

DOĞAL RADYASYONUN YÖNETİMİYLE TASARLANAN KİŞİSEL TERMAL YÖNETİM SAĞLAYAN PASİF AKILLI YAPILAR

Sibel KAPLAN^{ID}
Nazife KORKMAZ MEMİŞ*^{ID}

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Müh. Böl., Isparta, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 27.03.2023

Kabul Tarihi / Accepted: 07.08.2023

ÖZ: Kişisel termal yönetimin sağlanmasına yönelik, değişen vücut ve çevre şartlarına adapte olabilen pasif ve aktif akıllı tekstil yapıları ile artırılmış konfor ve azalan enerji gereksinimi gibi konularda avantajlar sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, dünya için gün geçtikçe önem kazanan enerji kısıtlarına bağlı olarak ekstra enerji harcanmadan doğal radyasyon enerji bileşenleri (ultraviyole, görünür, infrared) ve mekanizmalarının (yayılm, yansıtma, absorpsiyon, geçirgenlik) yönetimiyle vücudun termal dengesini ısıtma/soğutma veya ısıtma-soğutmayı birlikte sağlayarak koruyan tekstil malzemeleri, etkili radyasyon ısı transfer mekanizmaları ışığında incelenmiştir. Bu tür pasif akıllı yapılar için kullanılan ölçüm yöntemleri, mevcut çalışmaların eksik noktaları ve ilerleme yönü olarak literatür ışığında değerlendirilmeler yapılmıştır. Mevcut çalışmaların son dönemde küresel ısınmanın etkilerinin de somut olarak hissedilmesiyle birlikte radyasyonla iç ortamlarda kişisel soğutma konusunda yoğunlaştığı, dış ortamda geçerli olan karmaşık mekanizmaların tasarım ve ölçümleri zorlaştırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, çalışmalarda yapıların giyilebilirlikleri açısından önemli olan tutum, konfor ve radyasyon dışındaki ısı ve kütle transfer mekanizmalarının bütüncül olarak incelenmeleri konusunda eksiklikler tespit edilmiştir. Çalışmalar, konfor ve enerji tasarrufu beklentilerinin hızla değiştiği günümüzde radyasyon enerjisi yönetimiyle ısıtma/soğutma yapan yapıların vücut ve ortam koşullarına otonom olarak uyum sağlayabilecek şekilde tasarlanması yönünde ilerlemektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğal radyasyon, kişisel termal yönetim, akıllı tekstil, meta malzeme.

PASSIVE SMART STRUCTURES PROVIDING PERSONAL THERMAL MANAGEMENT DESIGNED BY MANAGEMENT OF NATURAL RADIATION

ABSTRACT: Advantages such as increased comfort and reduced energy requirement can be obtained with passive and active smart textile structures that can adapt to body and environmental condition changes for personal thermal management. In this study, depending on the energy constraints that are gaining importance, heating/cooling or dual heating-cooling textile materials to keep the thermal balance of the body by managing natural radiation energy components (ultraviolet, visible, infrared) and mechanisms (emissivity, reflectivity, absorptivity, transmissivity) were investigated in the light of effective radiation heat transfer mechanisms. Measurement methods used for such passive smart structures, the deficiencies of current studies and the direction of progress were evaluated in the light of the literature. It was concluded that, with the effects of global warming, current studies have focused on personal cooling in indoor environments with radiation management. Moreover, the complex mechanisms valid for outdoor conditions are thought to make the design and measurements of these structures difficult. In addition, deficiencies were identified about examination of parameters which are important for wear ability such as hand, comfort and other heat and mass transfer mechanisms. Studies are progressing in the direction of designing textile structures that perform heating/cooling with radiation management in a way that can adapt to body and ambient conditions autonomously.

Keywords: Natural radiation, personal thermal management, smart textile, meta material.

*Sorumlu Yazarlar/Corresponding Author: nazifekorkmaz@sdu.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1271662>

www.tekstilmuhendis.org.tr

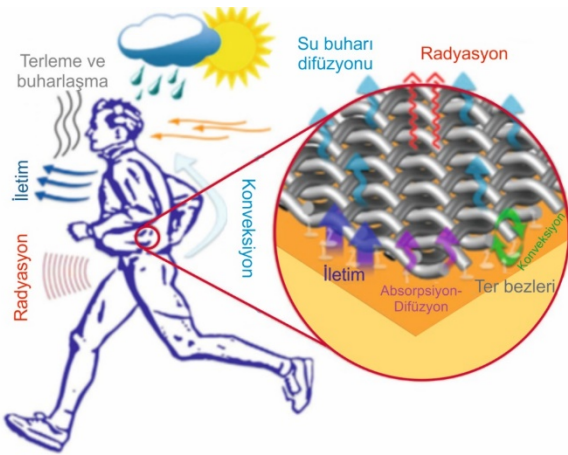
1. KİŞİSEL TERMAL KONFOR SAĞLAMANNIN ÖNEMİ VE GÜNCEL DEĞİŞİMLER

Çağın şartlarına bağlı olarak tüketicilerin artarak devam eden ‘iyi görünmenin yanında iyi hissetme’ beklentisi, konforun sağlanmasına yönelik malzeme, kumaş ve giysi tasarımları konularındaki çalışmaların son yıllarda malzeme özelliklerine bağlı olarak pasif veya aktif fonksiyon gösteren akıllı tekstil uygulamaları yönünde ilerlemesine yol açmıştır. Konfor, vücut-giysi-çevre sistemi ile ilgili çok sayıda parametreyi içeren karmaşık bir kavramdır ve faktörlerden herhangi birinde yaşanan değişim konforsuzluğa neden olabilir [1]. Konforun en etkili bileşenlerinden termal konfor, vücutla çevre arasındaki ısı dengeye (Denklem 1) dayalı olarak ortaya çıkar, ortam sıcaklığının yanında bağıl nem ve hava hızına da bağlı olarak değişir ve mükemmel olarak işleyen termoregülasyon mekanizması ile belirli oranda sağlanabilir. Genel olarak, vücutta üretilen ısı enerjisinin, uzaklaştırılan ısı enerjisine eşit olduğu durumda nötr bir histen, yani termal konfordan bahsedilebilir. Denklem 1’de verilen vücut termal dengesi formülü son yıllara kadar devam eden konvansiyonel termal konfor çalışmalarında genellikle radyasyon bileşeni gözardı edilerek uygulanmış, iletim, taşınım ve buharlaşmanın ortak etkileriyle vücut-giysi-çevre sisteminde meydana gelen ısı ve kütle transferi mekanizmalarına yoğunlaşmıştır.

$$P_{\text{ısı stres}} = P_{\text{üretilen}} + P_{\text{güneş}} - P_{\text{radyasyon}} - P_{\text{buharlaşma}} - P_{\text{taşınım}} - P_{\text{iletim}} \quad (1)$$

[2]

Vücutta meydana gelen ısı ve kütle transfer yolları, Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Vücut-giysi-çevre sisteminde meydana gelen ısı ve kütle transfer yolları [3]

Vücutta terin bulunduğu durumdaki doğal termal yönetim (ısıtma ve soğutma) mekanizmaları, sıvı transfer özelliğine sahip yapıların hızlı kurumaya bağlı olarak buharlaşma sırasındaki ısı alımına ve absorpsiyon sırasında ortaya çıkan ısıya bağlıdır [2, 3]. Fakat bu prosesler için yüksek oranda terleme, ıslaklığın oluşturduğu konforsuzluk hissi ve termal direnç düşüşü dezavantajlarını göze almak gerekir [4]. Diğer termal yönetim

mekanizmaları ise standart liflerden üretilen tekstil yapılarının oldukça düşük olan termal iletkenliklerinin özel malzemeler veya tasarımlarla değiştirilmesi ve vücutta meydana gelen taşınım mekanizmasının kontrolüdür [5, 6]. Son yıllarda, değişen ortam şartlarına uyum sağlayabilen akıllı teknolojilerin standart liflerden üretilen giysi sistemlerine uygulanması ile vücudun isteğe bağlı veya otonom olarak ısıtılması/soğutulması ve kuru tutulabilmesi mümkün olabilmektedir. ‘Kişisel Termal Yönetim’ kapsamında da ele alınan ve ortama değil giysiye müdahale edilerek termal konforun sağlanmasına yoğunlaşan sistemler, aktif ve pasif sistemler olarak iki gruba ayrılır: aktif grupta elektrotekstil (hava ve sıvı bazlı soğutma/ısıtma sağlayan yapılar) [7], yarı iletken soğutucu giysiler, elektrik ısıtıcı ve termoelektrik malzemeler [7, 8] bulunurken faz değiştiren malzemeler, radyasyon enerjisi yönetimi ile soğutma/ısıtma, buharlaşmayla soğutma ile şekil hafızalı malzemeler ise pasif termal regülasyon sağlayan malzeme ve yöntemler grubunda yer alır [1].

Kişisel termal yönetimin radyasyon enerjisi yönetimiyle gerçekleştirildiği yapılarda, önceki paragrafta belirtilen sistemlerden farklı olarak ek enerji harcamadan yayıcılık (emissivity), geçirgenlik (transmissivity), yansıtıcılık (reflectivity) ve absorpsiyon (absorption) mekanizmalarının kontrolü ile vücut ısıtılır/soğutulur [1]. Bu teknolojiler, kaynakların kontrollü kullanılmasının gerek-ği, üretim ve kullanım aşamaları için yeni kısıtların ortaya çıktığı günümüzde yükselen eğilimler arasındadır. İklim değişimlerinin etkilerinin de net bir şekilde görülmesiyle dış ortam sıcaklıklarındaki dalgalanma (25 °C’yi aşabilen farklar) [9], bina yalıtım/soğutma sistemleri için artan enerji gereksinimleri ve dünyanın kısıtlı enerji rezervi, ortamı değil yalnızca vücudu ısıtıp soğutan kişisel termal konfor yönetimi sağlayan giysilerin tasarımını desteklemektedir [9, 10]. Kişisel termal yönetim teknolojilerinin, olağanüstü iç ve dış ortam koşullarında veya normal koşullarda aktivite nedeniyle oluşan sıcaklık artışının önlenmesi gereken sporcular, farklı iş kollarında çalışanlar [4] yanında, dünyadaki ısı stresiyle ilgili ölüm oranlarının artış eğiliminde [9] olması göz önünde bulundurulduğunda, gelecekte standart günlük aktiviteler sırasındaki konfor ve performans için de önemli olabileceği düşünülmektedir. İç ortamlarda geçirilen sürelerin % 95’e ulaşması [3] ile bina ısıtma/soğutma sistemlerinin toplam global enerjinin % 32-40’ını kullandığı ve sera gazı emisyonlarının % 30’unu oluşturduğu düşünülürse iç ortamlarda kişisel ısıtıcı/soğutucu giysilerle vücuda yakın ortamın soğutulması ile soğutma için gereken enerjiden tasarruf edilebileceği düşünülmektedir [10-12]. İç ortam sıcaklığında 2,2 °C’lik artış/azalışın lokasyon ve iklime bağlı olarak % 15-60 enerji tasarrufu sağlayabileceği belirtilmiştir [1].

2. DOĞAL RADYASYONUN YÖNETİMİYLE TERMAL KONFOR SAĞLAMANNIN TEMEL MEKANİZMALAR

2.1. Radyasyon Enerji Bileşenleri

Güneşten gelen radyasyon enerjisi farklı dalga boylarında dünya yüzeyine ulaşmaktadır; % 5’ini oluşturan ultraviyole (100-400 nm), % 46’sını oluşturan görünür ışık (400-700 nm), ve % 49’unu oluşturan infrared (>700 nm-1 mm) enerji. 700-1100 nm dalga

boyu aralığında yer alan yakın infrared radyasyon (Near-IR/NIR) enerjisi dünyanın ısıtılmasında rol alan ana bileşendir [11, 12]. Diğer bileşenler olan uzak IR (FIR) 200 μm 'nin altındaki dalga boylarında yer alan vücut IR bileşenlerindedir ve atmosferin saydamlığından sorumludur. Orta IR (MIR) ise (7-14 μm) sıcak cisimlerin yaydığı dalga boyuna karşılık gelir. Vücut infrared radyasyon (IR) enerjisi de bu yolla yayılır ve bu bileşen 'parmak izi bandı' olarak da adlandırılabilir. Atmosferik pencere olarak da adlandırılan (8-13 μm) uzun dalga boylu IR (LWIR) MIR dalga boylu vücut enerjisinin daha soğuk ortama uzaklaştırılmasının yoludur [13]. İç ortamda stabil şartlarda 34 $^{\circ}\text{C}$ 'lık deri yüzey sıcaklığında vücut 7-14 μm dalga boylu MIR yayır ve derinin infrared yayıcılığı (emissivity) 0,98/0,96 (ıslak/kuru) [1, 4] net radyasyon güç yoğunluğu 100 W/m^2 'dir [2]. Bu şartlarda ortam havası 23,9 $^{\circ}\text{C}$ iken vücut alanı da hesaba katıldığında Stefan Boltzman Kanunu'na göre 112 Watt'lık bir soğutma etkisi elde edilebilir. Bu soğutma etkisi, stabil şartlarda üretilen 105 W 'lık ısı oranını (58,2 W/m^2 'lik metabolik oran) geçerek hissedilir oranda soğutma etkisi oluşturabilmektedir [14].

Uzun yıllara dayalı konfor çalışmalarında hesaplara dahil edilmeyen ve vücuttan olan ısı transferinin yaklaşık % 50'sine karşılık gelen radyasyon bileşeninin [5, 13] yönetimine yönelik çalışmalar, küresel ısınma ve enerji tasarrufu konularının da etkisiyle son yıllarda gündeme gelmiştir. 'Radyasyonla Kişisel Termal Yönetim Sistemleri' olarak adlandırılan, iç ve dış ortamlar için farklı yapı ve bitim işlemleriyle tasarlanabilen bu sistemlerin ana prensibi, radyasyon enerjisi kontrolüne uygun olmayan standart liflerden üretilen kumaşların infrared optik özelliklerinin değiştirilmesiyle farklı yönlerde termal yönetim yaparak vücudu ısıtıp soğutabilmeleridir. Sıcak ve soğuk iç/dış ortamlarda termal radyasyon yayıcılığının artırılması ve azaltılması temel mekanizmadır. Dış ortamda ise yayıcılık düzenlemesine ek olarak ısıtma ve soğutma için sırasıyla yüksek güneş ışığı absorptivitesi ve yansıtıcılığı gereklidir [9].

Radyasyon yayıcı olarak vücudun sabit sıcaklıkta olduğu, meydana gelen ısı transferinin de sabit olduğu kabulüyle güneş altı yani dış ortam için vücudun soğutma gücü (pozitif değerler soğutma, negatif değerler ısıtmaya karşılık gelir) Denklem 2'de ifade edilmiştir:

$$P_{\text{net}}(T_e) = P_{\text{rad}}(T_e) - P_{\text{atm}}(T_{\text{atm}}) - P_{\text{güneş}} - P_{\text{radyasyon dışı}} \quad (2) \quad [10]$$

Burada;

$P_{\text{net}}(T_e)$: Vücudun net soğutma gücü (W/m^2),

$P_{\text{rad}}(T_e)$: Yayıcı yani vücudun termal radyasyon gücü,

$P_{\text{atm}}(T_{\text{atm}})$: Atmosferden absorbe edilen güç,

$P_{\text{güneş}}$: Absorbe edilen güneş radyasyonu,

$P_{\text{radyasyon dışı}}$: İletim ve taşınım ile meydana gelen ısı transferini ifade etmektedir.

P_{atm} ve $P_{\text{radyasyon dışı}}$ bileşenlerinin ortam şartlarına bağlı olmasından dolayı dinamik radyasyon ayarı için iki yöntem vardır: i) absorbe edilen güneş enerjisinin kontrolü, ii) termal radyasyonun kontrolü. Konu, radyasyonla olan ısı transfer mekanizmaları ışığında açıklanacak olursa;

$$\text{Stefan Boltzman Yasası: } P = \epsilon\sigma T^4, \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) + \rho(\lambda) = 1, \quad (3)$$

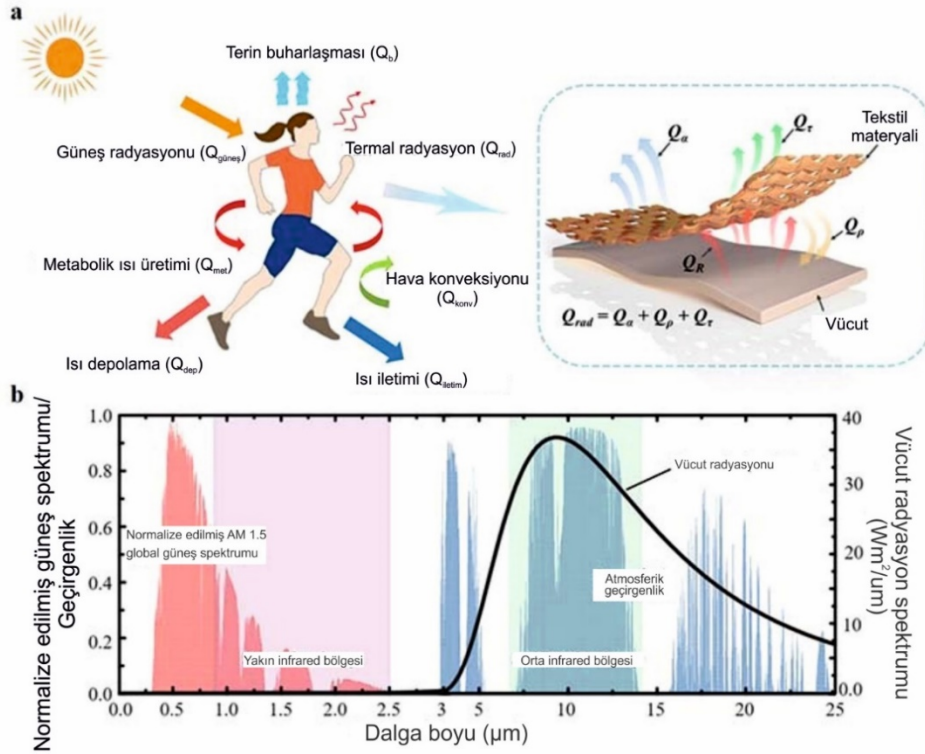
Kirchhoff Yasası'na göre P termal radyasyon yoğunluğu için $\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda)$ 'dir.

Burada; σ : Stefan-Boltzmann sabiti, T: yüzey sıcaklığı, ϵ : yüzey yayıcılığı (emissivity), α : yüzey absorptivitesi (absorptivity), ρ : yüzey yansıtıcılığı (reflectance), τ : yüzey geçirgenliği (transmittance), ve λ : dalga boyunu ifade eder.

Bu durumda dinamik radyasyon kontrolü için α , τ , ve ρ 'nin sırasıyla güneş ve IR enerji bölgelerinde yönetimi gereklidir [10]. Yansıtıcılık oranının artırılıp yayıcılığın azaltılmasıyla IR geçirgenliği ve absorpsiyonunun etkileri azaltılabilir. İnsan vücudu, tüm dalga boylarındaki radyasyonu absorplayan siyah bir cisim gibi davranır ve buna bağlı olarak IR absorpsiyonu IR yayıcılığına eşittir. Yüksek IR geçirgenliği ve absorpsiyonuna sahip giysiler daha yüksek IR enerjisinin vücuda ulaşmasını sağlar [15]. Şekil 2'de vücutta radyasyonla meydana gelen ısı transfer mekanizmaları ile güneş ve vücut doğal radyasyon spektrumu görülmektedir.

2.2. Infrared Radyasyon (IR) Kontrolü ile Soğutucu Etkinin Elde Edilmesi

İlk olarak 1828 yıllarında kayda geçen radyasyonla soğutma prensibinde her cismin radyasyonla enerji yaydığı, alınan enerjinin uzaklaştırılardan düşük olduğu durumda soğutmanın sağlanabileceği belirtilmiştir. 1970'li yıllardan beri gece ortamında soğutma konusu da gündemdedir ve bu teknolojiler elektrik üretimi, renkli boya ve tekstil endüstrisi, farklı yöntemlerle doğadan su elde edilmesi ve enerji tasarruflu binalar gibi farklı endüstrilerde kullanıma sahiptir [16]. IR yönetimi ile soğutma, geleneksel enerji-yoğun teknolojilere bir alternatif olarak önerilmiş, bir cismin hiç enerji harcamadan fazla ısısını infrared radyasyon olarak atmosferik pencereden uzaklaştırması esasına dayandırılmıştır [17]. İç ve dış ortamlar için soğutucu özellikli giysilerin (IR) kontrolü ile tasarlanmasına yönelik dünya literatüründeki çalışmalar son yıllarda yoğunlaşmış, genellikle fotonik yapıların sentezi, film/nanomembran üretimi ve kumaşların kompozit taşıyıcısı olarak kullanıldığı uygulamalara kadar ilerlemiştir.



Şekil 2. Vücutta meydana gelen a) radyasyon ısı transferi ve b) doğal radyasyon spektrumu [6]

Kişisel soğutma sistemleri, termal radyasyon spektrumunun vücut fazla ısısının atmosfer penceresi (8-13 μm) aracılığıyla uzaklaştırılması için yönetilmesiyle tasarlanmaktadır. Kişisel soğutucu giysi sistemleri için iç ve dış ortam şartlarında aktif olan mekanizmalar farklılık gösterir: iç ortamda yapının saydamlığı (transperancy) ve yayıcılığı (emissivity) artırılıp MIR spektrumunda vücut radyasyon enerjisinin atmosferik pencereden uzaklaştırılması gerçekleşir. Dış ortamda buna ek olarak güneşten gelen UV-VIS ve NIR dalga boyundaki ışınların (yaklaşık 1000 W/m²) yansıtılarak ve güneş ışınları absorpsiyonu minimize edilerek vücutta oluşturacakları ısıtma etkisinin ortadan kaldırılması gerekir [10]. Dış ortam aktivitelerinde, güneş enerjisinin de etkisiyle çok büyük miktarlarda ısı ortaya çıkar [18]. Ayrıca dış ortam şartlarında güneş radyasyonuna ek olarak ortam havasının sıcaklığı, bağıl nemi ve hızı da termal konfor durumu üzerinde etkilidir. Radyasyon enerjisinin yönetimiyle dış ortam pasif termal yönetimi uygulaması daha karmaşık mekanizmalara sahiptir ve önünde üç engel mevcuttur: a) Dış ortam IR atmosferik penceresi, vücut termal emisyonunun büyük bir kısmının (iç ortama göre çok daha büyük oranda: 0,6 mm kalınlığındaki pamuklu kumaş için dış ortamda 150 W/m² iç ortamda ~35 W/m²) daha soğuk olan dış ortama aktarılmasına izin verir, b) Dış ortam güneş radyasyon enerjisi (~1000 W/m²) ekstra ısıl yük oluşturarak kişisel soğutmayı zorlaştırmaktadır (güneş enerjisinin çok küçük bir kısmı bile soğumanın engellenmesi için yeterlidir: yüzey yayıcılığı (ϵ) = 1 ve $\epsilon = 0$ için uzaklaştırılan ısı enerjisi değerleri sırasıyla $q \sim 231,6$ W/m², ve $q \sim 97,1$ W/m²), c) Dış

ortam sıcaklık değişimleri iç ortamın aksine çok yüksek ve kontrol dışıdır. Belirtilen nedenlerden dolayı termal yönetim çalışmalarının çoğunluğunda iç ortam şartları için tasarımlar yapılmıştır [9]. Bu spektral seçici yapılar (güneş ve vücut IR enerjilerine karşı farklı davranan) termal meta-malzemeler olarak adlandırılır ve belirtilen özellikler kimyasal bileşenlerinden çok iyi tasarlanmış yapılarına bağlıdır [1].

Genel olarak radyasyonla soğutma teknolojileri için kullanılan dört temel prensip tasarım örnekleri ışığında sonraki bölümlerde açıklanmıştır. Bu prensipler tek başına veya kombinasyonlar şeklinde bir ürün için kullanılabilirler.

2.2.1. Güneş VIS-NIR ışınlarını yansıtma (reflection)

Güneşten gelen NIR ışınlarını olabildiğince yansıtma soğutucu uygulamalar için çözümlerden biridir ve dış ortamda güneşle temas halindeki ürünler için kullanılır. Kavak yaprağının arka kısmını kaplayan beyaz tüycüklerin güneş IR enerjisinin % 55'e kadar, çöl karıncalarının vücutlarını kaplayan gümüş tüycüklerin de % 67'ye kadar NIR ışınlarını yansıtması bu mekanizmanın esin kaynağı olan doğadaki örneklerdir [11]. Yüksek yansıtma indeksine sahip mikro/nano partiküllerle yapının yansıtıcılığı artırılırken yapının ısıyı absorbe etmesi de engellenir. Kullanılacak partiküllerin yansıtma performansları 'Saçılma Enine Kesit Teorisi' (Scattering Cross Section Theory) ile hesaplanır ve metallerdeki serbest elektronların infrared fotonları yansıtmasıyla meydana gelir [15]. VIS ve NIR spektrumunda yüksek saçırma etkisine ve düşük absorpsiyona sahip metalik partiküller

(çinko, gümüş, titanyum, alüminyum, bakır, nikel, zirkonyum, magnezyum vb.) [1, 2, 19, 20, 21], inorganik ve organik maddeler (titanyum dioksit, demir, karbonat, flor/indium/ antimon içerikli tin oksit, silisyum ve azo pigmentleri ve katmanlı formda metalik partiküllerle kombinasyonları) [18, 22] ile doğal bileşenler (klorofil, vb.) yansıtma etkisi için kullanılabilir [13]. Yansıtıcı NIR kaplamalarında kullanılan partiküllerin kristalinitesi, kimyasal yapısı, boyut boyut dağılımı, şekil, dağılılabirlik (dispensability), partikül gözenekliliği ve konsantrasyon, yansıtıcılık sonucunu etkileyen parametrelerdir. Yeterli yansıtma için partikül çapının IR dalga boyunun en az yarısı kadar olması gerekir [15]. Partikül yansıtma indeksinin enerjinin ilerlediği ortamın (hava) indeksine oranı da dikkat edilmesi gereken parametrelerdendir. Metallerdeki serbest elektronlar, sadece NIR değil VIS IR ışınlarını da yansıtan malzemelerdir (0,3-2,6 µm dalga boyu aralığındaki tüm güneş radyasyon bileşenleri) [23]. Kullanılması gereken minimum partikül miktarının belirlenmesine yönelik de çalışmalar yapılmış, alüminyum fosfat (AlPO₄) partikül boyutları, kütle oran (wt%) ve gramaj (mg/cm²) parametrelerinin kompozit bir kumaşın yayma ve yansıtma performansına etkileri UV-VIS ölçüleriyle incelenmiştir [24]. Kullanılan partikül boyutunun incelendiği bir çalışmada ise Al₂O₃ için 30 nm ve 200 nm'lik partiküllerden büyük çaplı olanın iyi bir soğutma etkisine karşın kumaşı büyük oranda sertleştirdiği tespit edilmiştir [23]. Metalik yapılar yansıtıcı yüzeylerde; saf metalik kumaşlar, metal/polimer kompozit kumaşlar ve metal kaplanmış kumaş formunda tasarlanabilirler [18]. Alüminyum film kaplı bir kumaş radyan ısı akısının % 80-90'ını yansıtır. Fakat bu tür uygulamalar her zaman tekstilde kullanılabilir formda değildir. Örneğin metal filmin PET kumaş yüzeyine magnetron sıçratma (sputtering) yöntemiyle kaplanması sonucu oluşan ve optik kontrol amaçlı kullanılan yapının kolay tutuşurluk, oksidasyon, sertlik, ağırlık, düşük rutubet geçirgenliği ve aşınıp yüzeyden uzaklaşma gibi dezavantajları mevcuttur [1]. Zirkonyum dioksit (ZrO₂) ve magnezyum oksit (MgO) partikülleri seramik tozları ve çapraz bağlayıcılar eşliğinde poliamid/pamuk kumaşa uygulanarak çöl ve orman ortamlarındaki NIR ve kısa dalga boylarındaki (SWIR) yansıtıcılık performansları incelenmiştir [21]. Kumaşın renginin de yansıtıcılık üzerindeki etkilerini incelemek için farklı boyutlardaki titanyum dioksit (TiO₂) nanopigmentleri boyanmış pamuklu kumaşlara bir çapraz bağlayıcı eşliğinde uygulanmış, yansıtıcılık, sıcaklık ve yıkama haslığı gibi performans özellikleri test edilmiştir [25]. Bu tür uygulamalarda, kumaş tutumu, geçirgenliği, yıkanabilirliği, kullanım performansı ile partikülün kimyasallarla etkileşimi ve toksisitesi de dikkate alınarak kullanılacak metal oranı ve formu konusunda bir optimizasyon gereklidir [18, 23].

2.2.2. Gözeneklerin/Hava boşluklarının etkisi (boşluklardan yansıtma)

Gözenekli malzemelerde bulunan hava boşlukları da diğer ısı transfer mekanizmaları üzerinde etkili olduğu gibi IR transferinin

özellikle yansıtma bileşeni üzerinde de etkilidir. Gözenekler, VIS ve NIR ışınlarını saçırma merkezi olarak görev yapar [26-28]. Örneğin, görülür ışık (VIS) dalga boyu (400-700 nm) ile karşılaştırılabilir boyutlarda 50-1000 nm çaplı birbirine bağlı gözeneklere sahip PE film, rezonans saçırma teorisine göre bu dalga boyu için opak özellik gösterirken, belirtilen gözenek çapı vücut radyasyon dalga boyuna göre oldukça düşük olduğu için vücutun MIR enerjisi için saydamdır ve geçişine izin verir. Doğal ipek lifindeki çok seviyeli ve heterojen gözenek yapısı buna örnek verilebilir; 50 µm kalınlığındaki bir ipek lifi gelen güneş radyasyonunun % 66'sını yansıtır. Bu özellik lifin MIR düzeyinde sahip olduğu yüksek yayıcılık (0,88) değeriyle de birleşince ipeğin soğutma etkisine büyük katkı sağlar [1]. Son yıllarda yapılan çoğu araştırmada oluşan bu rastgele dağılıma sahip nano/mikro gözeneklerin yüksek radyasyon yansıtıcılığını sağlayabilmesi için 10 µm'ye kadarlık bir gözenek çapı olması gerektiği modellenen çalışmalarla da kanıtlanmıştır [29-31]. Ayrıca, belirtilen mikro/nano gözenekli membranların üretiminde polimer olarak polietilen (PE) [32, 33], polimetilpenten [34], poliviniliden florür (PVDF) [31], polidimetilsiloksan (PDMS) [35] ve selüloz [23, 36, 37] gibi lineer polimerler kullanılmıştır. Benzer amaçlar için PE ve polietilen oksitten (PEO) gözenekli ve yüzey pürüzlerine/çatlaklarına (wrinkle) sahip lif çekilerek yapının kayda değer soğutucu etki (6,8 °C) oluşturabildiği belirtilmiştir [38]. PE lif formundaki gözenekli yapılar (parafin karışımı ile elde edilen), PE'in tutum, kırışma direnci, elektrostatik yüklenme gibi giyilebilirlik konusundaki kısıtlarının kısmen ortadan kalkmasını sağlamıştır [11]. Gözenek ve yansıtıcı partiküller birlikte düşünüldüğünde, çok katmanlı, altta yüksek yansıtıcılığa sahip partiküllerin rastgele dağılımda olduğu gözenekli meta malzemeler soğutucu yapılar için en uygun yapılarıdır [39].

2.2.3. IR saydamlığı (transparency) ve yayıcılığı (emissivity) artırma

Yapının saydamlık ve yayıcılığının artırılmasıyla soğutma etkisinin elde edilmesi hem iç hem de dış ortam koşulları için geçerli bir mekanizmadır. Vücut radyasyonunun geçiş yollarını tasarlayarak yazın yapının saydamlığının artırılmasıyla orta-IR (MIR) dalga boyunda (7-14 µm) ısının uzaklaştırıldığı soğutucu, kışın da radyasyonun olabildiğince korunduğu ısıtıcı giysiler tasarlanabilir. Farklı çalışmalarda birbirleri yerine de kullanılan ve birbiriyle doğru orantılı kavramlar olan yayıcılık ve saydamlık kavramları tanımlanacak olursa; yayıcılık (zıttı absorbtivite veya emicilik) malzemenin 8-13 µm dalga boylu (uzun dalga boylu IR/LWIR) atmosferik pencereden ısıyı uzaklaştırması, saydamlık ise malzemenin vücut radyasyon dalga boyundaki (7-14 µm) geçirgenliğidir. Dalga boylarının örtüşmesi nedeniyle malzemenin seçiciliği bu iki mekanizmayı ayıramaz fakat dış ortam şartlarında saydamlığı artırmaya yoğunlaşmak daha iyi sonuç verir. Geniş band yayıcı bir yapı tüm MIR spectrumunda bütün olarak yayıcılığa sahipken seçici band yayıcı yapının yayıcılığı yalnızca atmosferik saydamlık penceresi, yani atmosferin transparan olduğu bölge için geçerlidir, diğer dalga boyları için

sıfırdır [10]. Soğutucu etkiye sahip bir kumaşın 26,1 °C ortam sıcaklığı için minimum IR-saydamlığının 0,644 olması gerektiği teorik bir modelle hesaplanmıştır [1]. Bu sıcaklık, araştırmalarda ortam soğutma enerjisinden % 40'lık tasarruf sağlandığı belirlenen bir noktadır [4].

Tekstil materyallerinin IR geçirgenlik performansları incelendiğinde, pamuk, yün, poliester gibi geleneksel liflerin MIR bandındaki dalgalara karşı görünmez oldukları tespit edilmiştir. Kimyasal yapılarında C-O, C-N, S-O ve C-H bağları bazı titreşim modlarıyla birlikte bulunduğu için oluşan absorpsiyon pikleri vücut termal radyasyonu aynı bölgede yer aldığı için % 60'lık yansıtıcılık değerinin de etkisiyle [5] vücut radyasyonunu büyük oranda absorbe ederler [6]. Atmosfer penceresi aralığında spektral seçici (güneş ve vücut IR enerjilerine karşı farklı davranan) özelliğinden dolayı soğutucu yapılarda en fazla kullanılan ve yüksek IR saydamlığına sahip PE, soğutucu yapılarda nanogözenekli membran (nefes alma ve sıvı absorpsiyon özelliklerini iyileştirmek için hidrofilik işlem uygulaması) olarak tasarlanmıştır. PE, sahip olduğu alifatik C-C ve C-H bağlarına bağlı olarak vücudun IR radyasyon spektrumunun dışında dar absorpsiyon piklerine, dolayısıyla da MIR aralığındaki vücut IR enerjisinin iletilebileceği saydam bir yapıya sahiptir [1]. PE'nin film bazlı yapıların giyilebilirlik, boyanabilirlik geçirgenlik ve yumuşaklık konusundaki eksiklikleri tasarlanan ürünlerin ticarileşmesi önündeki önemli engellerdir [4]. PE'in giyilebilirliğinin artırılması amacıyla polietilen oksit (PEO) ile karıştırılmasıyla çekilen gözenekli ve pürüzlü yüzeye sahip filamentten dokunan kumaşın hafif, geçirgen, UV korumasına sahip ve yazlık giysiye uygun olduğu belirtilmiştir [38]. NanoPE'den çekilen mikroliflerin de kumaş formunda pamukla karşılaştırılabilir yumuşaklık ile giyilebilirliğinin iyileştirildiği belirtilmiştir [13]. Saydam özellikteki poliamid (PA) ile PA/PE nanolif esaslı membran, gözenekli PE lifi, PE/poliester (PET) kompozit kumaş, PA/pamuk//pamuk// PA/pamuk orta kısmı pamuktan oluşan çok katlı kumaş da giyilebilirlik açısından daha avantajlı diğer polimerlerdir [1, 19, 40]. Spektral seçiciliğe sahip bir diğer polimer PVDF, yapısındaki C-F bağlarının gerilme ve deforme edici titreşimlerinden kaynaklanan yüksek MIR yayma özelliği ile soğutma için ideal bir malzeme-dir [17, 19, 41-43]. Renkli tekstil yapılarının, geleneksel organik boya moleküllerinin vücut radyasyonunu büyük oranda absorbe etmesi nedeniyle açıklanan IR özelliklerine sahip olmaları ile ilgili problem, Cai vd. [46] tarafından boyama sırasında inorganik nanopartikül boyutunun kontrol edilmesiyle belirli oranda çözülmüştür (Mie resonance cevapları esas alınarak).

2.2.4. Farklı lif enine kesit şekilleriyle yansıtma

Bir lifin enine kesit şekli de gelen ışının optik kırılımını, dolayısıyla da parlaklığını ve diğer makro optik özelliklerini etkilediği için yansıtma performansı üzerinde etkilidir. Örneğin, üçgenel enine kesit, prizma etkisinden dolayı ışığın yayılmasına ve ipek parlaklığına neden olur [1]. IR geçirgenliğinde lif çapının etkisi de vurgulanmış, örneğin lif çapının 10'den 1'e, 100'den

30'e düşürülmesiyle yansıtıcılıkta önemli oranda azalma, MIR saydamlığında da artış gözlenmiştir [4].

Yukarıda açıklanan yöntemler ışığında, soğutucu yapıların tasarımında kullanılan; yansıtıcı partiküller de içerebilen mikro/nano gözenekli polimerik filmler/membranlar/nanolif yapıları, bu yapıların kumaşlara kaplanması veya laminasyonu ile elde edilen yapılar ve bu yapılardan üretilen filamentlerden elde edilen kumaşlarla ilgili çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

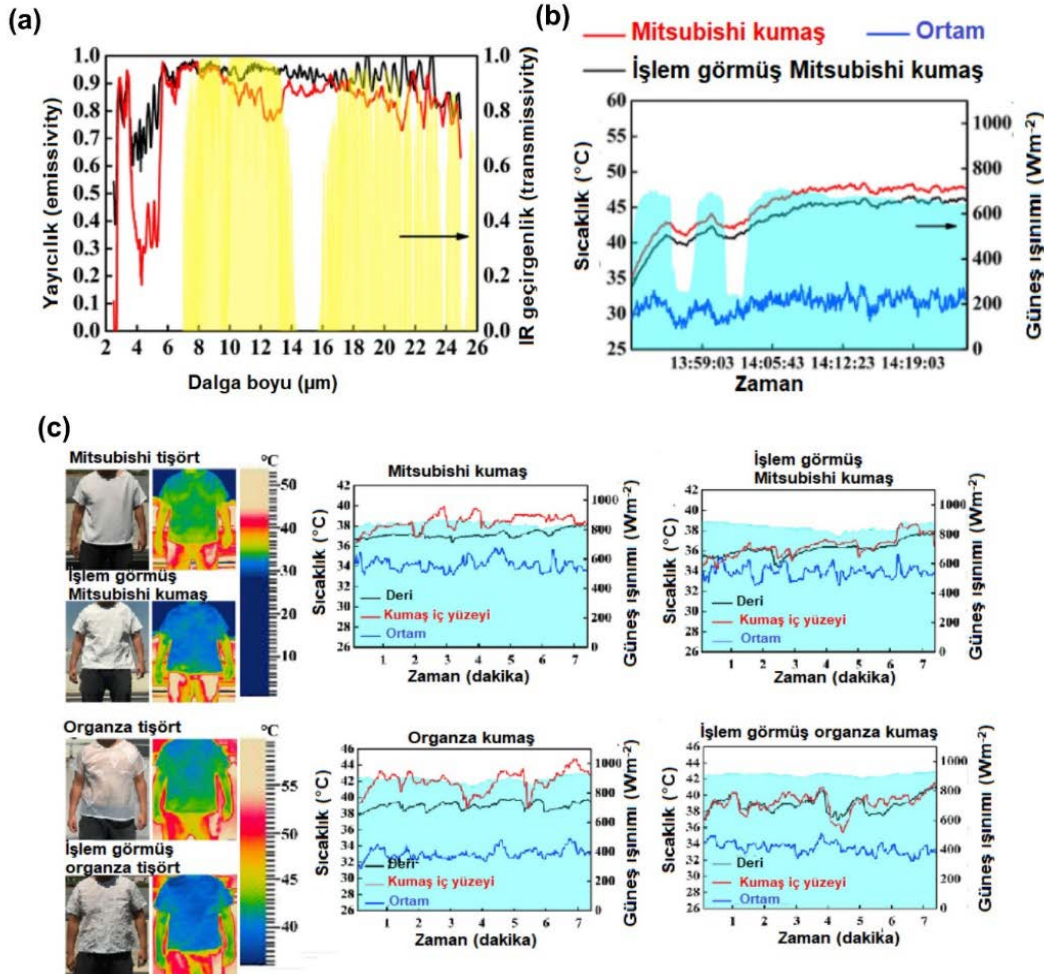
Gözenekli film/membran üretiminde elektron eğirme (electrospinning) yöntemi farklı partiküller eşliğinde soğutucu yapı üretiminde kullanılmış, hammadde olarak PA tek başına [44] ve SiO₂ partikülleri takviyesiyle [45] kullanılarak ıslak ve kuru el üzerinde ticari kumaşlara göre 0,4-1,7 °C soğutma etkisi [45], standart pamuk, keten kumaşlara göre 14,13-17,93 W/m²'lik ısı uzaklaştırma enerjisi [44] elde edilmiştir. SiO₂ takviyeli polivinilden florid/tetraetoksilan (PVDF/TEOS) nanolif yapısı ile atmosferik şeffaflık bandında 300 µm kalınlıkta yaklaşık % 97 yansıtma, >0,96 yayıcılık elde edilmiştir [17]. Song vd. [19] 'nanofotonik tekstil' olarak adlandırdıkları, ortada silikon nitrit içerikli PVDF (Si₃N₄/PVDF) (yayıcılık etkisi) ve her iki yüzeyde nanogözenekli PE'den (yansıtma etkisi) oluşan bir yapı tasarlayarak, % 87,31'lik yayıcılık değeriyle pamuk ve ketenle karşılaştırıldığında iç ortamda 3-3,5 °C, dış ortamda ise 7,7-10,8 °C'lik sıcaklık düşüşü elde etmişlerdir.

Farklı yöntemlerle de yansıtıcı partiküller varlığında nano/mikro gözenekli film/membran yapıları üretilmiştir. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi en yaygın kullanılan polimer PE'dir. Bu çalışmalardan birinde Cai vd. [2], PE'e ZnO takviyesiyle nanogözenekli (200 °C'de eriyik karıştırma) spektral seçiciliğe sahip nanokompozit bir film üretmişler, % 90'dan fazla yansıtma, normal pamuğa göre simüle edilmiş kuru ve ıslak deride sırasıyla 5-13 °C ve 8 °C'lik soğutma etkisi elde etmişlerdir. Cai vd. [46] daha sonra demir oksit (FeO₃), Prusya mavisi ve silikon gibi inorganik nanopartiküller katıldıkları ve canlı renklere sahip yapı ile % 80'lik saydamlık, 1,6 °C-1,8 °C'lik soğutma etkisi elde etmişlerdir. Bir diğer çalışmada, nano gözenekli ticari PE film-pamuk karşılaştırılması tişört formunda 18 kişi üzerinde yapılan giyim denemeleri ile yapılmış, dört farklı sıcaklıkta katılımcıların PE filmden yapılan tişörtle pamuğa göre daha düşük vücut ve önkol sıcaklık değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir [47]. Vanadyum oksit (VO₂) ve gümüşün (Ag) poliester yüzeye şeritler halinde uygulanmasıyla sıcak levha ortamında 13,9 °C'lik sıcaklık düşüşü elde edilmiş, yapının ayrıca sıcaklık duyarlılığı ve elektrik iletkenliğine sahip olduğu belirtilmiştir [18]. Partikül içermeyen bir diğer gözenekli benzosiklobüten esaslı polimerik soğutucu membran çalışmasında, hava boşluklarının MIR dalga boyunda vücuttan ısı iletimini % 28 oranında artırarak 1 °C civarında soğutma etkisi elde edilmiştir [48]. Gözenekliliğin faz ayırma yöntemiyle sağlandığı çalışmalarda su/etanol oran ayarısıyla selüloz asetat/SiO₂ kompozit filmler üretilmiş ve yaklaşık % 96'lık yansıtma gece ve gündüz için sırasıyla 8,6 °C ve 6,2 °C'lik soğutma etkisi elde edilmiştir [37]. Fen vd. [35] faz ayırma

yöntemiyle üç boyutlu PDMS/ZnO membranları, su varlığında üretilen yaklaşık % 96'lık yansıtıcılık, % 80'i aşan yayıcılığa bağlı olarak yaklaşık 7,5 °C soğutma performansı elde etmişlerdir. Polimer olarak poli(viniliden florür-ko-heksaflorop-ropen) (P(VdF-HFP))'in aseton/su varlığında çözülmesiyle gerçekleştirilen bir film çalışmasında [49] % 96'lık yansıtıcılık, % 97'lik yayıcılık, yaklaşık 6 °C'lik sıcaklık düşüşü elde edilmiştir.

Elde edilen soğutucu yapıların bir kumaşa kaplandığı çalışmalardan birinde [31], faz ayırma yöntemiyle aseton/su varlığında hazırlanan P(VdF-HFP) polimeri pamuklu dokuma kumaşlarda kaplama olarak kullanılmış, % 97'lik yansıtıcılık, 6,3 °C'lik soğutma performansı elde edilmiştir. Bir diğer çalışmada [30] poliester/pamuk kumaş P(VdF-HFP)/su/aseton karışımı ile kaplanmış, maksimum kalınlıkta % 90 yansıtıcılık, % 83 yayıcılık ile 10,8 °C'lik soğutma etkisi elde edilmiştir. Liu vd. [50] ultra yüksek moleküler ağırlıklı PE (UHMWPE)/ poliester/ UHMWPE nano gözenekli kompozit yapıyı termal olarak uyarılmış faz ayırma yöntemiyle üretmişler, belirli bir IR soğutma etkisine

karşın kayda değer sıcaklık düşüşü tespit edilememiştir. Soğutmanın yanında farklı fonksiyonların da hedeflendiği bir çalışmada Zhong vd. [24] dış ortam için süper hidrofobik/kir itici pasif soğutucu pamuklu kumaş için alüminyum fosfat (AlPO₄) partiküllerini, PDMS ile birlikte kullanmış, % 90'lık yansıtma, % 92'lik yayıcılık değerine sahip kaplama ile ham kumaşa göre sıcak levha ve güneş altında vücutta sırasıyla 5,4 °C ve 4,4 °C'lik sıcaklık düşüşleri elde edilmiştir. Wei vd. [23] selüloz asetat örme (Soalon/Mitsubishi) ve PET organza dokuma kumaşları Al₂O₃ içerikli selüloz asetat polimeri ile kaplayarak % 80,1 yansıtıcılık, işlem görmemiş kumaşa göre sıcak levhada 2,3-8 °C'lik, tişört formundaki gerçek uygulamada ise 0,6-1 °C'lik deri yüzeyi sıcaklık düşüşü elde etmişlerdir (Şekil 3). Özetlenen türdeki kumaş kaplama çalışmalarında genellikle kumaşların tutum, su iticilik ve su buharı geçirgenliği, yıkama haslılığı, mukavemet gibi konfor ve performans özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 3. Selüloz asetat örme (Mitsubishi) ve organza dokuma kumaşların IR yansıtma spektrumları (a), sıcak levha ile dış ortamda soğutma performansı ölçümü (b) ve gerçek uygulama soğutma performansı ölçümleri (c) [23]

Membran uygulamalarının kumaş özelliklerinde oluşturduğu dezavantajlar ve pasif soğutucu yapılarda kullanılan kimyasalların azaltılması amacıyla soğutucu yapının bitim işlemi olarak uygulandığı çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalardan birinde [51] suda çözünen ve boyama benzeri proseslerle uygulamanın çevresel avantajlarını vurgulayarak poli (vinilidenflorid-koheszaflorpropen) nanopartiküllerden ball-milling öğütmeli karıştırma yöntemiyle üniform mikro küreler üretmişler, partiküller arasında oluşan gözeneklerin % 94'lük yansıtıcılık, % 97'lik yayıcılık ile beyaz boya (TiO₂) ve ortam sıcaklığına göre sırasıyla 3,3 °C ve 1,7 °C'lik soğutucu etki elde etmişlerdir. Bir diğer bitim işlemi benzeri çalışmada [52], aynı zamanda süper hidrofobik ve UV korumasına da sahip olan pamuklu kumaşlar potasyum titan kristalit (whisker) içerikli PDMS uygulamasıyla elde edilmiş, % 83'lük yansıtma ve % 90'lık yayılım değerlerinin sonucu olarak sıcak levha ve güneş altında deri yüzeyinde sırasıyla 5,1 °C ve 3,1-4,7 °C'lik soğutma etkisi elde edilmiştir.

2.3. IR Kontrolü ile Isıtıcı Etkinin Elde Edilmesi

IR yönetimi ile kişisel ısıtıcı giysi sistemleri, soğutucu giysi sistemlerinin tersine vücudun radyasyon enerjisini bloklayarak/baskılayarak kontrol eden malzemelerdir [1, 6, 53, 54]. Kişisel soğutucu sistemlerde olduğu gibi ısıtıcı giysi sistemleri için de iç ve dış ortamlarda aktif olan radyasyon ısı iletim mekanizmaları farklıdır. İç ortam koşullarında; i) MIR spektrumunda vücut radyasyonunun deri yüzeyine yönlendirilmesi için giysinin iç yüzeyinin yansıtıcılığının artırılması, ii) kaybedilen ısıyı sınırlamak için giysinin ortama yakın dış yüzeyinde yayıcılığın azaltılması gereklidir [6]. Dış ortam koşullarında ise iç ortam koşulları için yukarıda belirtilen mekanizmalara ek olarak; i) güneşten gelen UV-VIS ve NIR dalga boyundaki ışınların absorpsiyonu, ii) insan vücudunun ihtiyaç duyduğu FIR dalga boyundaki ışınları yansıtma için giysinin iç katmanına gömülü kızılötesi seramik vb. parçacıkların kullanılması gereklidir [1]. Açıklanan mekanizmaların, biri veya kombinasyonları ile film/nanomembran lif, kumaş kaplama/bitim işlemi formlarında fotonik yapılar tasarlanmaktadır.

Genel olarak radyasyonla ısıtma teknolojileri için kullanılan dört mekanizma; örnekler ışığında aşağıda açıklanmıştır.

2.3.1 MIR ışınlarını yansıtma (reflectivity) oranını artırma

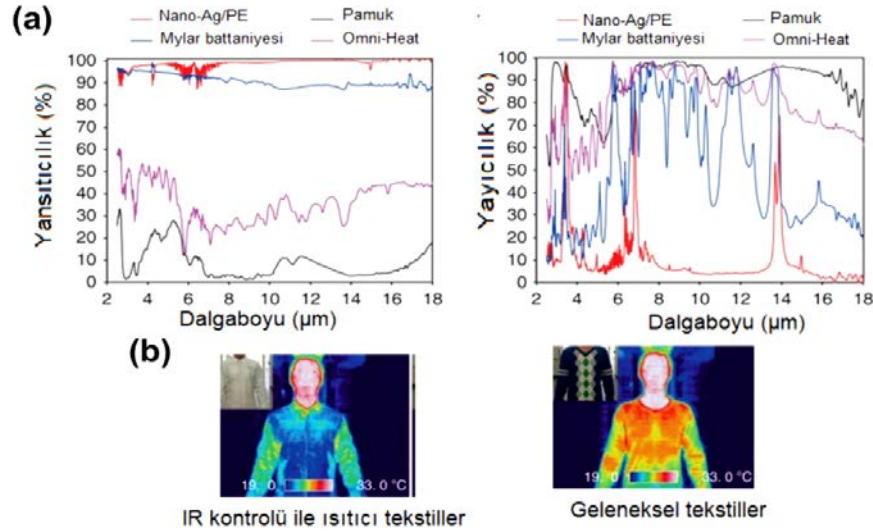
Önceki bölümde bahsedilen, radyasyonla ısıtma amacıyla kullanılan ilk mekanizma olan, giysinin iç tabakasında MIR bölgesinde IR yansıtıcılığının artırılması için giysi iç katmanının fiziksel ve kimyasal biriktirme yöntemleriyle metal bir film tabakası ile kaplanmasıyla MIR ve FIR bölgesinde radyasyon enerjisinin deri yüzeyine yönlendirilmesi gereklidir [1, 6, 53, 54]. Bahsedilen mekanizmayı kullanan bir çalışmada Hsu vd. [55] pamuklu kumaşların yüzeyini daldırarak kaplama yöntemiyle gümüş nanotellerle kaplamışlar, düşen radyasyon yayma oranına bağlı olarak kumaşın yalıtımının da arttığını, MIR bölgesinde vücut radyasyonunun % 95'inin yansıtılabildiğini tespit etmişlerdir.

Nanoteller arasındaki mesafenin (200-300 nm) vücut radyasyon dalga boyundan düşük olması nedeniyle kaplanmış yüzeyin yüksek yansıtıcılığa sahip sürekli bir metal film gibi görüldüğü, geleneksel iç mekan ısıtıcılarına kıyasla kişi başı 354,7 W enerji tasarrufu sağlandığı ortaya konulmuştur. Ticari ürün Mylar battanieresine göre daha yüksek hava ve su buharı geçirgenliğine sahip olduğu belirtilen yapıda pasif ısıtmaya ek olarak elde edilen Joule ısıtma fonksiyonu da elde edilmiştir. Bir diğer çalışmada [56], gümüş nanoteller pamuklu kumaş yüzeyine çapraz bağlanması amacıyla polidopamin ile kaplanmış, polidopamin/gümüş nanotel kaplanmış kumaşların % 86'lık vücut radyasyonu yansıtma oranı ile pasif ısıtma fonksiyonunun yanı sıra aktif ısıtma yeteneğine de sahip olduğu belirtilmiştir. Son yıllarda daha iyi konfor ve ısıtma performansına sahip gümüş nanotellerin yüksek maliyetleri nedeniyle benzer IR yansıtma özelliklerine sahip bakır, nikel ve alüminyum gibi nispeten daha ucuz nanoteller/partiküller, radyasyonla pasif ısıtma amaçlı yapı üretiminde kullanılabilmektedir. Bu noktadan hareketle Hazarika vd. [57], kevlar dokuma kumaş yüzeyini bakır-nikel nanotellerle kaplamış ve kaplanmamış kumaşa göre % 43 daha yüksek IR yansıtma oranı elde etmişlerdir. Bakır-nikel nanotellerle kaplanmanın dezavantajı, hazırlama süreçlerinin seri üretimi engelleyecek kadar karmaşık olmasıdır. Bu nedenle sonraki çalışmalarda araştırmacılar daha basit yöntemlerle lif/kumaş yüzeyini gümüş nanopartiküller [58], bakır partiküller [59] ile kaplayarak veya kumaş yüzeyinin bir tarafında gümüş ağısı yapısı oluşturarak [50] yüksek IR yansıtma oranları elde etmişlerdir. MIR ışınlarını yansıtma oranını artırarak ısıtma etkisi eldesinde alüminyum ve gümüşün Nomex®, pamuk, poliester ve cam liflerine kaplanmasıyla üretilen Omni-Heat® ve Mylar Battanieres gibi pasif ısıtma sağlayan ticari ürünler de mevcuttur [5].

2.3.2. MIR ışınları yayıcılık (emissivity) oranını azaltma

IR yönetimi ile kişisel ısıtıcı giysi sistemlerinde MIR yansıtma oranını artırma prensibi deri ile tekstil iç yüzeyi arasındaki ısı transferinde ısı iletiminin radyasyon üzerindeki baskınlığı nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Giysinin dış katmanında düşük IR yayıcılığıyla vücut radyasyon ısısının korunması prensibinde ise ısı radyasyonu, tekstil dış yüzeyi ile çevre arasındaki ısı transferinde daha baskın olduğu için nispeten daha yüksek yalıtım fonksiyonu elde edilebilir. Belirtilen prensiple pamuklu kumaş yüzeyine nano gözenekli PE/gümüş nanopartiküllerinden oluşan film lamine edilmiş, gümüş nanopartikülleri içermeyen PE film tabakasına göre minimum % 10,1'lik bir IR yayıcılığı ile ham kumaşa göre 7,1 °C'lik pasif ısıtma sağlamıştır (Şekil 4) [60]. Film formundaki bir diğer tasarımda ise MXene/nano gözenekli PE ile % 17,6'lık düşük yayıcılık ile pamuklu kumaşa göre 4,9 °C'lik bir ısıtma etkisi elde edilmiştir [61].

Önceki bölümlerde açıklanan iki mekanizma iç ve dış ortamların her ikisi için de geçerli iken aşağıda açıklanan iki mekanizma yalnızca dış ortam ısıtma fonksiyonu için geçerlidir.



Şekil 4. Nano-Ag/PE'in metalik kaplanmış yüzeyi, pamuk ve Mylar battaniye ve Omni-Heat ticari ürünlerin ölçülen toplam IR yansıtma ve yayıcılık oranları (a) IR kontrolü ile ısıtıcı tekstiller ve geleneksel tekstillerin termal görüntüleri (b) [60]

2.3.3. NIR ışınları absorpsiyon (absorption) oranının artırılması

Dış ortam ısıtması için dikkate alınması gereken mekanizmalardan ilki güneşten gelen radyasyon enerjisinin büyük kısmını (yaklaşık % 95) oluşturan UV-VIS ve NIR bölgesindeki dalga boylarındaki ışınların absorpsiyonu ve ısı enerjisine dönüştürülmesidir [1]. Son yıllarda, güneş enerjisinden etkin bir şekilde faydalanmak için grafen [62], metalik reflektörler [63, 64], seramik, foton frekansı eşleştirme özelliklerinden dolayı metaller [65-68], metal oksitler [69], plasmonik nano yapılar [70, 71] ve fotonik kristal nano boşluklara sahip iki boyutlu materyaller [72-75], zirkonyum karbür, MXene gibi metal karbürler [76-81], metal sülfürler [82-85] ve konjuge polimer malzemeler [86-89] gibi malzemelerin NIR emilimini artırdığı tespit edilmiştir. Konuyla ilgili doğadan da ilham alınmış, kutup ayısı kürkünün radyasyon kontrolü fonksiyonundan [90-92] yola çıkılarak geliştirilen biyomimik fototermal dönüşüm mekanizmasına sahip kaplama [93, 94] veya lif [92, 95, 96] eldesine yönelik çalışmalar da yapılmıştır. Gözenekli PE filmin yüzeylerinin kayıplı germanyum (Ge) ve altınla (Au) kaplanması ile elde edilen renkli nanofotonik yapıları tekstil malzemesi [97], Ge tabakasının geniş bant güneş absorpsiyonu (maks. ~% 50) ve yüksek oranda yansıtıcı Au kaplamadan gelen düşük MIR radyasyonu sayesinde siyah pamuklu kumaşa göre iç ve dış ortamlarda sırasıyla 3,8 °C ve 6,3 °C'lik ısıtma etkisi oluşturmuştur.

UV-VIS-NIR fototermal dönüşüm mekanizması ile ısıtıcı tekstil yapılarının geliştirilmesinde; bahsedilen partiküller kumaş kaplama veya lif içerisine gömme formunda kullanılmıştır.

2.3.4. FIR radyasyon ısıtma mekanizması

İnsan vücudu tarafından absorbe edildiğinde sıcaklık hissi veren 200 µm'nin altındaki dalga boylarında yer alan FIR ışınları [1] güneş veya insan vücudundan yayılan radyasyon enerjisinin 8-12

µm dalga boyu aralığında dönüştürülmesiyle oluşur [98-100] ve dönüştürülen enerji vücuda yansıtılarak ısıtma etkisi elde edilir. FIR radyasyon ısıtma mekanizmasını kullanarak geliştirilen ısıtıcı tekstil yapıları; FIR dalga boyundaki ışınları yaymak için giysi iç katmanının MgO₂ [101], TiO₂ [102-104], SiO₂ [105-107], Al₂O₃ [108, 109], zirkonyum oksit (ZrO₂) [110, 111], zirkonyum karbür (ZrC) [112-115], ZnO [116], karbon nanotüp [117] vb. infrared parçacıklarla spreyleme, laminasyon ve daldırma vb. yöntemlerle kaplanması veya parçacık içerikli lif çekimi ile üretilmektedir. Ayrıca, üçgen formundaki lif kesitinin kumaş yapısında herhangi bir yardımcı malzemeye ihtiyaç duymadan FIR mekanizması ile ısıtma fonksiyonu eldesi sağladığı ortaya konulmuştur [118]. FIR radyasyon ısıtma mekanizmasına sahip bu malzemeler, insan vücudu ile yakın temas halindeki çarşaf, şilte, termal terapi ve tedavi amaçlı giysiler, soğuktan koruyucu giysiler gibi tekstil malzemelerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır [113-115, 119-122].

2.4. IR Kontrolü ile Soğutucu-Isıtıcı Çift Modlu Tekstiller

Çalışmanın önceki kısımlarında da anlatıldığı üzere malzemelerin IR geçirgenlik, yayıcılık ve yansıtma özellikleri ayarlanarak/geliştirilerek soğutucu veya ısıtıcı tekstil malzemeleri elde edilebilmektedir. Bununla birlikte soğutma ve ısıtma modları için gerekli IR radyasyon parametrelerinin tekstil malzemelerinin ısı transfer yeteneklerini engellemesi ve son yıllarda çevresel değişimlere göre termal yönetim yapabilen malzemelere talebin artması nedeniyle hem ısıtma hem de soğutma fonksiyonuna sahip yapıların üretimine ihtiyaç duyulmaktadır [54]. IR radyasyon kontrolü ile soğutucu-ısıtıcı çift fonksiyonlu tekstiller; ısı transfer hızını ortam/vücut koşullarına göre değiştirebilme mekanizmasına sahip malzemelerdir [6, 54]. Çift fonksiyonlu tekstillerin geliştirilmesi için araştırmacılar tarafından kullanılan mekanizma/yöntemler; örnekler ışığında sonraki bölümlerde açıklanmıştır.

2.4.1. MIR ışınları yayıcılık (emissivity) oranını statik olarak ayarlama

Asimetrik MIR yayıcılık oranına (yüksek ve düşük MIR yayıcılık oranı) sahip çift katmanlı film/kaplama malzemelerinin kumaş yüzeyine entegre edilmesi ile elde edilen soğutucu-ısıtıcı tekstiller, yapının iç ve dış yönlerinin çevrilmesi ile soğutma ve ısıtma fonksiyonları arasında kolaylıkla geçiş yapabilmektedir [6, 54]. Belirtilen mekanizmaya dayanarak Hsu vd. [123], nanogözenekli PE filminin her iki yüzünü sırasıyla yüksek MIR yayıcılık oranına (0,9) sahip karbon (3,1 °C soğutma), ve düşük MIR yayıcılık oranına (0,3) sahip bakır (3,4 °C ısıtma) ile kaplayarak yüzey MIR yayıcılık ve sıcaklığını değiştirebilen tekstil malzemesi tasarlamışlardır. Kumaş ile ortam sıcaklığının 16 °C-25 °C arasında değişimiyle vücutta 32 °C-36 °C arası-daki termal konfor bölgesi sağlanabilmektedir. Diğer bir çalışmada ise [124], selüloz/katmanlı sandviç yapılu çift hidroksit lifli membranın (IR yayıcılıkla soğutma) bakır ve manganaz oksit (MnO₂) kaplandığı (vücut IR yansıtıcılığı ile ısıtma) ters çevrilebilir yapı tasarlanmıştır. Benzer şekilde Gu vd. [125]'nin pamuklu kumaş yüzeyinin sırasıyla MnO₂ nanoteller, MnO₂/selüloz süspansiyon ve gümüş nanopartiküllerle kaplanması sonucu elde ettikleri selüloz kompozit membranlarda da aynı mekanizma ile ısıtma-soğutma etkisi elde edilmiştir.

2.4.2. MIR ışınları yayıcılık (emissivity) oranını dinamik olarak ayarlama

Daha önceki bölümde anlatılan ısıtıcı-soğutucu çift modlu tekstil yapıları statik şartlarda etkin olup vücut ve çevresel koşullarının dinamik değişimine adapte olamamaktadır. Son yıllarda kişisel termal konforu sağlamaya ve enerji tasarrufuna yönelik yapılan çalışmalarda, sahra karıncalarının sahip olduğu üçgen kesitli tüylerden esinlenilerek optik özelliklerini değiştirebilen dinamik ısıtma-soğutma fonksiyonuna sahip tekstil malzemeleri geliştirilmiştir [10, 126-129]. Belirtilen fonksiyonun temel prensibi, vücut-çevre arasındaki elektromanyetik etkileşimlerin kontrol edilmesidir [6, 130]. Belirtilen prensibe dayanarak Zhu vd. [131] triasetat-selüloz biyomorf lif yüzeyini karbon nanotüp ile kaplayarak elektromanyetik dalga etkileşimlerine bağlı MIR yayıcılık oranını dinamik olarak düzenleyebilen örme kumaş yapısı geliştirmişlerdir. Kumaş yapısında neme duyarlı triasetat-selüloz biyomorf liflerinin kullanımı ile, sıcak veya nemli ortamda şişme ve gevşeme, soğuk ve kuru ortamda ise sıkı lif yapısı nedeniyle lif/iplikler arası mesafe azaltılıp artırılarak elektromanyetik rezonans eşleşmesi oluşturulmuştur. Sonuçta da sıcak ve soğuk durumlar için kumaşın radyasyon yayıcılık oranı MIR bölgesinde artırılarak ve azaltılarak soğutma ve ısıtma etkileri elde edilmiştir.

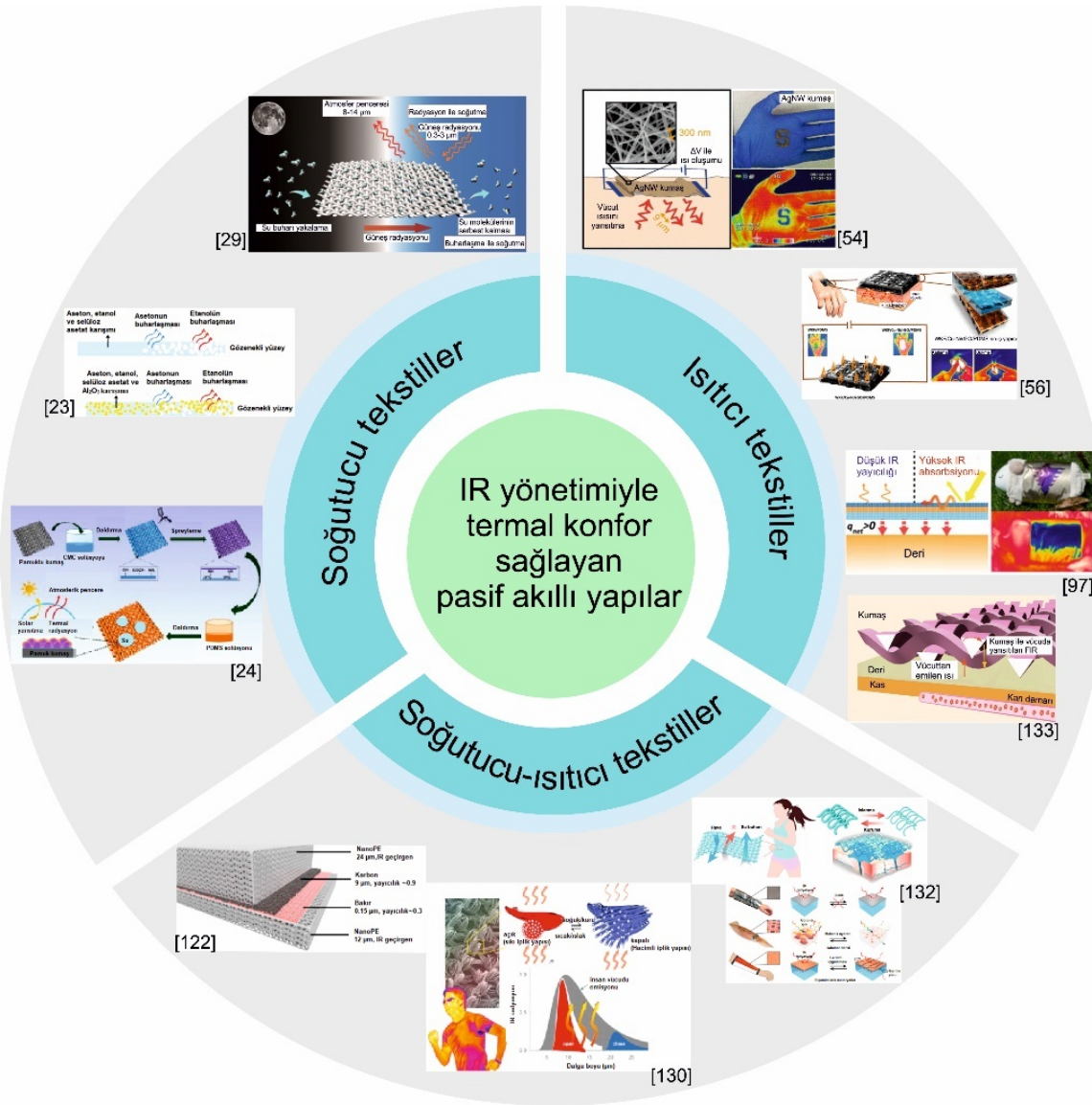
2.4.3. MIR ışınları geçirgenlik (transmittance) oranını dinamik ayarlama

MIR ışınları geçirgenlik (transmittance) oranının ortam ve vücut koşullarına bağlı dinamik düzenlenmesi için [132] deri bağlı nem oranına bağlı IR geçirgenliğini dinamik olarak ayarlayabilen, vücutla temas eden iç kısmında hidrofobik PET, dış kısımda ise hidrofilik ipliklerden oluşan örme kumaş geliştirmişlerdir. Sıvı transferinin yönetilmesinde de kullanılan yapı sayesinde iç katmanın transfer ettiği teri absorbe etmesiyle kumaş yapısı gevşek formdan daha sıkı bir forma dönüşerek kumaş yüzeyinin IR yayıcılık oranı artmış ve buna bağlı olarak soğutma, tersi durumdaki IR yayıcılığı düşük gevşek ve hacimli kumaş ile de ısıtma etkisi elde edilmiştir. Ayrıca son yıllarda araştırmacılar, kalamar, mürekkep balığı ve ahtapot derisinin dinamik renk değişim mekanizmasından esinlenerek dinamik IR yayıcılık özelliği ile kişisel termal konfor sağlayan malzemeler geliştirmişlerdir. Leung vd. [133] kalamar derisinden esinlenerek şeffaf ve elastomerik polimer matrise gömülü bakır nanoyapılardan oluşan ve mekanik etki ile farklı gerilim oranlarında rengi ve IR yayıcılığı, dolayısıyla ısı iletim oranı dinamik olarak değişen kompozit tekstil malzemesi geliştirmişlerdir. Tasarlanan malzeme, % 25 oranında IR yayıcılığı değişimine, uygulanan mekanik kuvvet ile ~36 W/m² ısı akışı ve ~8 °C'lik dinamik sıcaklık ayarlama fonksiyonuna sahiptir. Belirtilen değerler, metabolik ısı akışının dörtte birini oluşturduğu gibi vücut sıcaklığındaki bölgesel değişiklikleri de büyük oranda tamponlayabilmektedir. Bu bölüme kadar açıklanan ısıtıcı, soğutucu ve çift modlu ısıtıcı-soğutucu yapılar, Şekil 5'te özetlenmiştir.

3. RADYASYON ENERJİ YÖNETİMİYLE SAĞLANAN TERMAL YÖNETİM (ISITMA/SOĞUTMA) ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Termal yönetim giysileriyle ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde sürdürülürken ısıtma-soğutma ölçüm metodları henüz standardize edilmemiştir. Mevcut metodlar, indirekt ve direkt olarak ikiye ayrılır. İndirekt yöntemlerde işlem uygulanan kumaşın IR yansıtıcılık, geçirgenlik ve yayıcılık, direnç ve radyan güç gibi fiziksel parametreleri ölçülürken direkt yöntemlerde deri yüzey ve mikroklima sıcaklıkları; IR lamba varlığında sıcak levha, mankenler ve giyim denemeleriyle belirlenmiştir.

İndirekt ölçümler kapsamındaki optik özellikler için 0,2 -20 µm dalga boyu aralığında MIR için FT-IR, görünürden NIR spektrumuna kadarki dalga boyları için ise UV-VIS Spektrofotometre ölçümleri kullanılır. Bu cihazlarda yansıtma, yayıcılık gibi parametrelerin ölçümü sırasında bir küre, aynasal ve açılal yansıtma ölçümleri için ise elipsometre ve açılal yansıtıcı ekipmanlar eşliğinde ölçüm yapılır [39]. Geliştirilen ölçüm metodları, ısı transferiyle ilgili çok sayıda parametre içerisinde yalnızca birini ölçtüğü için sonuçlar bazı durumlarda gerçek hayatı yansıtmamaktadır: örneğin kumaşın IR geçirgenliğinin düşük olması, yüksek yansıtıcılığa sahip olduğu anlamına gelmez. Kumaş yüksek IR absorpsiyon ve yayıcılığa (IR yayıcılık absorpsiyona eşittir) bağlı olarak ısıyı vücuda ileterek aynı şekilde ekstra sıcaklık artışına neden olabilir [5].



Şekil 5. IR yönetimiyle kişisel termal konfor sağlayan yapılar

IR lamba ve sıcak levha yöntemlerinde termometreler, termokuplar ve en uygun metod olarak IR kameralarla sıcaklık ölçümleri yapılır [5]. Deri modeli olarak da adlandırılan sıcak levha sistemleriyle güneş altında yapılan ölçümlerde genellikle sistem şeffaf bir korumayla çevrelenir. Deri yüzeyinin güneşte ve gölgede aynı sıcaklıkta tutulmasıyla üretilen filmlerin soğutma performansları genellikle pamuklu kumaş ile karşılaştırılmaktadır. Bu ölçümler güneş IR enerji ölçümleri eşliğinde, rüzgâr hızı da dikkate alınarak nefes alabilir deri yüzeyinin bir ısıtıcıyla gerçek deri sıcaklığına sabitlenmesiyle gerçekleştirilir [2, 9, 18, 38]. Sıcak levha sistemleriyle ölçülen radyasyon gücü değerleri de diğer ısı transfer bileşenleri dikkate alınmadığı için gerçeği tam olarak yansıtamazlar ve ölçüm noktasına bağlı olarak önemli oranda varyasyon içerirler. Bu ölçümler sırasında mikroklimanın sıcaklık ve bağıl nemi de farklı kumaşların karşılaştırılmasında

etkili parametrelerdir. Direkt metotlarla, kumaş veya denemeler sırasında vücut üzerinden sıcaklık dağılımı tespit edildiği için kumaş veya giysinin performansı doğru bir şekilde belirlenebilir [5]. Sıcak levha, manken ve giyim denemeleri gibi direkt metotlar için diğer ısı transfer bileşenlerinin belirlenmesinde geçerli olan yüksek varyasyon, maliyet, subjektif değerlendirmelerdeki tekrarlanabilirlik kısıtları geçerlidir. Yukarıda açıklanan gerekçelere dayalı olarak günümüze kadar tüm ısı transfer mekanizmalarını dikkate alarak kapsamlı bir şekilde termal yönetim giysilerinin performansını belirleyebilen bir ölçüm yöntemi geliştirilememiştir. Termal yönetimle birlikte kazandırılan ısı iticilik, elektrik iletkenliği vb. fonksiyonlar ve giyilebilirlikle ilgili tutum, nefes alabilirlik, hidrofilite ve sıvı transfer özellikleri için de mevcut standart ölçüm metotları kullanılmaktadır.

4. SONUÇ VE GELECEK BEKLENTİLERİ

Bu çalışmada, artan konfor beklentilerine yönelik, doğal radyasyon enerjilerinin yönetimiyle kişisel termal konfor sağlayan, yani vücudu ısıtan, soğutan veya aynı yapı ile ısıtma ve soğutmanın pasif veya aktif olarak gerçekleştirilebildiği yapılar güncel literatür ışığında incelenmiştir. Yöntem ve farklı formlarda tasarlanan yapıların açıklanması öncesinde, radyasyon enerji bileşenleri ve mekanizmaları, ayrıca kullanılan ölçüm yöntemleri, belirtilen yöntem ve ürünlerin enerji tasarrufu açısından sağladığı avantajları özetlenmiştir.

Genel olarak konu hakkında dünyadaki bilimsel durum değerlendirildiğinde, çalışmaların radyasyonla iç ortamlarda kişisel soğutma konusunda yoğunlaştığı, dış ortamda geçerli olan karmaşık mekanizmaların tasarım ve ölçümleri zorlaştırdığı belirtilebilir. Tekstil endüstrisinde, özellikle sportif ve koruyucu giysi üreticilerinin organik ve inorganik partikül ve meta malzeme içerikli lif ve kumaş geliştirilmesi çalışmalarından yararlanabilmesi için de, geliştirilen pasif akıllı kumaşların nefes alabilirlik, eğilme direnci, sıvı absorpsiyon ve transferi, kullanılan partiküllerin toksitesi ve ağırlık gibi tutum, konfor, performans ve güvenlik parametrelerinin göz önünde bulundurulması gereklidir. Yapıların tasarımında dikkate alınması gereken diğer konular ise üretim ve kullanım esnasındaki hammadde maliyetleri, çevre zararları, kullanılan miktarlar ile proseslerin karmaşıklığı ve enerji maliyetleridir. Ayrıca, vücut-giysi-çevre sistemindeki ısı transferinin radyasyon bileşeninin yönetimi aşamasında, diğer ısı transfer mekanizmaları olan iletim, taşınım ve buharlaşma ile terin buhar ve sıvı formunda transferi ile meydana gelen birleşik ısı ve kütle transfer mekanizmalarının bir bütün olarak ele alınması da ürünlerin gerçek hayat performanslarının belirlenmesi açısından önemlidir. Isıtma ve soğutma performanslarının ölçümü için olabildiğince gerçeği simüle eden indirekt ve direkt ölçüm metodlarının geliştirilmesi de bir diğer üzerinde durulması gereken konudur. Mevcut bilimsel test altyapısının, diğer akıllı yapılar için olduğu gibi, bu çalışmada özetlenen pasif akıllı fotonik kumaş/giysiler için de modifiye edilmesi, birleştirilmesi veya yeni metodların eklenmesi gerektiği düşünülmektedir. Bir ileri adım olarak, yapıların pasif akıllı kategoriden, farklı kumaş özellikleri tarafından (termomekanik, vb.) uyarılarak veya farklı akıllı tekstil yapısı üretim metodlarıyla kombine edilerek aktif akıllı kategoriye geçebilmesi için de çalışmalara ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu derleme çalışmasının bu konuda çalışan bilim insanları ve sektör temsilcilerine yön gösterecek, yeni fikirler oluşturacak şekilde katkı sağlaması amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Zhu, F. L., Feng, Q. Q. (2021). *Recent Advances in Textile Materials for Personal Radiative Thermal Management in Indoor and Outdoor Environments*, International Journal of Thermal Sciences, 165, 106899, 1-14.
- Cai, L., Song, A. Y., Li, W., Hsu, P. C., Lin, D., Catrysse, P. B., Lu, Y., Peng, Y., Chen, J., Wang, H., Xu, J., Yang, A., Fan, S., Cui, Y. (2018). *Spectrally Selective Nanocomposite Textile for Outdoor Personal Cooling*, Advanced Materials, 30, 1802152, 1-7.
- Tabor, J., Chatterjee, K., Ghosh, T. K. (2020). *Smart Textile - Based Personal Thermal Comfort Systems: Current Status and Potential Solutions*, Advanced Materials Technologies, 5(5), 1901155, 2-40.
- Tong, J. K., Huang, X., Boriskina, S. V., Loomis, J., Xu, Y., Chen, G. (2015). *Infrared-Transparent Visible-Opaque Fabrics for Wearable Personal Thermal Management*, ACS Photonics, 2, 769-778.
- Peng, L., Su, B., Yu, A., Jiang, X. (2019). *Review of Clothing for Thermal Management with Advanced Materials*, Cellulose, 26, 6415-6448.
- Lan, X., Wang, Y., Peng, J., Si, Y., Ren, J., Ding, B., Li, B. (2021). *Designing Heat Transfer Pathways for Advanced Thermoregulatory Textiles*, Materials Today Physics, 17, 100342, 3-28.
- Hu, R., Liu, Y., Shin, S., Huang, S., Ren, X., Shu, W., Ceng, J., Tao, G., Xu, W., Luo, X. (2020). *Emerging Materials and Strategies for Personal Thermal Management*, Advanced Energy Materials, 10, 1903921,4-23.
- Chatterjee, K., Ghosh, T. K. (2021). *Thermoelectric Materials for Textile Applications*, Molecules, 26, 3154, 1-27.
- Luo, H., Zhu, Y., Xu, Z., Hong, Y., Ghosh, P., Kaur, S., Wu, M., Yang, C., Qui, M., Li, Q. (2021). *Outdoor Personal Thermal Management with Simultaneous Electricity Generation*, Nano Letters, 21(9), 3879-3886.
- Zhai, H., Fan, D., Li, Q. (2022). *Dynamic Radiation Regulations for Thermal Comfort*, Nano Energy, 107435, 1-32.
- Pakdel, E., Naebe, M., Sun, L., Wang, X. (2019). *Advanced Functional Fibrous Materials for Enhanced Thermoregulating Performance*, ACS Applied Materials & Interfaces, 11, 13039-13057.
- Farooq, A. S., Zhang, P. (2021). *Fundamentals, Materials and Strategies for Personal Thermal Management by Next-Generation Textiles*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 142, 106249, 1-16.
- Habibi, P., Moradi, G., Moradi, A., Golbabaie, F. (2021). *A review on Advanced Functional Photonic Fabric for Enhanced Thermoregulating Performance*, Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 16, 100504, 1-10.
- Tong, J. K., Huang, X., Boriskina, S. V., Loomis, J., Xu, Y., Chen, G. (2015). *Infrared-Transparent Visible-Opaque Fabrics for Wearable Personal Thermal Management*, ACS Photonics, 2, 769-778.
- Peng, L., Su, B., Yu, A., Jiang, X. (2019). *Review of Clothing for Thermal Management with Advanced Materials*, Cellulose, 26, 6415-6448.
- Yu, X., Chan, J., Chen, C. (2021). *Review of Radiative Cooling Materials: Performance Evaluation and Design Approaches*, Nano Energy, 106259, 1-24.
- Wang, X., Liu, X., Li, Z., Zhang, H., Yang, Z., Zhou, H., Fan, T. (2020). *Scalable Flexible Hybrid Membranes with Photonic Structures for Daytime Radiative Cooling*, Advanced Functional Materials, 30, 1907562, 1-9.
- Peng, L., Fan, W., Li, D., Wang, S., Liu, Z., Yu, A., Jiang, X. (2020). *Smart Thermal Management Textiles with Anisotropic and Thermoresponsive Electrical Conductivity*, Advanced Materials Technologies, 5(1), 1900599, 1-9.

19. Song, Y. N., Lei, M. Q., Deng, L. F., Lei, J., Li, Z. M. (2020). *Hybrid Metamaterial Textiles for Passive Personal Cooling Indoors and Outdoors*, ACS Applied Polymer Materials, 2, 4379-4386.
20. Jing, W., Zhang, S., Zhang, W., Chen, Z., Zhang, C., Wu, D., Gao, Y., Zhu, H. (2021). *Scalable and Flexible Electrospun Film for Daytime Subambient Radiative Cooling*, ACS Applied Materials & Interfaces, 13(25), 29558-29566.
21. Siadat, S. A., Mokhtari, J. (2021). *Influence of Ceramic Nano-Powders and Cross-Linker on Diffuse Reflectance Behavior of Printed Cotton/Nylon Blend Fabrics in Near Infrared and Short-Wave Infrared Spectral Ranges*, The Journal of The Textile Institute, 112(7), 1108-1119.
22. Miao, D., Li, A., Jiang, S., Shang, S. (2015). *Fabrication of Ag and AZO/Ag/AZO Ceramic Films on Cotton Fabrics for Solar Control*, Ceramics International, 41(5), 6312-6317.
23. Wei, W., Zhu, Y., Li, Q., Cheng, Z., Yao, Y., Zhao, Q., Zhang, P., Liu, X., Chen, Z., Xu, F., Gao, Y. (2020). *An Al₂O₃-Cellulose Acetate-Coated Textile for Human Body Cooling*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 211, 110525, 1-7.
24. Zhong, S., Yi, L., Zhang, J., Xu, T., Xu, L., Zhang, X., Zuo, T., Cai, Y. (2021). *Self-Cleaning and Spectrally Selective Coating on Cotton Fabric for Passive Daytime Radiative Cooling*, Chemical Engineering Journal, 407, 127104, 1-11.
25. Shams-Nateri, A., Kazemian, S., Piri, N. (2020). *Nano-TiO₂ Coated Cotton Fabrics with Temperature Regulating Properties*, The Journal of The Textile Institute, 111(8), 1223-1230.
26. Zhong, H., Zhang, P., Li, Y., Yang, X., Zhao, Y., Wang, Z. (2020). *Highly Solar-Reflective Structures for Daytime Radiative Cooling under High Humidity*, ACS Applied Materials & Interfaces, 46, 51409-51417.
27. Zhang, J., Zhou, Z., Quan, J., Zhang, D., Sui, J., Yu, J., Liu, J. (2021). *A Flexible Film to Block Solar Radiation for Daytime Radiative Cooling*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 225, 111029, 1-12.
28. Zhou, K., Li, W., Patel, B. B., Tao, R., Chang, Y., Fan, S., Cai, L. (2021). *Three-Dimensional Printable Nanoporous Polymer Matrix Composites for Daytime Radiative Cooling*, Nano Letters, 3, 1493-1499.
29. Li, D., Liu, X., Li, W., Lin, Z., Zhu, B., Li, Z., Zhu, J. (2021). *Scalable and Hierarchically Designed Polymer Film as a Selective Thermal Emitter for High-Performance All-Day Radiative Cooling*, Nature Nanotechnology, 2, 153-158.
30. Sun, Y., Ji, Y., Javed, M., Li, X., Fan, Z., Wang, Y., Xu, B. (2022). *Preparation of Passive Daytime Cooling Fabric with the Synergistic Effect of Radiative Cooling and Evaporative Cooling*, Advanced Materials Technologies, 3, 2100803, 1-8.
31. Qi, M., Wang, Y., Chang, G., Li, R. (2022). *Energy-Saving Cooling Coated Fabric with Robust Solar Reflection and Water Repellent Properties*, Fibers and Polymers, 1-7.
32. Hsu, P. C., Li, X. (2020). *Photon-Engineered Radiative Cooling Textiles*, Science, 370(6518), 784-785.
33. Fang, B., Wang, Z., Gao, S., Zhu, S., Li, T. (2021). *Manipulating Guided Wave Radiation with Integrated Geometric Metasurface*, Nanophotonics, 11(9), 1923-1930.
34. Feng, J., Santamouris, M., Gao, K. (2020). *The Radiative Cooling Efficiency of Silica Sphere Embedded Polymethylpentene (TPX) Systems*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 215, 110671, 1-12.
35. Chen, M., Pang, D., Mandal, J., Chen, X., Yan, H., He, Y., Yu, N., Yang, Y. (2021). *Designing Mesoporous Photonic Structures for High-Performance Passive Daytime Radiative Cooling*, Nano Letters, 21(3), 1412-1418.
36. Xiang, B., Zhang, R., Luo, Y., Zhang, S., Xu, L., Min, H., Meng, X. (2021). *3D Porous Polymer Film with Designed Pore Architecture and Auto-Deposited SiO₂ for Highly Efficient Passive Radiative Cooling*, Nano Energy, 81, 105600, 1-29.
37. Song, Y. N., Lei, M. Q., Lei, J., Li, Z. M. (2020). *A Scalable Hybrid Fiber and its Textile with Pore and Wrinkle Structures for Passive Personal Cooling*, Advanced Materials Technologies, 5(7), 2000287, 1-9.
38. Bijarniya, J. P., Sarkar, J., Maiti, P. (2020). *Review on Passive Daytime Radiative Cooling: Fundamentals, Recent Researches, Challenges and Opportunities*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133, 110263, 1-11.
39. Catrysse, P. B., Song, A. Y., Fan, S. (2016). *Photonic Structure Textile Design for Localized Thermal Cooling Based on a Fiber Blending Scheme*, ACS Photonics, 3, 2420-2426.
40. Aili, A., Wei, Z. Y., Chen, Y. Z., Zhao, D. L., Yang, R. G., Yin, X. B. (2019). *Selection of Polymers with Functional Groups for Daytime Radiative Cooling*, Materials Today Physics, 10, 100127, 1-5.
41. Jing, W., Zhang, S., Zhang, W., Chen, Z., Zhang, C., Wu, D., Gao, Y., Zhu, H. (2021). *Scalable and Flexible Electrospun Film for Daytime Subambient Radiative Cooling*, ACS Applied Materials & Interfaces, 13(25), 29558-29566.
42. Yu, X., Chan, J., Chen, C. (2021). *Review of Radiative Cooling Materials: Performance Evaluation and Design Approaches*, Nano Energy, 88, 106259, 1-24.
43. Song, Y. N., Ma, R. J., Xu, L., Huang, H. D., Yan, D. X., Xu, J. Z., Zhong, G. J., Lei, J., Li, Z. M. (2018). *Wearable Polyethylene/Polyamide Composite Fabric for Passive Human Body Cooling*, ACS Applied Materials & Interfaces, 10, 41637-41644, 1-8.
44. Xiao, R., Hou, C., Yang, W., Su, Y., Li, Y., Zhang, Q., Gao, P., Wang, H. (2019). *Infrared-Radiation-Enhanced Nanofiber Membrane for Sky Radiative Cooling of the Human Body*, ACS Applied Materials & Interfaces, 11, 44673-44681.
45. Cai, L., Peng, Y., Xu, J., Zhou, C., Zhou, C., Wu, P., Lin, D., Fan, S., Cui, Y. (2019). *Temperature Regulation in Colored Infrared-Transparent Polyethylene Textiles*, Joule, 3, 1478-1486.
46. Ke, Y., Wang, F., Xu, P., Yang, B. (2018). *On the Use of a Novel Nanoporous Polyethylene (nanoPE) Passive Cooling Material for Personal Thermal Comfort Management under Uniform Indoor Environments*, Building and Environment, 145, 85-95.
47. Assaf, S., Boutghatin, M., Pennec, Y., Thomy, V., Korovin, A., Treizebre, A., Carrette, M., Akjouj, A., Djafari-Rouhani, B. (2020). *Polymer Photonic Crystal Membrane for Thermo-Regulating Textile*, Scientific Reports, 10, 1-9.
48. Feng, S., Zhou, Y., He, M., Wang, R., Shi, S., Liu, C., Huang, Y. (2022). *3D Sustainable Polysiloxane/ZnO Hybrid Membrane with Enhanced Reflectivity and Flame Retardancy for Daytime Radiative Cooling*, Optical Materials, 129, 112472, 1-9.
49. Mandal, J., Fu, Y., Overvig, A. C., Jia, M., Sun, K., Shi, N. N., Yang, Y. (2018). *Hierarchically Porous Polymer Coatings for Highly Efficient Passive Daytime Radiative Cooling*, Science, 6412, 315-319.
50. Liu, R., Wang, X., Yu, J., Wang, Y., Zhu, J., Hu, Z. (2018). *A Novel Approach to Design Nanoporous Polyethylene/Polyester Composite Fabric via TIPS for Human Body Cooling*, Macromolecular Materials and Engineering, 303, 1700456, 1-10.
51. Huang, W., Chen, Y., Luo, Y., Mandal, J., Li, W., Chen, M., Tsai, C., Shan, Z., Yu, N., Yang, Y. (2021). *Scalable Aqueous Processing -*

- Based Passive Daytime Radiative Cooling Coatings*, *Advanced Functional Materials*, 31, 2010334, 1-7.
52. Ni, Y., Shen, G., Ng, K. H., Zhu, T., Li, S., Li, X., Cai, W., Chen, Z., Huang, J. (2022). *Rational Construction of Superhydrophobic PDMS/PTW@ Cotton Fabric for Efficient UV/NIR Light Shielding*, *Cellulose*, 29(8), 4673-4685.
 53. Chen, M., Liu, Y., Zhao, X. (2023). *Emerging Passive Thermoregulatory Textiles Through Tailoring Different Heat Transfer Routes*, *Textile Research Journal*, 00405175231154018, 1-26.
 54. Lei, L., Shi, S., Wang, D., Meng, S., Dai, J. G., Fu, S., Hu, J. (2023). *Recent Advances in Thermoregulatory Clothing: Materials, Mechanisms, and Perspectives*, *ACS Nano*, 17(3), 1803-1830.
 55. Hsu, P. C., Liu, X., Liu, C., Xie, X., Lee, H. R., Welch, A. J., Zhao, T., Cui, Y. (2015). *Personal Thermal Management by Metallic Nanowire-Coated Textile*, *Nano Letters*, 15(1), 365-371.
 56. Yu, Z., Gao, Y., Di, X., Luo, H. (2016). *Cotton Modified with Silver-Nanowires/Polydopamine for a Wearable Thermal Management Device*, *RSC Advances*, 6(72), 67771-67777.
 57. Hazarika, A., Deka, B. K., Kim, D., Jeong, H. E., Park, Y. B., Park, H. W. (2018). *Woven Kevlar Fiber/Polydimethylsiloxane/Reduced Graphene Oxide Composite-Based Personal Thermal Management with Freestanding Cu-Ni Core-Shell Nanowires*, *Nano Letters*, 18(11), 6731-6739.
 58. Yue, X., Zhang, T., Yang, D., Qiu, F., Li, Z., Wei, G., Qiao, Y. (2019). *Ag Nanoparticles Coated Cellulose Membrane with High Infrared Reflection, Breathability and Antibacterial Property for Human Thermal Insulation*, *Journal of Colloid and Interface Science*, 535, 363-370.
 59. Zhou, H., Zhang, T., Yue, X., Peng, Y., Qiu, F., Yang, D. (2019). *Fabrication of Flexible and Superhydrophobic Melamine Sponge with Aligned Copper Nanoparticle Coating for Self-Cleaning and Dual Thermal Management Properties*, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(12), 4844-4852.
 60. 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, 1-8.
 61. Shi, M., Shen, M., Guo, X., Jin, X., Cao, Y., Yang, Y., Wang, J. (2021). *Ti₃C₂T_x MXene-Decorated Nanoporous Polyethylene Textile for Passive and Active Personal Precision Heating*, *ACS Nano*, 15(7), 11396-11405.
 62. Li, Q., Lu, J., Gupta, P., Qiu, M. (2019). *Engineering Optical Absorption in Graphene and Other 2D Materials: Advances and Applications*, *Advanced Optical Materials*, 7(20), 1900595, 1-23.
 63. Furchi, M., Urich, A., Pospischil, A., Lilley, G., Unterrainer, K., Detz, H., Mueller, T. (2012). *Microcavity-Integrated Graphene Photodetector*, *Nano Letters*, 12(6), 2773-2777.
 64. Zhu, L., Liu, F., Lin, H., Hu, J., Yu, Z., Wang, X., Fan, S. (2016). *Angle-Selective Perfect Absorption with Two-Dimensional Materials*, *Light: Science & Applications*, 5(3), e16052-e16052, 1-6.
 65. Chen, C. J., Chen, D. H. (2012). *Preparation of LaB₆ Nanoparticles as a Novel and Effective Near-Infrared Photothermal Conversion Material*, *Chemical Engineering Journal*, 180, 337-342.
 66. Hong, J., Park, C., Kim, Y. (2019). *Photothermal Properties of Wool Fabrics Colored with SiO₂@ AuNPs*, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 574, 115-121.
 67. Ignatieva, N., Zakharkina, O., Dadasheva, A., Shekhter, A., Sviridov, A., Lunin, V. (2019). *Transformation of the Dermal Collagen Framework under Laser Heating*, *Journal of Biophotonics*, 12(12), e201960024, 1-10.
 68. Woo, Y. E., Oh, K. W. (2023). *Fabrication of Polyester Fabrics with Tungsten Bronze Nanorods and a Silane Coupling Agent for Improved Thermal Storage and Washing Durability*, *Fashion and Textiles*, 10(1), 1-12.
 69. Chala, T. F., Wu, C. M., Chou, M. H., Gebeyehu, M. B., Cheng, K. B. (2017). *Highly Efficient Near Infrared Photothermal Conversion Properties of Reduced Tungsten Oxide/Polyurethane Nanocomposites*, *Nanomaterials*, 7(7), 191, 1-13.
 70. Thongrattanasiri, S., Koppens, F. H., De Abajo, F. J. G. (2012). *Complete Optical Absorption in Periodically Patterned Graphene*, *Physical Review Letters*, 108(4), 04740, 1-5.
 71. Fang, Z., Thongrattanasiri, S., Schlather, A., Liu, Z., Ma, L., Wang, Y., García de Abajo, F. J. (2013). *Gated Tunability and Hybridization of Localized Plasmons in Nanostructured Graphene*, *ACS Nano*, 7(3), 2388-2395.
 72. Liu, Y., Chadha, A., Zhao, D., Piper, J. R., Jia, Y., Shuai, Y., Zhou, W. (2014). *Approaching Total Absorption at Near Infrared in a Large Area Monolayer Graphene by Critical Coupling*, *Applied Physics Letters*, 105(18), 181105, 1-5.
 73. Piper, J. R., Fan, S. (2014). *Total Absorption in a Graphene Monolayer in the Optical Regime by Critical Coupling with a Photonic Crystal Guided Resonance*, *ACS Photonics*, 1(4), 347-353.
 74. Grande, M., Vincenti, M. A., Stomeo, T., Bianco, G. V., De Ceglia, D., Aközbeke, N., D'Orazio, A. (2015). *Graphene-Based Perfect Optical Absorbers Harnessing Guided Mode Resonances*, *Optics Express*, 23(16), 21032-21042.
 75. Huang, L., Li, G., Gurarlan, A., Yu, Y., Kirste, R., Guo, W., Cao, L. (2016). *Atomically Thin MoS₂ Narrowband and Broadband Light Superabsorbers*, *ACS Nano*, 10(8), 7493-7499.
 76. Xu, J., Jiang, S., Wang, Y., Shang, S., Miao, D., Guo, R. (2017). *Photo-Thermal Conversion and Thermal Insulation Properties of ZrC Coated Polyester Fabric*, *Fibers and Polymers*, 18, 1938-1944.
 77. Dong, J., Luo, S., Ning, S., Yang, G., Pan, D., Ji, Y., Liu, C. (2021). *MXene-Coated Wrinkled Fabrics for Stretchable and Multifunctional Electromagnetic Interference Shielding and Electro/Photo-Thermal Conversion Applications*, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(50), 60478-60488, 1-11.
 78. Hazarika, A., Deka, B. K., Kim, D. C., Jaiswal, A. P., Seo, J., Park, Y. B., Park, H. W. (2022). *Multidimensional Wearable Self-Powered Personal Thermal Management with Scalable Solar Heating and a Triboelectric Nanogenerator*, *Nano Energy*, 98, 107323, 1-12.
 79. Huang, L. Z., Yuan, Q., Ji, X. X., Li, D. D., Zhang, W., Guo, W. Y., Ma, M. G. (2022). *Multifunctional MXene-Decorated Cotton Fabric with Different Weaves, Outstanding Photothermal Effect, and Rapid Response*, *Cellulose*, 29(12), 6997-7010.
 80. Liu, X., Du, X., Li, L., Cao, Y., Yang, Y., Wang, W., Wang, J. (2022). *Multifunctional AgNW@ MXene Decorated Polymeric Textile for Highly-Efficient Electro-/Photothermal Conversion and Triboelectric Nanogenerator*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 156, 106883, 1-9.
 81. Dong, X. X., Cao, Y. M., Wang, C., Wu, B., Zheng, M., Xue, Y. B., Zhuo, M. P. (2023). *MXene-Decorated Smart Textiles with the Desired Mid-Infrared Emissivity for Passive Personal Thermal Management*, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1-9.
 82. Cao, Y. M., Zheng, M., Li, Y. F., Zhai, W. Y., Yuan, G. T., Zheng, M., Liao, L. S. (2021). *Smart Textiles Based on MoS₂ Hollow Nanospheres for Personal Thermal Management*, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(41), 48988-48996.

83. Qin, Y., Zhang, Q., Pan, W., Zhang, J., Wang, Z., Qi, Y., Yu, H. (2022). *Dyeable PAN/CuS Nanofiber Membranes with Excellent Mechanical and Photothermal Conversion Properties via Electrospinning*, ACS Applied Polymer Materials, 4(12), 9144-9150.
84. Zhang, Q., Liu, D., Pan, W., Pei, H., Wang, K., Xu, S., Cao, S. (2022). *Flexible Stretchable Electrothermally/Photothermally Dual-Driven Heaters from Nano-Embedded Hierarchical CuxS-Coated PET Fabrics for All-Weather Wearable Thermal Management*, Journal of Colloid and Interface Science, 624, 564-578.
85. Pu, H., He, P., Yang, D., Dang, Y., Ma, J. (2023). *Polydopamine Modified CuS Particles Filled Cellulose Fiber for Photothermal Conversion Performance*, Industrial Crops and Products, 193, 116188, 1-9.
86. Butterworth, M.D.; Bell, S.A.; Armes, S.P., Simpson, A.W. (1996). *Synthesis and Characterization of Polypyrrole-Magnetite-Silica Particles*. Journal of Colloid and Interface Science, 183, 91-99.
87. Lee, D., Shin, T. J., Yoo, P. J., Oh, K. W., Park, J. (2018). *Conjugated Polymer Nano-Ellipsoids Assembled with Octanoic Acid and Their Polyurethane Nanocomposites with Simultaneous Thermal Storage and Antibacterial Activity*, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 63, 33-40.
88. Lee, D., Sang, J. S., Yoo, P. J., Shin, T. J., Oh, K. W., Park, J. (2018). *Machine-Washable Smart Textiles with Photothermal and Antibacterial Activities from Nanocomposite Fibers of Conjugated Polymer Nanoparticles and Polyacrylonitrile*, Polymers, 11(1), 16, 1-14.
89. Lyu, S., He, Y., Yao, Y., Zhang, M., Wang, Y. (2019). *Photothermal Clothing for Thermally Preserving Pipeline Transportation of Crude Oil*, Advanced Functional Materials, 29(27), 1900703, 1-10.
90. Zhao, N., Wang, Z., Cai, C., Shen, H., Liang, F., Wang, D., Xu, J. (2014). *Bioinspired Materials: From Low to High Dimensional Structure*, Advanced Materials, 26(41), 6994-7017.
91. Jia, H., Guo, J., Zhu, J. (2017). *Comparison of the Photo-Thermal Energy Conversion Behavior of Polar Bear Hair and Wool of Sheep*, Journal of Bionic Engineering, 14(4), 616-621.
92. Jia, H., Zhu, J., Debeli, D. K., Li, Z., & Guo, J. (2018). *Solar Thermal Energy Harvesting Properties of Spacer Fabric Composite used for Transparent Insulation Materials*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 174, 140-145.
93. Yue, X., He, M., Zhang, T., Yang, D., Qiu, F. (2020). *Laminated Fibrous Membrane Inspired by Polar Bear Pelt for Outdoor Personal Radiation Management*, ACS Applied Materials & Interfaces, 12(10), 12285-12293.
94. Wang, Y., Cui, Y., Shao, Z., Gao, W., Fan, W., Liu, T., Bai, H. (2020). *Multifunctional Polyimide Aerogel Textile Inspired by Polar Bear Hair for Thermoregulation in Extreme Environments*, Chemical Engineering Journal, 390, 124623, 1-8.
95. Cui, Y., Gong, H., Wang, Y., Li, D., Bai, H. (2018). *A Thermally Insulating Textile Inspired by Polar Bear Hair*, Advanced Materials, 30(14), 1706807, 1-8.
96. Shao, Z., Wang, Y., Bai, H. (2020). *A Superhydrophobic Textile Inspired by Polar Bear Hair for Both in Air and Underwater Thermal Insulation*, Chemical Engineering Journal, 397, 125441, 1-8.
97. 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, 1-9.
98. Hu, X., Tian, M., Qu, L., Zhu, S., Han, G. (2015). *Multifunctional Cotton Fabrics with Graphene/Polyurethane Coatings with Far-Infrared Emission, Electrical Conductivity, and Ultraviolet-Blocking Properties*, Carbon, 95, 625-633.
99. Kubiliene, D., Sankauskaite, A., Abraitienė, A., Krauledas, S., Barauskas, R. (2016). *Investigation of Thermal Properties of Ceramic-Containing Knitted Textile Materials*, Fibres & Textiles in Eastern Europe, 3 (117), 63-66.
100. Stygienė, L., Varnaitė-Žuravliova, S., Abraitienė, A., Krauledas, S., Baltušnikaitė-Guzaitienė, J., Padleckienė, I. (2020). *Investigation of Thermoregulation Properties of Various Ceramic-Containing Knitted Fabric Structures*, Journal of Industrial Textiles, 50(5), 716-73.
101. Gu, B., He, M., Yang, D., Yue, X., Qiu, F., Zhang, T., Chen, M. (2020). *Wearable Janus MnO₂ Hybrid Membranes for Thermal Comfort Management Applications*, Applied Surface Science, 509, 145170, 1-9.
102. Bahng, G. W., Lee, J. D. (2014). *Development of Heat-Generating Polyester Fiber Harnessing Catalytic Ceramic Powder Combined with Heat-Generating Super Microorganisms*, Textile Research Journal, 84(11), 1220-1230.
103. Kuo, C. F. J., Fan, C. C., Su, T. L., Chen, S. H., Lan, W. L. (2016). *Nano Composite Fiber Process Optimization for Polypropylene with Antibacterial and Far-Infrared Ray Emission Properties*, Textile Research Journal, 86(16), 1677-1687.
104. Escamilla-Martínez, E., Gómez-Martín, B., Sánchez-Rodríguez, R., Fernández-Seguín, L. M., Pérez-Soriano, P., Martínez-Nova, A. (2022). *Running Thermoregulation Effects using Bioceramics versus Polyester Fibres Socks*, Journal of Industrial Textiles, 51(8), 1236-1249.
105. Qiu, K., Elhassan, A., Tian, T., Yin, X., Yu, J., Li, Z., Ding, B. (2020). *Highly Flexible, Efficient, and Sandwich-Structured Infrared Radiation Heating Fabric*, ACS Applied Materials & Interfaces, 12(9), 11016-11025.
106. Gordon, I. L., Casden, S., Vangel, M., Hamblin, M. R. (2019). *Effect of Shirts with 42% Celliant™ Fiber on tcPO₂ Levels and Grip Strength in Healthy Subjects: A Placebo-Controlled Clinicals Trial*, Journal of Textile Science & Engineering, 9(4), 1-15.
107. Yuce, I., Canoglu, S., Yukseloglu, S. M., Li Voti, R., Cesarini, G., Sibilia, C., Larciprete, M. C. (2022). *Titanium and Silicon Dioxide-Coated Fabrics for Management and Tuning of Infrared Radiation*, Sensors, 22(10), 3918,1-15.
108. Kim, H. (2022). *Heat Release and Wear Comfort Characteristics of the Ceramic Imbedded Fabrics for Cold Weather Protective Clothing*, Journal of Industrial Textiles, 52, 15280837221109638, 1-21.
109. Kim, H. A. (2022). *Wear Comfort of Heat Storage/Release Fabrics Containing Al₂O₃/Graphite Yarns*, Fibers and Polymers, 23(2), 554-564.
110. Tian, T., Wei, X., Elhassan, A., Yu, J., Li, Z., Ding, B. (2021). *Highly Flexible, Efficient, and Wearable Infrared Radiation Heating Carbon Fabric*, Chemical Engineering Journal, 417, 128114, 1-7.
111. Zhang, Q., Lv, Y., Wang, Y., Yu, S., Li, C., Ma, R., Chen, Y. (2022). *Temperature-Dependent Dual-Mode Thermal Management Device with Net Zero Energy for Year-Round Energy Saving*, Nature Communications, 13(1), 4874, 1-10.
112. Kim, H. A., Kim, S. J. (2017). *Far-Infrared Emission Characteristics and Wear Comfort property of ZrC-Imbedded Heat Storage Knitted Fabrics for Emotional Garments*, Autex Research Journal, 17(2), 142-151.
113. <http://www.kuraray.com/products/fiber>, Erişim tarihi: 30 Haziran 2019.

114. http://mrcfac.com/wp-content/uploads/2013/09/SDS-Grafil-precision_cut-unsized_05-17-12.pdf?1475465251, Erişim tarihi: 19 Temmuz 2019.
115. <https://www.unitica.co.jp>, Erişim tarihi: 15 Ağustos 2019.
116. Li, Y., Wu, D. X., Hu, J. Y., Wang, S. X. (2007). *Novel Infrared Radiation Properties of Cotton Fabric Coated with Nano Zn/ZnO Particles*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 300 (1-2), 140-144.
117. Larciprete, M. C., Paoloni, S., Orazi, N., Mercuri, F., Orth, M., Gloy, Y., Sibilia, C. (2019). *Infrared Emissivity Characterization of Carbon Nanotubes Dispersed Poly (Ethylene Terephthalate) Fibers*, International Journal of Thermal Sciences, 146, 106109, 1-6.
118. Tao, Y., Li, T., Yang, C., Wang, N., Yan, F., Li, L. (2018). *The Influence of Fiber Cross-Section on Fabric Far-Infrared Properties*, Polymers, 10(10), 1147, 1-13.
119. Rao, J., Gold, M. H., Goldman, M. P. (2005). *A Two - Center, Double - Blinded, Randomized Trial Testing the Tolerability and Efficacy of a Novel Therapeutic Agent for Cellulite Reduction*, Journal of cosmetic dermatology, 4(2), 93-102.
120. York, R. M., Gordon, I. L. (2009). *Effect of Optically Modified Polyethylene Terephthalate Fiber Socks on Chronic Foot Pain*, BMC Complementary and Alternative Medicine, 9, 1-7.
121. Lee, C. H., Roh, J. W., Lim, C. Y., Hong, J. H., Lee, J. K., Min, E. G. (2011). *A Multicenter, Randomized, Double-blind, Placebo-Controlled Trial Evaluating the Efficacy and Safety of a Far Infrared-Emitting Sericite Belt in Patients with Primary Dysmenorrhea*, Complementary Therapies in Medicine, 19(4), 187-193.
122. Liao, B. Y., Leung, T. K., Ou, M. C., Ho, C. K., Yang, A., Lin, Y. S. (2012). *Inhibitory Effects of Far-Infrared Ray-Emitting Belts on Primary Dysmenorrhea*, International Journal of Photoenergy, 2012, 1-7.
123. Hsu, P. C., Liu, C., Song, A. Y., Zhang, Z., Peng, Y., Xie, J., Cui, Y. (2017). *A Dual-Mode Textile for Human Body Radiative Heating and Cooling*, Science Advances, 3(11), e1700895, 1-9.
124. Yue, X., Zhang, T., Yang, D., Qiu, F., Wei, G., Zhou, H. (2019). *Multifunctional Janus Fibrous Hybrid Membranes with Sandwich Structure for On-Demand Personal Thermal Management*, Nano Energy, 63, 103808, 1-10.
125. Gu, B., Liang, K., Zhang, T., Yue, X., Qiu, F., Yang, D., Chen, M. (2019). *Fabrication of Sandwich-Structured Cellulose Composite Membranes for Switchable Infrared Radiation*, Cellulose, 26, 8745-8757.
126. Shi, N. N., Tsai, C. C., Camino, F., Bernard, G. D., Yu, N., Wehner, R. (2015). *Keeping Cool: Enhanced Optical Reflection and Radiative Heat Dissipation in Saharan Silver Ants*, Science, 349(6245), 298-301.
127. Tang, K., Dong, K., Li, J., Gordon, M. P., Reichertz, F. G., Kim, H., Wu, J. (2021). *Temperature-Adaptive Radiative Coating for All-Season Household Thermal Regulation*, Science, 374(6574), 1504-1509.
128. Liu, J., Zhu, L., Gao, S., Liu, Y., Wang, S., Xia, Y. (2023). *An Artificial Chameleon Skin for Dynamic Thermoregulation*, Advanced Materials Interfaces, 2202124, 1-9.
129. Yuan, H., Liu, R., Cheng, S., Li, W., Ma, M., Huang, K., Liu, Z. (2023). *Scalable Fabrication of Dual - Function Fabric for Zero - Energy Thermal Environmental Management Through Multiband, Synergistic, and Asymmetric Optical Modulations*, Advanced Materials, 2209897, 1-11.
130. Zheludev, N. I., Kivshar, Y. S. (2012). *From Metamaterials to Metadevices*, Nature Materials, 11(11), 917-924.
131. Zhang, X. A., Yu, S., Xu, B., Li, M., Peng, Z., Wang, Y., Wang, Y. (2019). *Dynamic Gating of Infrared Radiation in a Textile*, Science, 363(6427), 619-623.
132. Fu, K., Yang, Z., Pei, Y., Wang, Y., Xu, B., Wang, Y., Hu, L. (2019). *Designing Textile Architectures for High Energy-Efficiency Human Body Sweat-and Cooling-Management*, Advanced Fiber Materials, 1, 61-70.
133. Leung, E. M., Colorado Escobar, M., Stiubianu, G. T., Jim, S. R., Vyatskikh, A. L., Feng, Z., Gorodetsky, A. A. (2019). *A Dynamic Thermoregulatory Material Inspired by Squid Skin*, Nature Communications, 10(1), 1947, 1-10.
134. <https://www.polyu.edu.hk/publications/excelximpact/issue/202112/research-innovation/new-far-infrared-fibre-with-great-potential-for-functional-and-healthcare-textiles-developed>, Erişim tarihi: 23 Mart 2023.