

TERMAL KORUYUCU GIYSİLERDE YENİ GELİŞMELER

Bengi Kutlu

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Tekstil Mühendisliği Bölümü, Buca-İzmir
beni.kutlu@deu.edu.tr

ÖZET

Termal koruyucu giysiler, yapısal ve açık alan yangınlarına doğrudan müdahale eden itfaiye ve orman çalışanları başta olmak üzere, yüksek ısı ve sıcaklık koşullarından çalışanları korumak için kullanılmaktadır. Bu çalışmada son yıllarda termal koruyucu giysiler alanındaki güncel araştırma konuları üzerinde durulmuştur. Konular termal koruma ve konfor, akıllı sistemler, yangın sonrası maruz kalınan kirleticiler ve termal koruyucu giysiler için fonksiyonel uygulamalar başlıkları altında değerlendirilmiştir.

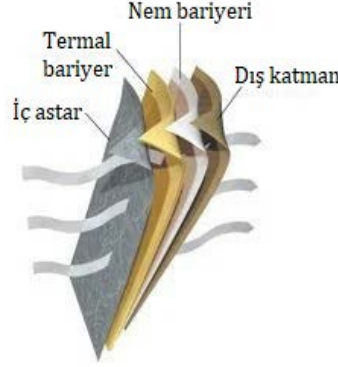
1. GİRİŞ

Giysilerin işlevi, giyeni çevreden gelecek etkilerden korumaktır. Çalışanlar için ise, çalışan sağlığına ve güvenliğine katkıda bulunacak biçimde, çalıştıkları tehlikeli ortamlardan koruma işlevini yerine getirmesi beklenmektedir. Bu tür koruyucu iş giysileri, sadece giysilerden oluşmamakta, giysilere eklenen bağlantı sistemleri ve diğer koruyucu değiştirilebilir parçalar, eldiven, başlık, ayakkabılar vb. ile birlikte değerlendirilmekte ve bu bileşenleri içerdiğinde “kişisel koruyucu donanım (KKD)” olarak tanımlanmaktadır. Koruyucu iş giysilerinin, kişisel koruyucu donanımın, ilgili işteki tehlikeler ne ise tümüne karşı işin gerektirdiği kadar koruyucu olması beklenmektedir [1,2,3].

Bu çalışmada son yıllarda termal koruyucu giysiler üzerine yapılmış olan araştırma konuları derlenmiştir. Çalışmanın amacı, termal koruyucu giysiler hakkındaki güncel geliştirmelerin, uygulanan yeni teknik ve teknolojilerin ve geliştirilebilir alanların ne olduğunu inceleyerek bu alanda önem verilen konuları belirlemektir. Bu haliyle, kullanıcılara ve araştırmacılara yararlı bir kaynak oluşturulması hedeflenmektedir. Bilimsel makalelerle birlikte Avrupa Koruyucu Giysiler Birliği tarafından her iki yılda bir farklı bir ülkede organize edilen Avrupa Koruyucu Giysiler Konferansı'nın (ECPC) 2021 yılındaki bildirimleri incelendiğinde de termal koruyucu giysilerle ilgili akıllı tekstiller, bedene uygun termal koruyucu giysiler, konfor, termal koruyucu giysilerin seçim-kullanım bakım ve onarımı, yenilikçi malzemelerde geliştirmeler, termal koruyucu giysilerin test edilmesi konularının araştırmacılar tarafından yoğunlukla paylaşıldığı görülmektedir [4]. Çalışma sırasında, öne çıkan araştırma konularının akıllı koruyucu tekstiller (giyilebilir sensörler), giysi konforu, hava boşluğu vb. etmenlerin giysilerin ısı izolasyonuna etkisi ile giysilerde kimyasal bileşikler nedeniyle oluşan kirlilik olduğu görülmektedir. Bunun yanında termal koruyucu giysilerde kullanılmak üzere çeşitli fonksiyonelleştirme işlemlerinin yapıldığı da görülmektedir.

Termal zarar riskinin olduğu benzinlik, petrol endüstrisi, metal döküm, askeriye vb. iş alanlarında çalışanlar da termal koruyucu giysilere gereksinim duymakla birlikte birebir çalışma alanı yangınlar olan itfaiyecilerin giysileri, termal koruyucu giysilerin en önemli sınıfını oluşturmaktadır. Bu çalışmada özellikle itfaiyeci giysileri üzerine yapılan araştırmalara

değınilecektir. Termal koruyucu giysiler, çok yüksek ısının ve alevın bulunduğu ortamda çalışan itfaiyeciler için iş sağlığı ve güvenliğinin önemli bir parçasıdır. Termal koruyucu giysilerin en önemli alanı olan itfaiyeci giysileri, gerekli korumayı sağlaması için dört katmandan oluşmaktadır. Bunlar, dış katman, nem bariyeri, termal bariyer ve iç astardır (Şekil 1) [2,5,6].



Şekil 1. İtfaiyeci giysilerinde katmanlar [<https://www.lionprotects.com/blog/whats-inside-your-turnout-gear>, 12/08/2022]

Giysi içerisinde her katman farklı bir görevi yerine getirmektedir. Dış katman, meta- ya da para-aramid, polibenzimidazol (PBI), poliaramid-imid, poliimid, polyoksibenzoksazol, yarı-karbon, polisülfonamid gibi kendiliğinden güç tutuşur olan liflerden üretilmektedir. Bu katman giysi ile giyeni dışarıdan gelen etkilere karşı koruyan, güç tutuşurluğu ve mukavemeti çok yüksek olan katmandır. Nem bariyeri aramid, güç tutuşur viskoz liflerinden dokuma ya da dokusuz yüzey olarak üretilen kumaşa lamine edilmiş ya da kaplanmış mikrogözenekli poliüretan, politetrafloretillen ya da son zamanlarda poliesterden üretilmiş, su geçirmeyen ancak nefes alabilen katmandır. Termal bariyer, dış katman gibi, kendiliğinden güç tutuşur liflerden üretilen ısı izolasyonunu sağlayan iğneleme (needle-felt) tekniği ile üretilen kalın dokusuz yüzeylerdir. İç astar da giysinin vücuda temasında rahatlık sağlayan %100 aramid ya da aramid/viskoz karışımı halinde dokuma yöntemi ile yaygın olarak üretilen (serme-spun-lace yöntemi ile dokusuz yüzey olarak da üretilebilir) ince katmandır. Termal bariyer ve iç astar birbirine genelde dikiş ya da laminasyonla birleştirilmiş olarak, “termal astar” olarak üretilmektedir [1,2].

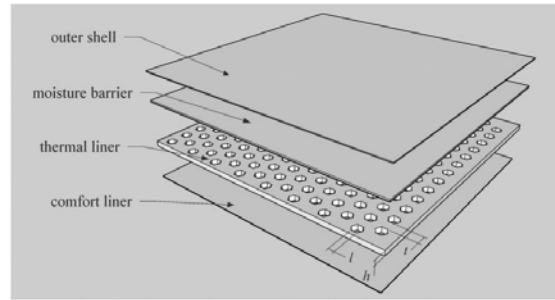
2. KONFOR VE TERMAL KORUMA

Çok katmanlı olması nedeni ile giysi ağırlıkları yüksek olmakta ve buhar geçirgenliği de düşük olmaktadır. Hem bu özellikleri hem de yüksek sıcaklıktaki ortamlarda kullanılıyor olmaları nedeniyle vücutta gerçekleşmesi gereken kuru (radyan) ısı kaybı ve buharlaşma (konveksiyon) ile ısı kaybı olması gerektiği gibi olmamakta fizyolojik, fiziksel ve psikolojik konfor olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle güncel araştırmaların konularından bir tanesi her zaman çok katmanlı termal koruyucu giysilerin (itfaiyeci giysilerinin) termal koruma ve konforu iyileştirme olmaktadır [2,6,7]

Bir termal koruyucu giysinin, üretildiği halinde koruma özellikleri belirli bir değerde iken yangına müdahaleler sonrası maruz kaldığı etkiler nedeniyle performansında değişmeler görülmektedir. Bu nedenle yararlı kullanım ömürleri önemlidir. Bunu anlamak için yapılan bir araştırmada, laboratuvarında manken üzerinde ani parlama (flash fire) koşuluna maruz bırakılan (4s) 2 farklı dış katman kumaşından yapılan giysilere, mukavemet testleri yapılmıştır. Kevlar/PBI kumaşın gramaj ve mukavemet testlerinde NomexIII A kumaşa göre daha iyi sonuç

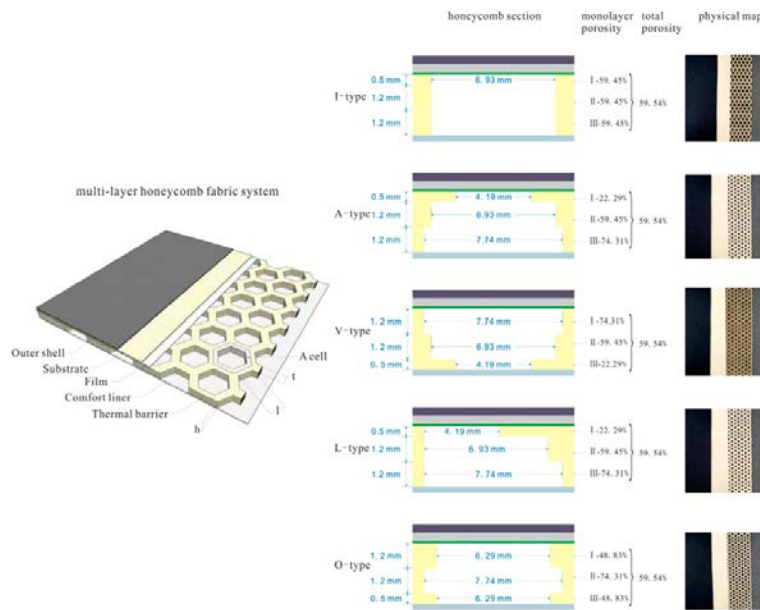
verdiği belirlenmiştir. Ani parlama sonrası, Kevlar/PBI kumaş kopma mukavemeti, orijinal kumaşın kopma mukavemetinden %60,6 daha düşük olmasına karşın, NFPA standardının minimum gerekliliğini hala sağlamakta olduğu belirtilmiştir [8].

Katmanlı giysiyi daha hafif üretebilmek, konfor için çözümlerden bir tanesidir. İzolasyon sağlayan hava boşlukları termal koruma için önemli olduğundan hacimliliği, hava boşluğunu artırmaya yönelik araştırmalar sürmektedir. Hava boşluğu yaratmak için şekil hafızalı alaşımlar, boşluklu lifler gibi malzemeler kullanılmakta, termal bariyerde hava boşluğu oluşturmaya yönelik denemeler yapılmaktadır [5,7]. Termal bariyeri balpeteği yapısında (Şekil 2) üreterek termal koruma performansından ödün vermeden daha hafif dolayısıyla konfor özellikleri geliştirilmiş çok katmanlı giysi yapısı ile yapılan çalışmada giysinin hafiflediği belirtilmiştir. Termal katmanın kalınlığına göre değişmekle birlikte, kenar uzunluğu azalır, kenar uzunluğu arttıkça TPP - termal koruma performansının arttığı bulunmuştur. [2,6].



Şekil 2. Balpeteği şekli verilmiş termal bariyer ve yerleşimi (l: kenar uzunluğu, t: petekler arası uzaklık) [6]

Balpeteği gözeneklerinin olumlu sonuçlar vereceği anlaşıldıktan sonra, gözenek kesitlerini değiştirmenin konfor ve termal koruma üzerine etkisini değerlendirmiştir (Şekil 3). I, A, V, L ve O şeklinde boyuna kesitlerde hazırlanan balpeteği gözenekler için termal koruma performansı – TPP, ile ısı ve nem direnci de konfor özellikleri için ölçülmüştür. Yaptıkları istatistiksel analizler sonucunda da A şeklindeki boyuna kesitli balpeteği gözenekli yapıyı içeren katmanlı örneklerin termal koruma düzeyi en yüksek olduğu için konfor değerleri ile birlikte değerlendirildiğinde uygun gözenek şekli olarak belirlenmiştir [9].

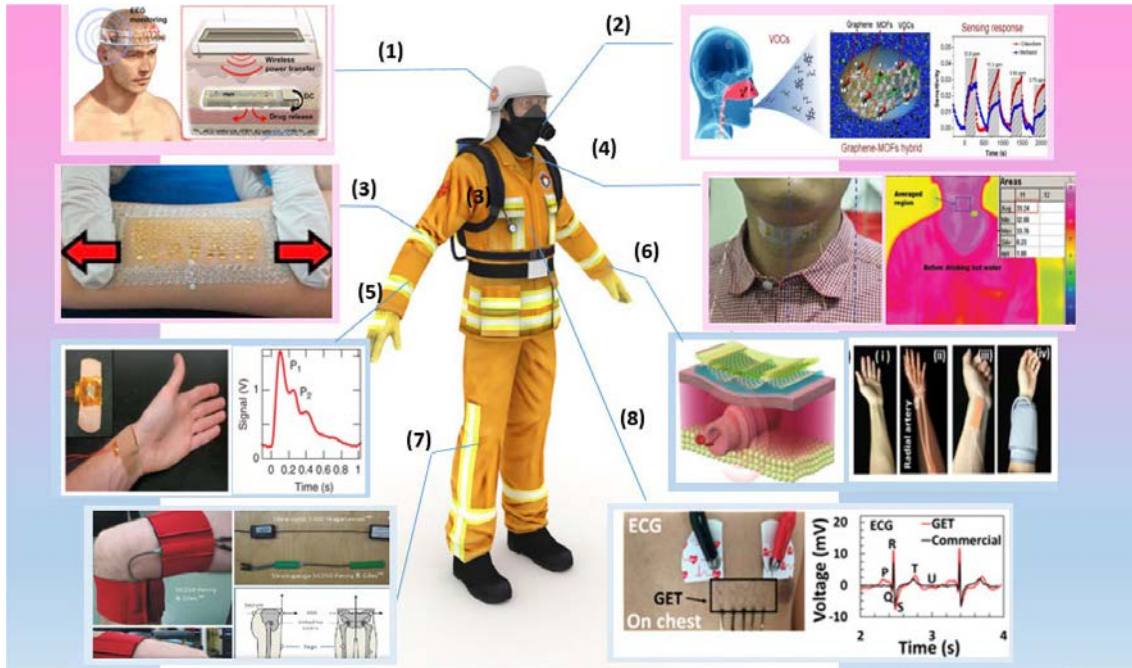


Şekil 3. Termal bariyerde farklı boyuna kesit şeklindeki boşluklar [9]

Giysi içinde sıcaklığın yükselmesi, giyen kişi açısından bir diğer konforsuzluk nedeni ve uzun sürede vücutta ısı stresi oluşturarak sağlığını tehdit eden önemli unsurlardan bir tanesidir. Çalışmalardan bir tanesinde giysilerin ısı depolama ve ısı salımının dış ortam sıcaklığına göre değişimi araştırılmıştır. 0, 5, 10, 15 ve 20°C sıcaklıktan 40°C lik ortama ve tekrar başlangıç sıcaklığına (5 farklı geçiş) geçildiğinde vücudun farklı bölümlerindeki ısıl değişimler incelenmiştir. Sıcaklık adımlarına bağlı olmakla birlikte %80 ısı salımı ya da depolamasının 10dakika içerisinde gerçekleştiği, en yüksek ısı depolamasının dış katmanda olduğu ve bunun iç katman ekleyince %2’de %39’a değiştiği, vücut bölümlerinden ise en yüksek ısı depolamasının karın bölgesinde olduğu tespit edilmiştir [10]

3. AKILLI KORUYUCU TEKSTİLLER

Giyilebilir sensörlerdeki gelişmeler yangınlara müdahale sırasında her bir itfaiyecinin fizyolojik verisinin dolayısıyla sağlık ve güvenliğinin izlenmesine olanak verir. Ayrıca itfaiyecinin yerini, vücut hareketlerini, yönünü ve hızını izleme olanağı verdiği için arama-kurtarma çalışmaları daha etkin yapılabilmektedir. Bazı giyilebilir sensörler Şekil 4’te görülmektedir [11].



Şekil 4. Giyilebilir sensörlerin kullanıldığı vücut/giysi bölümleri [11]

Bu akıllı sistemler ile vücut sıcaklığından nefeste uçucu bileşiklere, elektroensefalografi sinyallerinden klinik işaretlere, basınç sensörü ile kalp atışından hareket izlemeye, vücut sıcaklığına bağlı fizyolojik izlemeden elektrokardiyografi sinyallerine kadar birçok değişik parametre takip edilebilmektedir. İtfaiyeci giysilerinde halen kullanılmakla birlikte bu sensörlerin geliştirilmeye ihtiyaç olan alanlarında güncel araştırmalar konularının şunlar olduğu belirlenmiştir: Üretimleri sırasında oluşan kırıkların iletkenliği düşürmesi, gaz sensörlerinin ppm düzeyinde düşük konsantrasyonları algılamasındaki zorluklar, ortamda oksidatif gazlar olduğunda ya da UV radyasyonu varlığında gaz sensörlerinin zarar görmesi, gaz sensörlerinin geri dönüş süresinin uzun olması, sensörlerin kirlilik, gürültü ve titreşime hassasiyet göstermesi, tekstil esaslı nem sensörlerinin dayanıklılığı için kullanılan kaplama, baskı işlemlerinin geliştirilmesi, hareket sensörleri tek yönde esnediğinde ve sabit hızda hareket sırasında sorun

oluşması, en önemlilerdir. Yeni nesil ürünler için kablosuz iletişim, daha küçük ve kendini şarj edebilen sistemler, vücut hareketindeki mekanik etkilerden zarar görmesinin önlenmesi, yangın radyasyonu ile terden ve su püskürtülmesinden kaynaklanan nemden etkilenmeyen sensörler konusunda çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Akıllı sistemler itfaiyecilerin sağlığını izlemeye olduğu kadar, yol bulma ya da alarm verme için de kullanılmaktadır. Kurtarma operasyonlarında yarar sağlarken kendileri de, ağırlığı, yeterince akıllı mı ya da tam tersi gereksiz-pahalı akıllı sistem seçilmiş olabilir mi, veri güvenliği vb nedenlerle zorluklara neden olabilmektedir. Bunun yanında kullanıcılara ve üreticilere rehber olması için 2021 yılında Avrupa Standartları Merkezi'nde (CEN) ısı ve alev karşı koruyucu akıllı giysilerin seçimi, kullanımı, bakımı ve onarımı üzerine standart hazırlanmıştır [11,12,13].

4. YANGIN SONRASI MARUZ KALINAN KİRLİTİCİLER

İtfaiyecilerin karşılaştığı tehlikelerden biri de zararlı yanma ürünleridir. Yangın sırasında uçucu organik bileşikler/yarı-uçucu organik bileşikler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar, parçacıklar, izosiyanatlar, halojenlenmiş dioksinler, halojenli güç tutuşurluk maddeleri, lif uçuntuları oluşmaktadır. Giysilerin kirlenmesine neden olan kirlenme türleri yüzey kirlenmesi ve permeasyon (moleküler düzeyde transfer)'dur. Permeasyon, sıcaklık, temas süresi, konsantrasyon, kimyasal/fiziksel özelliklere bağlı olarak değişik miktarlarda olabilmektedir. Kirlenme yolları ise direkt kirlenme ve çapraz kirlenmedir. En yaygın direkt kirlenen ekipman baş koruyucu, eldiven ve ayakkabılar olarak belirlenmiştir. İngiltere'de 2020 yılında yangın sırasında açığa çıkan kirliliklere maruz kalmayı en aza indirmek için ön hazırlık, yangın sonrası temizlik işlemleri vb. hakkında iyi uygulamalar rehberi yayınlanmıştır. Bu ürünlerden polisiklik aromatik hidrokarbonların (PAH) vücutta birikme eğiliminde olduğu ve yarılanma ömürlerinin uzun olduğu belirlenmiştir. Yangınlar sırasında bu bileşikler giysilerin dış katmanı üzerinde kirlilik olarak çökmektedir. Bu konudaki güncel araştırmalardan birinde yangın öncesi yangın sonrası (yangın ya da canlı yangın simülatörü eğitimi sonrası) ve yıkama sonrası alınan örneklerde PAH ölçümü üzerine yapılmıştır ve giysi katmanları arasında ve dirsek ve diz arasındaki farklılıklar değerlendirilmiştir. Yangına göre yangın eğitimi sonrası dış katman kumaşında PAH düzeyi 10-12 kat düşük bulunmuştur. Birikmenin dış katman ve nem bariyerinde yüksek olduğu termal bariyerde pek olmadığı hatta bazı örneklerde nem bariyerindeki birikmenin dış katmandan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu da dış katmandan içeri penetrasyon gerçekleştiğini göstermektedir. Dirsek ve dizler arasında analiz edilen PAH konsantrasyonları arasında farklılık görülmemiştir. Satıcının belirttiği koşula göre yapılan yıkamalar sonrasında dış katman, nem bariyer ve termal bariyerinde sırasıyla $79 \pm 14\%$, $63 \pm 25\%$ ve $58 \pm 14\%$ etkinlikte temizlenmiştir [14,15].

5. TERMAL KORUYUCU GİYSİLER İÇİN FONKSİYONEL UYGULAMALAR

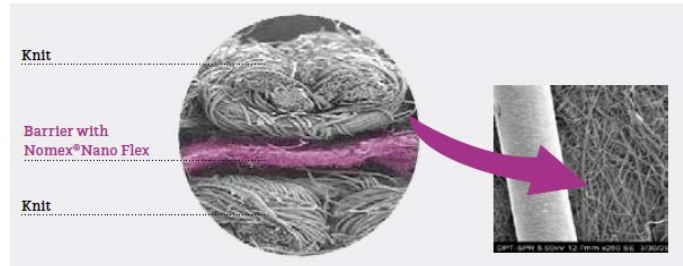
Kendiliğinden güç tutuşur olan lifler, dünyada sayılı birkaç üretici tarafından üretilmekte ve gerek üretim yöntemi gerek niş pazar olması nedeni ile yüksek fiyatta satışa sunulmaktadır. İtfaiyeciler gibi çok yüksek ısı ve alev koşullarına maruz kalınmayan iş alanları ve ortamlarda kullanılacak termal koruyucu tekstillerde bu çok pahalı liflerin kullanımı yerine dayanıklı güç tutuşur özellikteki farklı ürünlerin de kullanılabilirliği görülmektedir. Bu nedenlerle fonksiyonel işlemlerle modifikasyon termal koruyucu tekstiller için araştırılan konulardan bir tanesidir.

Grafen, iki boyutlu, tek tabakalı monoatomik kalınlıkta balpeteğine benzer hekzagonal kristal yapıda karbondan oluşmuş bir malzemedir. Grafenoksit ve indirgenmiş grafenoksit önemli türevleridir. Grafenoksitin indirgenmesi ile yapısındaki oksijenli fonksiyonellikler uzaklaştırılmakta ve termal vb dayanımı iyileşmektedir. Grafenin çok yönlü özellikleri nedeni ile grafenle elde edilen tekstil yapıları mekanik dayanım, güç tutuşurluk, antibakteriyellik,

aşınma dayanımı ve UV koruma özellikleri kazanmaktadır. Aynı madde ile elde edilebilen çok farklı özellikler nedeni ile ümit vadeden fonksiyonelleştirme işlemlerinden görülmektedir [16].

Son yıllardaki araştırmalar incelendiğinde arojel uygulaması ile ilgili çalışmalar olduğu görülmektedir. Arojel, yüksek termal izolasyon, ultra-yüksek gözeneklilik ve yüksek yüzey alanı sağlayan silikon oksit, titanyum oksit, alüminyum oksit ve karbondan üretilebilen çok hafif bir malzemedir. Silika arojel en yaygın olanıdır. Tekstillere uygulaması için arojellerin rijit olması istenmeyen bir özellikleridir. Bu özelliğin üstesinden gelmek için Shaidi ve ark. 2021 yılında viskoz liflerinden dry-laid bir dokusuz yüzey oluşturarak üzerine arojelleri serpererek homojen dağılım sağlamış ardından yapıştırıcı tabaka ve son kat olarak da yine viskoz nonwoven kumaş eklemiştir. Ticari arojel içerikli kumaşa göre daha esnek bir yapı elde edebilmişlerdir. Ayrıca arojel içermeyen viskoz yapıya göre, radyan ve kontakt ısıdan çok daha yüksek koruma sağlanmıştır. Bununla birlikte değerler ticari arojel yapıdan bir miktar düşük elde edilmiştir. Örneğin, radyan ısı testinde 2. Derece yanık oluşması sıcaklığına ulaşmak 4g arojel içeren viskoz kumaşa 1068s almışken, ticari üründe 1100s'den daha uzun sürmüştür [17].

İtfaiyecilerin baş koruyucularının içerisine termal koruyucu iç başlık giymeleri kir parçacık kirlenmesinden korunmaları için de önemlidir. Ancak bu filtrasyon etkinliğini yapabilmesi için hem konforlu hem de bu fonksiyonu yerine getirebilir özellikte olmalıdır. Üretilen bir başlıkta iki meta-aramid örme başlık katının arasına eklenen nonwoven meta-aramid yapı ile %10lif %90 hava içeren mikron altı boyuttaki lifler nedeni ile iyi filtrasyon özelliğine sahip başlık oluşturulmuştur (Şekil 5) [18].



Şekil 5. Termal koruyucu filtrasyon özelliğine sahip iç başlık [18]

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu bildiriye son yıllarda termal koruyucu giysiler ile ilgili yapılan araştırmalarda öne çıkan araştırma konuları ve bunlarla ilgili gelişmeler derlenmiştir. Derleme çalışması, konfor ve termal koruma, akıllı koruyucu giysiler, yangın sonrası maruz kalınan kirlenmeler ve fonksiyonelleştirme işlemleri olmak üzere dört başlıkta hazırlanmıştır. Burada değinilemeyen konular arasında kadın itfaiyecilerin vücut tipine uygun giysilerin üretilmesi, yeni büyük ve küçük ölçekli test yöntemleri konuları da araştırmacıların incelediği konular arasındadır.

Derleme çalışmanın sonunda, minimum ağırlıkta, hareketi kısıtlamayacak şekilde elde edilen giyside izole edici hava boşlukları oluşturularak termal korumanın optimum düzeyde sağlanması, termal koruma ölçümünde giysideki nemin etkisinin göz önüne alınması, termal koruma özelliklerinin ölçümünde gerçekçi ısı koşullarının, daha uygun ölçüm sensörlerinin ve yanık tahminleme eğrilerinin tespit edilmesi/kullanılması ve testlerin zarar vermeyen objektif test yöntemleri haline getirilmesi, vücutta oluşan teri ve giysideki biriken ıyıyı uzaklaştırarak konforu sağlama, akıllı sistemlerin üretimleri, giysiye montajı ve giysinin kullanımı sırasında bu sistemlerin mekanik etkiler gibi dış etkenlere dayanıklılığının artırılması, sıcak-nemli ortamlarda etkinliğinin artırılması, çok sayıda kullanımda bile doğru ölçüm yaptığından emin olunması, yangın ortamında maruz kalınan kirliliklerin giysi üzerinde ve ekipmana göre

yoğunlaştığı yerinin, yoğunluğunun belirlenmesi, kullanım süresine, temizleme koşullarına göre değerlendirilmesi, fonksiyonel ürünlerin geliştirilmesi farklı kullanım amacına göre değerlendirilmesi, ayrıca termal vb korumanın yanında geliştirilmeye açık araştırma alanları olarak görülmüştür.

KAYNAKÇA

- [1] **Hertleer, C., Odhiambo, S., Van Langenhove, L.** 2013. Protective Clothing for Firefighters and Rescue Workers, in *Smart Textiles for Protection*, Woodhead Publishing, Cambridge, ISBN: 978-0-85709-056-0
- [2] **Song, G., Mandal, S., Rossi, R.** 2017. *Thermal Protective Clothing for Firefighters*, Woodhead Publishing, Elsevier Ltd., The Textile Institute, Cambridge, ISBN: 978-0-08-101285-7.
- [3] **Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliği**, Resmi Gazete Tarihi:01.05.2019, Sayısı:30761, 2019.
- [4] **Proceedings of 9th European Conference on Protective Clothing**, Mayıs 2021, Almanya (online) <http://es-pc.org/proceedings>, erişim tarihi: 13/08/2022.
- [5] **Wakatsuki, K., Seita, R. Watanabe, R., Muramoto, S., Kobayashi, Y., Morikawa, H.** 2022. Characterization of Air Gaps and Their Impact on the Thermal Insulation Performance of Multi-layer Firefighter Clothing, *Fire Technology*, 58, 1863–1887, 2022
- [6] **Du, F., Li, X.** 2021. The approach of honeycomb sandwich structure for thermal protective clothing, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 50(7) 957–969
- [7] **Lu, Y., Wang, L., He, J., Xu, Song, W.** 2022. Investigation of the Thermal Protective Performance of Shape Memory Fabric System: Effect of Moisture and Position of Shape Memory Alloy, *Clothing and Textiles Research Journal*, Vol. 40(1) 73–86
- [8] **Deng, M., Tian, M., Wang, Y., Wang, M.** 2020. Quantitatively evaluating the effects of flash fire exposure on the mechanical performance of thermal protective clothing, *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 32 No. 3, 412–429.
- [9] **Dai, J., Li, X.** 2022. Effect of different hole shape of thermal barrier on the performance for thermal protective clothing, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 51(2S) 2499S–2513S
- [10] **Huang, Q., Deng, M., Li, J.** 2022. Effects of ambient temperature step changes on the heat storage and release in thermal protective clothing, *Textile Research Journal*, 1-15, DOI: <https://doi.org/10.1177/00405175221101012>
- [11] **Shakeriaski, F., Ghodrati, M.,** 2022. Challenges and limitations of wearable sensors used in firefighters' protective clothing, *Journal of Fire Sciences*, 40(3), 214–245.
- [12] **Kuklane, K.,** 2021. New SUCAM of Smart Garments for Protection Against Heat and Flame, *Proceedings of 9th European Conference on Protective Clothing*, p.92.
- [13] **PD CEN/TR 17620:2021:** Guidelines for selection, use, care and maintenance of smart garments protecting against heat and flame
- [14] **Krzeminska, S., Szwedzinska, M.** 2022. PAH contamination of firefighter protective clothing and cleaning effectiveness, *Fire Safety Journal* 131 (2022) 103610
- [15] **Stec, A., Wolffe, T., Clinton, A.** 2020. Interim Best Practice Report Minimising Firefighters' Exposure to Toxic Fire Effluents, *Technical Report of University of Central Lancashire*.
- [16] **Bhattacharjee, S., Joshi, R. Chughtai, A.A., Macintyre, C.R.** 2019. Graphene Modified Multifunctional Personal Protective Clothing, *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6, 1900622, 1-27.
- [17] **Shaid, A., Bhuiyan, M.A.R., Wang, L.,** 2021. Aerogel incorporated flexible nonwoven fabric for thermal protective clothing, *Fire Safety Journal*, 125, 103444, 1-8.
- [18] **Noth, O.** 2021. Game-Changing Technology for Firefighter Protective Hoods, *Proceedings of 9th European Conference on Protective Clothing*, p.70.