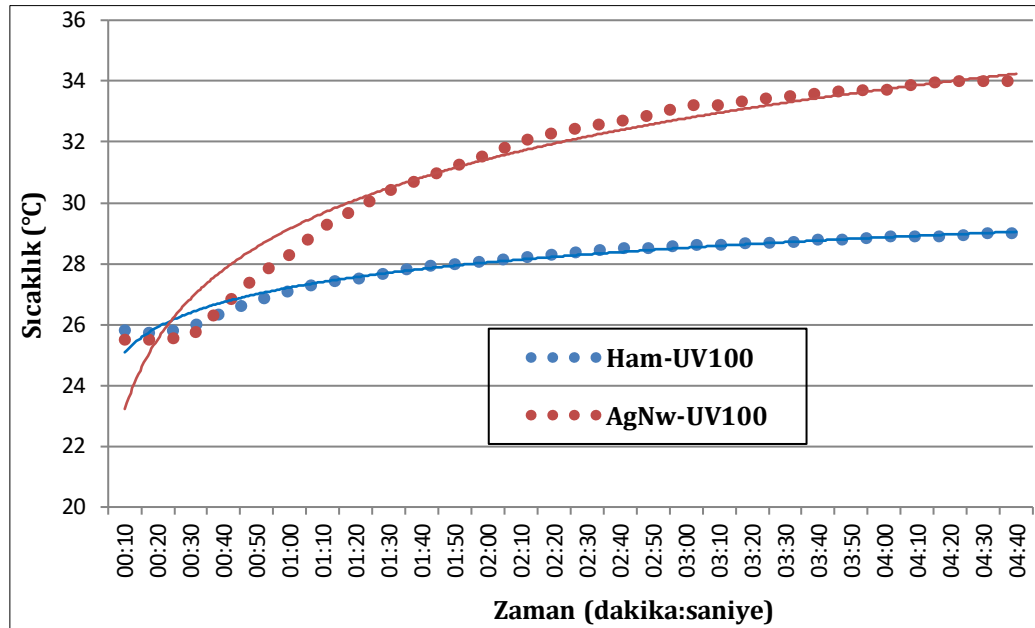
4.2. Infrared lamba ile yapılan ölçümlere ait sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde, 250 Watt güce sahip Infrared lamba ile yapılan ölçüme ait sıcaklık-zaman grafiği, Şekil 5'te görülmektedir. Ölçümlerde, ışık kaynağı 4 dakika açık ve 10 dakika kapatılmıştır.



Şekil 5. Ham ve AgNw içeren kumaşların 250 Watt güce sahip IR lamba ile ölçüme ait sıcaklık-zaman grafikleri (Temperature-time graphs of raw and AgNw containing fabrics measured with 250 Watt IR lamp)

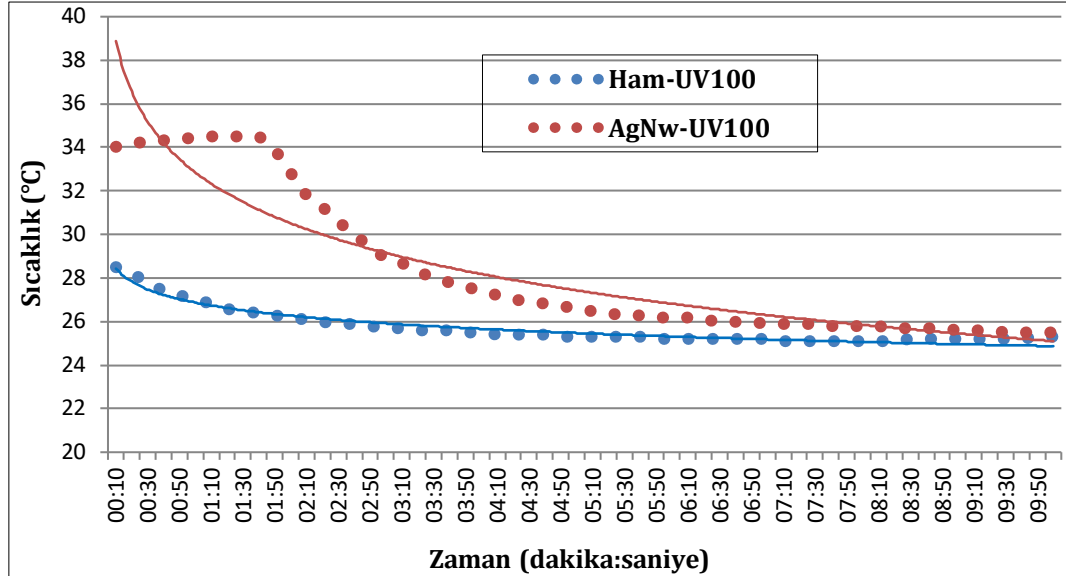
Elde edilen sonuçlara göre, ham ve AgNw kaplamalı kumaşlar IR ışığına maruz kaldığında sıcaklıkları hızlı bir biçimde artmış, ancak AgNW kaplamalı kumaşın ısınma hızı ve ulaştığı en yüksek sıcaklık değeri ham kumaşa göre oldukça yüksek olmuştur. Ham kumaşın en yüksek sıcaklığı yaklaşık 34 °C, AgNW kaplamalı kumaşın ise yaklaşık 48 °C olarak ölçülmüştür. Sıcaklık fark değeri 14 °C'ye ulaşmıştır. Isınma periyodunda ortalama 6,2 °C sıcaklık farkı gözlenmiştir. UV-A lambasında olduğu gibi bu fark, AgNW kaplamanın yüksek yansıtıcılık, elektriksel iletkenlik ve IR soğurma özellikleri sayesinde gelen ışık enerjisini daha verimli biçimde ısıya dönüştürdüğünü göstermektedir. Isıtma sürecinde AgNW kaplamalı numune çok daha dik bir sıcaklık artış eğrisi sergilemiştir. Bu durum, malzemenin yüzeyinde oluşan gümüş nanotel ağıının, IR enerjisinin absorpsiyonunu artırarak hızlı ısısal yanıt oluşturduğunu göstermektedir (Hsu vd., 2015; Gorji vd., 2021). Isıtma periyodu sona erdiğinde ise sıcaklık hızla azalmaya başlamış, ilk dakikalarda AgNW kaplamalı kumaşın daha yüksek sıcaklıktan ötürü daha hızlı bir soğuma eğilimi gösterdiği gözlenmiştir. Işık kaynağı kapatıldığında her iki kumaşta da sıcaklık azalma eğilimi göstermiştir. Ancak, tüm ısınma ve soğuma süresince AgNW kaplamalı kumaş daha yüksek yüzey sıcaklık değerleri sergilemiştir.



Şekil 6. 100 Watt güce sahip UV lamba ile 4 dakika açık durumda yapılan ölçüme ait sıcaklık-zaman grafiği (Temperature-time graph of the measurement made with a 100 Watt UV lamp turned on for 4 minutes)

4.3. Farklı ışık kaynakları ile yapılan ölçümlere ait ısınma ve soğuma bölgelerinin detaylı analizi

Çalışmada, UV ve infrared lamba ile 4 dakika açık, 10 dakika kapalı durumdaki ısınma-soğuma eğrilerine ait ısınma ve soğuma hızı, ham ve AgNw kaplamalı kumaşlar ve farklı lambalar için detaylı şekilde incelenmiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi her bir sıcaklık-zaman eğrisinin ısınma ve soğuma bölgelerine ayrı ayrı logaritmik eğilim çizgileri uygulanmıştır. Şekil 6-7'de 100 Watt güce sahip UV lamba ile 4 dakika açık ve 10 dakika kapalı durumda yapılan ölçüme ait sıcaklık-zaman grafiği örnek olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 7. 100 Watt güce sahip UV lamba ile 10 dakika (kapalı) durumda yapılan ölçüme ait sıcaklık-zaman grafiği (Temperature-time graph of the measurement made with a 100 Watt UV lamp for 10 minutes (off))

Tablo 1'de R^2 regresyon katsayısını, a değeri sıcaklık artış hızını göstermektedir. Tüm numunelerin farklı ışık kaynakları altında ısınma ve soğuma eğrilerine ait regresyon katsayısı %90'nın üzerindedir. a değerleri incelendiğinde, ısınma bölgesinde her üç ışık kaynağı ile yapılan ısıtma sonucunda AgNw içeren kumaşların a değerlerinin ham kumaşa kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, AgNw içeren kumaşların yüzey sıcaklıkları ışık kaynağı uygulandığında ham kumaşa kıyasla daha hızlı bir şekilde artış eğilimi göstermiştir. UV ışık kaynağında, lambanın gücü arttıkça ham ve AgNw içeren kumaşların sıcaklıkları daha yüksek a değeri nedeniyle daha hızlı bir şekilde artma eğilimi göstermiştir. En yüksek a değeri 300 Watt güce sahip UV lamba, en düşük a değeri ise 100 Watt güce sahip UV lamba ile elde edilmiştir.

Işık kaynağı kapatıldıktan sonra kumaşların yüzey sıcaklığının azaldığı soğuma bölgesindeki durum incelendiğinde, ısınma bölgesinin aksine AgNw içeren kumaşların daha yüksek a değeri nedeniyle daha hızlı bir şekilde soğuma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Isınma bölgesinde olduğu gibi soğuma bölgesinde de 300 Watt güce sahip UV lamba en yüksek a , 100 Watt güce sahip UV lamba ise en düşük a değerini vermiştir.

Tablo 1. Farklı ışık kaynakları ile yapılan ölçümlere ait sonuçlar (Results of measurements made with different light sources)

Işık kaynağı türü	Kumaş türü	Isınma			Soğuma		
		R^2	a	b	R^2	a	b
UV-100	Ham	96,4	1,1888	25,086	95,12	-0,87	28,431
	AgNw	94,9	3,3064	23,223	84,72	-3,366	38,879
UV-300	Ham	93,71	3,969	22,284	98,45	-3,075	37,941
	AgNw	89,46	7,958	16,013	95,16	-5,446	44,575
IR-250	Ham	97,09	3,0171	22,341	97,43	-1,189	41,033
	AgNw	95,81	6,7314	19,035	97,99	-4,51	28,924

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, tekstil yüzeylerinde pasif yalıtım özelliği kazandırmaya yönelik olarak gümüş nanotel (AgNW) kullanılmıştır. Su, yüzey aktif madde ve AgNW'dan oluşan bir süspansiyon %50/50 pamuk/polyester karışımı dokuma kumaşlara 5 defa uygulanmıştır. UV-A ve infrared lambalar kullanılarak farklı ışık yoğunlukları ile termocupl sensör ile sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Çalışmada, en yüksek sıcaklık farkı ham kumaşa göre UV lamba için 100 Watt'ta yaklaşık 7 °C, 300 Watt'ta 12 °C ve infrared lamba için 250 Watt'ta 14 °C olarak ölçülmüştür. Isınma hızı ışık gücüyle doğru orantılı olarak artmış, AgNW kaplamalı yüzeylerde sıcaklık artışı daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Soğuma eğrileri incelendiğinde, AgNW kaplamalı numunelerin yüksek termal iletkenliği nedeniyle çevreye daha hızlı ısı kaybettiği görülmektedir.

Bu bulgular, AgNW kaplamalı tekstil yüzeylerinin pasif ısıtma sistemleri, akıllı giyim teknolojileri, enerji verimli yüzey kaplamaları ve termal konfor uygulamaları için yüksek potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır. Özellikle düşük güçteki ışık kaynakları altında dahi belirgin sıcaklık artışları elde edilmesi, bu kaplamaların düşük enerjiyle etkin ısı performans sağlayabileceğini göstermektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Aksoy, S. A., & Yılmaz, D. (2025). Thermoregulating properties of viscose ring spun yarns modified with phase change material (PCM) microcapsules. *Innovative Textile Materials and Processing*, 20.
- Cai, L., Song, A. Y., Wu, P., Hsu, P. C., Peng, Y., Chen, J., ... & Cui, Y. (2017). Warming up human body by nanoporous metallized polyethylene textile. *Nature Communications*, 8(1), 496. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00599-2>
- Cao, X., Yan, K., Chen, H., Xu, Q., Zong, Y., Sun, X., & Li, X. (2025). Passive radiation heating smart fabric with underwater sensor and electromagnetic wave absorption. *Applied Materials Today*, 42, 102550. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2025.102550>
- Gorji, M., Mazinani, S., Faramarzi, A. R., Ghadimi, S., Kalaei, M., Sadeghianmaryan, A., & Wilson, L. D. (2021). Coating cellulosic material with Ag nanowires to fabricate wearable IR-reflective device for personal thermal management: The role of coating method and loading level. *Molecules*, 26(12), 3570. <https://doi.org/10.3390/molecules26123570>
- Gu, J., Wang, W., & Yu, D. (2022). Temperature-control and low emissivity dual-working modular infrared stealth fabric. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 653, 129966. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129966>
- Hsu, P. C., Liu, X., Liu, C., Xie, X., Lee, H. R., Welch, A. J., ... & Cui, Y. (2015). Personal thermal management by metallic nanowire-coated textile. *Nano Letters*, 15(1), 365–371. <https://doi.org/10.1021/nl5036572>
- Li, B., Ao, S., Song, H., Liu, C., Sun, F., & Su, X. (2024). Molecular-engineered cotton textile with multimodal heating and high robustness for personal thermal management. *Cellulose*, 31(14), 8961–8976. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05638-0>
- Li, X., Yang, Y., Quan, Z., Wang, L., Ji, D., Li, F., ... & Ramakrishna, S. (2022). Tailoring body surface infrared radiation behavior through colored nanofibers for efficient passive radiative heating textiles. *Chemical Engineering Journal*, 430, 133093. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133093>
- Lian, Y., Yu, H., Wang, M., Yang, X., Li, Z., Yang, F., ... & Tao, G. (2020). A multifunctional wearable E-textile via integrated nanowire-coated fabrics. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(25), 8399–8409. <https://doi.org/10.1039/D0TC01344B>
- Luo, H., Li, Q., Du, K., Xu, Z., Zhu, H., Liu, D., ... & Qiu, M. (2019). An ultra-thin colored textile with simultaneous solar and passive heating abilities. *Nano Energy*, 65, 103998. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.103998>
- Militký, J., Křemenáková, D., Venkataraman, M., Večerník, J., Martínková, L., & Marek, J. (2021). Sandwich structures reflecting thermal radiation produced by the human body. *Polymers*, 13(19), 3309. <https://doi.org/10.3390/polym13193309>
- Özen, Ö., Yapıcı, K., & Yılmaz, D. (2021). Comprehensive performance characterization of conductive fabric made of reduced graphene oxide (rGO). *Journal of Applied Polymer Science*, 138(22), 50524. <https://doi.org/10.1002/app.50524>
- Peng, Y., & Cui, Y. (2020). Advanced textiles for personal thermal management and energy. *Joule*, 4(4), 724–742. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.02.011>
- Pennisi, E. (2020). Living with heat. *Science*, 370(6518), 778–781. <https://doi.org/10.1126/science.370.6518.778>
- Tang, L., Lyu, B., Zhou, Y., Gao, D., & Ma, J. (2025). A moderately photothermal adjustable personal thermal management textile with integrated radiative and electric heating. *Chemical Engineering Science*, 122344. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122344>
- Tang, L., Lyu, B., Gao, D., Jia, Z., Fu, Y., & Ma, J. (2024). A Janus textile with tunable heating modes toward precise personal thermal management in cold conditions. *Small*, 20(15), 2308194. <https://doi.org/10.1002/smll.202308194>
- Tavakkol, E., Borhani, S., Nezhad, A. Z., Shanbeh, M., & Alsharif, M. A. (2023). Passive radiative personal heating by woven fabrics containing aluminum particles. *Materials Today Energy*, 31, 101226. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2023.101226>
- Wu, R., et al. (2024). Spectrally engineered textile for radiative cooling against urban heat islands. *Science*, 384, 1203–1212. <https://doi.org/10.1126/science.adl0653>
- Xie, X., Liu, Y., Zhu, Y., Xu, Z., Liu, Y., Ge, D., & Yang, L. (2021). Enhanced IR radiative cooling of silver coated PA textile. *Polymers*, 14(1), 147. <https://doi.org/10.3390/polym14010147>
- Xue, S., Huang, G., Chen, Q., Wang, X., Fan, J., & Shou, D. (2024). Personal thermal management by radiative cooling and heating. *Nano-Micro Letters*, 16, 153. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01360-1>

- Yang, A., Cai, L., Zhang, R., Wang, J., Hsu, P. C., Wang, H., ... & Cui, Y. (2017). Thermal management in nanofiber-based face mask. *Nano Letters*, 17(6), 3506–3510. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00709>
- Yang, Y., Deng, J., Wei, J., Zhao, Y., Luo, Y., & Xu, X. (2018). Photothermal textile enabled by silver nanowire coating for personal thermal management. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(29), 24940–24947. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b07454>
- Yu, H., Lu, J., Yan, J., Bai, T., Niu, Z., Ye, B., ... & Han, G. (2025). Selective emission fabric for indoor and outdoor passive radiative cooling in personal thermal management. *Nano-Micro Letters*, 17, 192. <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01713-4>
- Zong, J. Y., Zhou, X. J., Hu, Y. F., Yang, T. B., Yan, D. X., Lin, H., ... & Li, Z. M. (2021). A wearable multifunctional fabric with excellent electromagnetic interference shielding and passive radiation heating performance. *Composites Part B: Engineering*, 225, 109299. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109299>