

ELASTOMER ALTTAŞ ÜZERİNE UYGULANAN GÜMÜŞ NANOTEL FİMLERİN ISITMA PERFORMANSLARI

Büşra Rakop¹, T. Kerem Boy², A. Taner
Astarlıoğlu³, Nursev Erdoğan⁴
TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.,
Ankara

Almira Çaldıkoğlu⁵, Doğa Doğanay⁶, Şahin
Coşkun⁷, H. Emrah Ünal⁸
Nanovatif Malzeme Teknolojileri LTD. ŞTİ.
Ankara

ÖZET

Hava araçları için buzlanma uçuş kritik gereksinimler arasında olup tüm dünyada üniversite ve sanayi kuruluşları tarafından yoğun olarak çalışılmaktadır. Hava araçları bileşenlerinde buzlanma önleyici/giderici işlev çoğunlukla buzlanma giderici sıvılar ve elektromekanik sistemler tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca, son yıllarda elektrotermal sistemler üzerine çalışmalar bu sistemlerin enerji verimliliği ve yüksek performans çıktıları ile artmıştır. Bu çalışmada bir boyutlu (1B) gümüş nanomalzemenin yüksek ısıtma performansından yararlanarak yeni nesil buzdan koruma sistemi geliştirilmektedir. Çalışmada PET, Neopren ve Silikon alttaşlar üzerine ultrasonik püskürtmeli kaplama yöntemi kullanılarak gümüş nanotel filmler kaplanmış olup rastgele yönlenmiş filmlerin güç tüketimi ve performansları oda sıcaklığında ve -15 °C’de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Silikon alttaş ısı dayanım ve yüksek iletkenlik açısından sıklıkla kullanılan PET ve Neopren esaslı malzemeye göre yüksek ısıtma performansı sağlamaktadır. Silikon alttaşın yapısı içerisindeki F sayesinde polarizasyon kabiliyeti yüksektir. Bu da ısı iletkenliğine olumlu etki sağlamaktadır. Muadil ürünlerde sıklıkla kullanılan Neopren tipi kauçuk malzeme ise yapısındaki S’ün Ag ile etkileşime geçmesi nedeniyle performansı olumsuz etkilemiştir. PET alttaş üzerinde yapılan çalışmalar filmlerin belli ısıtma sürelerinde ısıtma performanslarının sabit olduğunu göstermektedir. Uygulanan voltaj artışı ile birlikte sıcaklık artmakta olup voltajdaki uygulama sınırının esnek elektroniklerin temel problemi olan kontakların çatlaması olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Buzlanma önleyici sistemler, Elektrotermal buzdan koruma sistemi, Joule etkisi, Nanomalzeme, 1 Boyutlu nanomalzemeler, Gümüş.

GİRİŞ

Havacılıkta geliştirilen tüm platformlar için en önemli motivasyon daha hafif ve verimli malzeme teknolojileri geliştirmektir. Buzlanma hava aracının performansını etkileyen en önemli gereksinimler arasında yer almaktadır. Buzlanmayı önlemek için çoğunlukla buzlanma önleyici sıvılar kullanılırken elektromekanik sistemler de özellikle askeri hava araçlarında kullanılan sistemlerdendir. Buzlanmayı önlemek için pasif yöntemler arasında olan süperhidrofobik kaplamalar üzerine de çalışmalar gerçekleştirilmektedir (Kulinich ve ark., 2011; Ozbay ve Erbil, 2016). Son yıllarda elektrotermal sistemler hafiflik ve yüksek performans nedeniyle tercih

¹ Mühendis, İnovasyon, E-posta: busra.rakop@tai.com.tr

² Mühendis, Uçak sistemleri, E-posta: turankerem.boy@tai.com.tr

³ Mühendis, İnovasyon, E-posta: aziztaner.astarlioglu@tai.com.tr

⁴ Dr., Uzman Mühendis, İnovasyon, E-posta: nursev.erdogan@tai.com.tr

⁵ Mühendis, E-posta: caldiklioglu@almira@gmail.com

⁶ Kurucu Ortak, E-posta: doganay@metu.edu.tr

⁷ Dr., Kurucu Ortak, E-posta: sahincoskun@gmail.com

⁸ Prof. Dr., Genel Müdür, E-posta: unalan@metu.edu.tr

edilmektedir. Uzun yıllar boyunca ısıtıcı eleman olarak nikel-krom ve kantel temelli malzemeler kullanılırken bu malzemelerin düşük korozyon direnci sebebiyle Grafit gibi karbon temelli malzemeler üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır (Wang ve ark., 2018). Bu ısıtıcılar gelişen teknoloji ile hergün yeni bir kullanım alanı bulmaktadır. Ancak bu malzemeler çok yüksek güç tüketimi yanı sıra sınırlı uygulama geometrilerine sahip oldukları için daha geniş tasarım çözümleri sunan nanomalzemelere yoğunlaşmıştır. Literatürde karbon nanotüp ve Grafen üzerine pek çok çalışma yer almaktadır. Ancak bu malzemeler henüz üretim açısından endüstriyel seviyelere erişememiş olup oldukça maliyetlidirler. Bunların yanı sıra ince film kaplama şeklinde uygulanan çeşitli katkılanmış oksitler, soy metaller ve hibrit yapılar da oldukça verimli çözümler sunmaktadırlar (Ko ve ark., 2016). Bu malzemeler arasında gümüş iyi bir iletken ve optik bantta geçirgenlik özelliği sayesinde ince film buzdan koruma sistemleri arasında yenilikçi malzemelerden biri olmaya adaydır. Son yıllarda esnek alttaşlara da kaplama fırsatı sunan 1B nanomalzemenin birbiriyle boşluksuz teması sonucu elde edilen tasarımlar ilgi çekmektedir. Bu yapıların uygulama kolaylığı ve daha az malzeme kullanarak daha yüksek performans sağlaması en önemli avantajlarıdır.

Karbon nanotüp (KNT) ve Grafen kullanılarak elde edilen yapıların buzdan koruma performansları üzerine oldukça fazla çalışma gerçekleştirilmiştir. Ne var ki Grafen ve KNT temelli sistemlerin tüp-tüp temas noktalarında ve grafen pulcuklarının tane sınırlarında elde edilen yüksek düzlemsel direnç bu aygıtların ısıtıcı performanslarını etkilemekte bu sebeple söz konusu malzemeler kullanılarak üretilen ısıtıcılarda ortalama 40 V besleme altında ancak 140 °C gibi sıcaklıklara ulaşılmaktadır (Jung ve ark., 2013). Ayrıca bu malzemelerin esnek yüzeylere kaplanması için oluşturulan süspansiyonlarda da sorunlar yaşanmaktadır. Bu sorunları elimine etmek için kullanılan fonksiyonelleştirici malzemeler ise ısıtma performansını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca yüksek miktarda grafen üretimini sağlayan çözelti temelli metotlar GO indiregemesiyle gerçekleştirilmektedir. İndirgenemeyen GO ise malzemenin elektriksel özelliklerini olumsuz yönde etkiler.

Gümüş nanoteller ise hem ısıtıcı performanslarının yüksek olması hem de esnek yüzeylere çözelti esaslı metotlar kullanılarak düşük sıcaklıkta kolaylıkla kaplanabilmeleri nedeniyle öne çıkmaktadır. Önceleri şeffaf iletken elektrot malzemesi olarak araştırılan gümüş nanotellerin Celle ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ısıtıcı olarak da kullanılabileceği gösterilmiştir (Celle ve ark., 2012). Gümüş nanotel kullanılarak elde edilen ısıtıcıların 275 °C sıcaklığa çıktığı tespit edilmiştir (Ergun ve ark., 2016). Ne var ki gümüş nanotellerin kararlılığı diğer alternatiflerine göre düşüktür. Oksidasyonu engellemek için genellikle koruyucu kaplamalar kullanılmaktadır. Ayrıca oksijen afinitesi düşük çeşitli metalik bariyer kaplamalar üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Bu tip ince koruyucu kaplamaların yanı sıra sandviç yapılar da çözümler arasındadır. Esnek elektroniklerde kontakt tasarımı yine tekniğin üzerine çalıştığı konular arasındadır. İnce film temelli elektronik aygıtlarda sıklıkla kullanılan gümüş pastalar eğilme esnasında yüzeyden ayrılarak elektrik iletkenliğine olumsuz etki yaratmaktadırlar. Bu kısımla ilgili gerilmeleri en aza indirgeyecek çalışmalar çözüm sunmaktadır.

Bu çalışmada gümüş nanotellerin havacılık sektörüne uygun altlıklar üzerine kaplanması ile elde edilen ısıtıcıların performansları çalışılmıştır. PET, Neopren ve Silikon temelli alttaşlar üzerine yapılan kaplamalar üzerine ısı performans karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ısı performanslar morfolojik incelemeler ile kıyaslanmıştır. Kaplamaların termal performansları oda sıcaklığında ve -15 °C'de test edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında koruyucu kaplama ve sandviç yapı için de karşılaştırma çalışması gerçekleştirilmiştir.

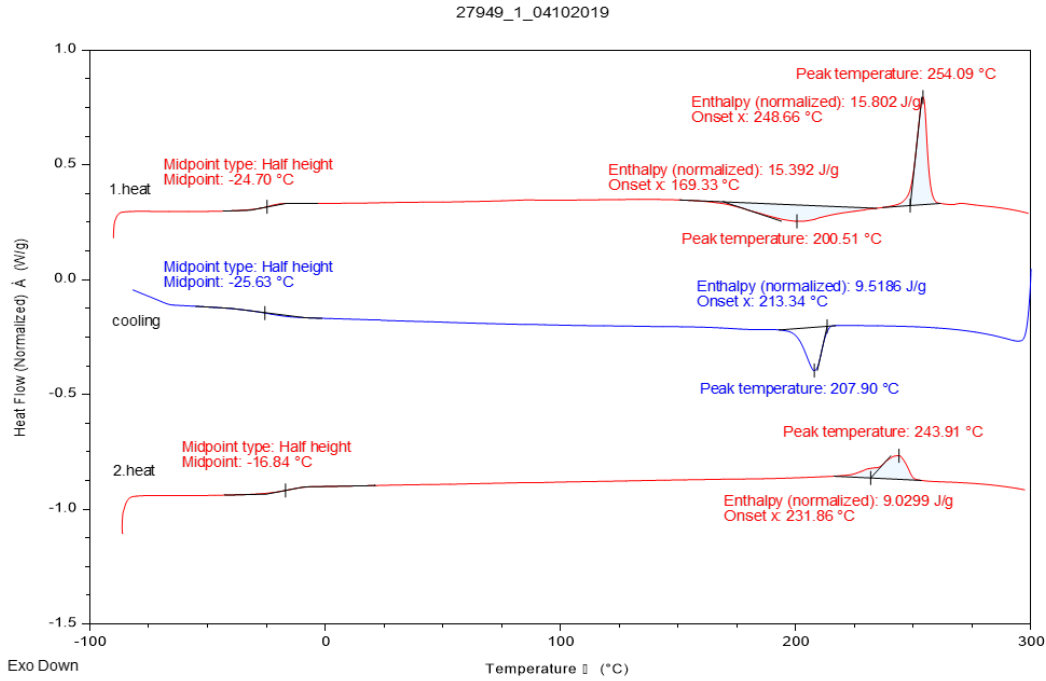
YÖNTEM

Gümüş nanoteller Polyol yöntemi kullanılarak üretilmiştir (Coskun ve ark., 2011). Üretim esnasında gümüş kaynağı olarak AgNO₃, stabilize edici polimer olarak polyvinylpyrrolidone (PVP, MW=55000) ve hem çözücü hem de indirgeyici olarak da etilen glikol (EG) kullanılmıştır. Üretilen gümüş nanoteller tekrarlı santrifüj yöntemi ile saflaştırılarak yan ürünlerden ayrılmıştır. Isıtılan alttaşlar sprej kaplama yöntemi ile kaplanmıştır (Coskun ve ark., 2013). Gümüş nanotel çözeltisi azot ile beslenen spray tabancası ile 10 cm mesafeden 110 °C sıcaklıktaki 10 cm x 10 cm alanlı Silikon ve Neopren altlıklar üzerine püskürtülmüştür. Gümüş nanotellerle kaplanan PET malzeme üzerinde epoksi bazlı bir reçine kullanılarak püskürtülerek kaplama ve damlatarak kaplama olarak iki farklı yöntem denenmiştir. Daha sonrasında koruyucu kaplama yerine sandviç yapı ile nanotellerin

korunması için kaplama yapılan floroelastomer herhangi bir işleme maruz bırakılmayan Silikon alttaş yine Silikon bazlı bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Silikon ve kauçuk malzemeler kontakları sabitlenmek için kontaklama yapıldıktan sonra 10 dakika süre ile 100 °C'ye ısıtılmış ve kontaklar arası dirençler ölçülmüştür. Gümüş nanotel kaplanmış PET, kauçuk ve Silikon kumaşların voltaja göre sıcaklık değişimleri kontrol edilmiştir. Kauçuk alttaşa diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizi yapılmıştır. Kaplamalara Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) ve kauçuk üzerine kaplanmış filme X-Işını Kırınım (XRD) analizi yapılmıştır. Termal karakterizasyon için PET film üzerinde kontak bantları ile oda sıcaklığında 5 V, 10 V, 15 V ve 20 V uygulanarak 4 farklı noktadan sıcaklık ölçümü alınmıştır. -15 °C'de ise 15 V ve 20 V uygulanarak sıcaklıklar kaydedilmiştir.

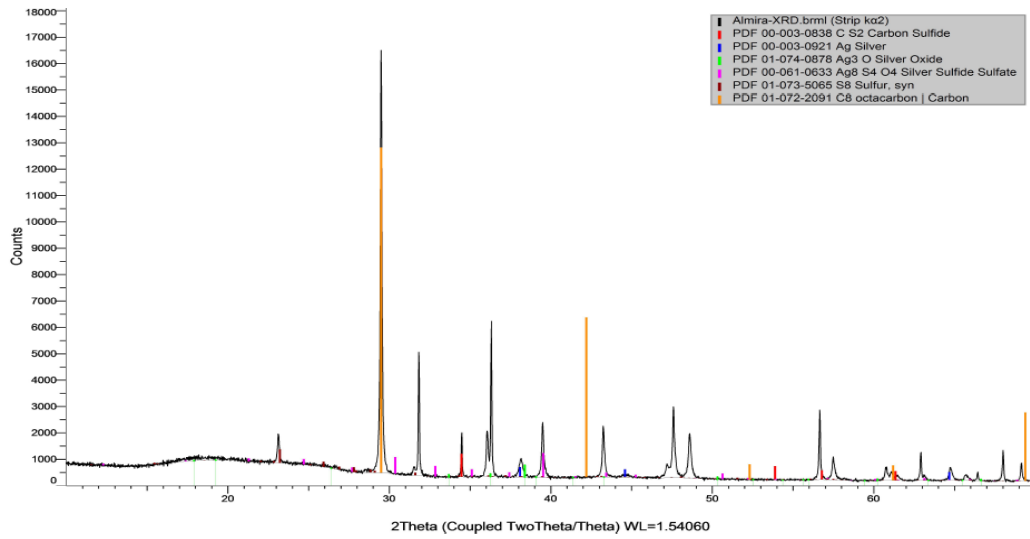
UYGULAMALAR

Şekil 1'de Neopren kauçuk üzerine yapılan DSC analizi gösterilmiştir. İlk ısıtma eğrisi üzerinde kırmızıyla işaretlenen bölge ısı akışındaki küçük değişimi göstermektedir. Bu değişim, kumaşın yüzeyinde erimenin başlamasıyla ilişkilendirilmiştir. Yüzeyde başlayan erimenin SEM analizinde gözlemlenen balçık görüntüsüne sebep olduğu düşünülmektedir. Yarı kristal malzemelerde sıcaklık artışıyla öncekilerden farklı yeni kristal yapılar oluşması soğuk kristallenme olarak adlandırılmaktadır. Kauçuk alttaşa 170 °C'de soğuk kristallenme başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, malzemenin ısınma-soğuma prosesleri esnasında kararlılığını oldukça etkilemektedir.



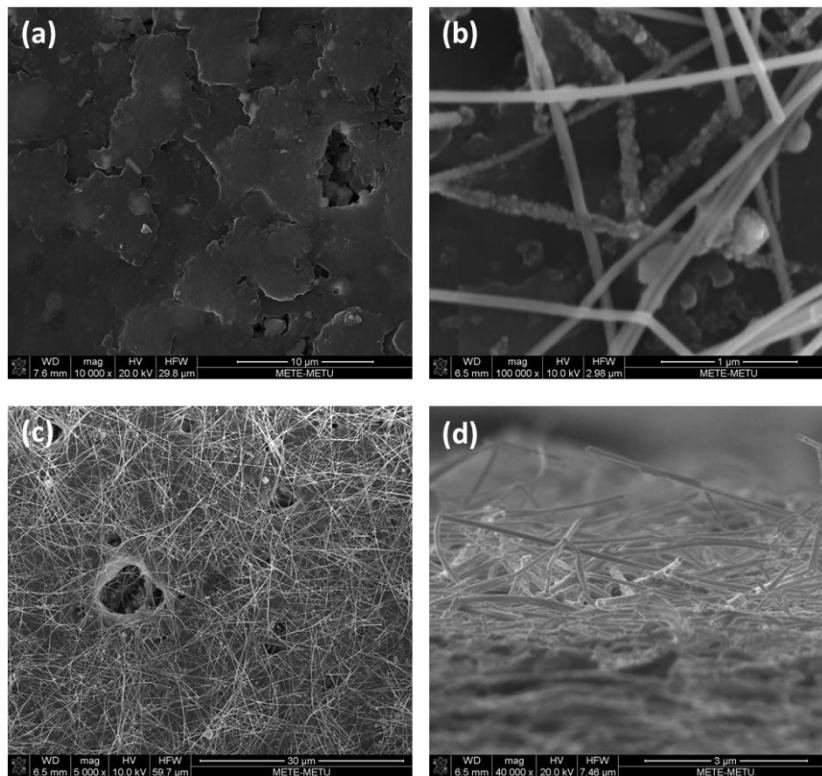
Şekil 1: Kauçuk alttaş malzemesinin DSC analizi sonucu.

Şekil 2'de Neopren kauçuk üzerine yapılan XRD analizi verilmektedir. Gümüş malzemenin ince film şeklinde kaplanması altlık malzemeye ait C türevi fazlara oranlı daha düşük şiddette pikler oluşmasına neden olmaktadır. XRD analizi sonucunda, 2θ değeri 39.7° olan Gümüş Sülfür (Ag₂S) piki gözlemlenmiştir. Bu durum, kauçuk alttaşın yüzeyinde, gümüş ve sülfür arasında tepkime gerçekleştiğini göstermektedir. Aynı zamanda, kaplama esnasında alttaşın 100 °C'ye ısıtılmasının tepkimeyi tetiklediği ve yüzeydeki gözle görünür balçık görüntüsüne sebep olduğu düşünülmüştür. XRD analizi esnasında Ag₃O fazına da rastlanmıştır. Bu da koruyucu kaplama olmaksızın yüzeylerin oksitlendiğini göstermektedir. Termodinamik olarak da Ag'nin oksitlenme eğilimi bilinmektedir. Ancak Ag sıcaklık ile birlikte yüzeyindeki çok ince oksit tabakayı atmaktadır. Yine de koruyucu kaplama kullanılarak oksitlenme engellenebilmektedir.



Şekil 2: Gümüş nanotellerle kaplanmış kauçuk alttaşın XRD analizi sonucu.

Şekil 3’de Neopren yüzeyi (Şekil 3 (a) ve üzerine kaplanmış gümüş nanotellerin yüzey (Şekil 3 (b) ve (c)) ve kesit (Şekil 3 (d)) morfoloji görüntüleri verilmektedir. Şekil 3 (b)’da yüzeyde oluşan gümüş sülfid yapılar olduğu düşünülen pürüzlü katman farkedilmiştir. Yapıların alttaş üzerinde tam olarak yapışmamış olduğu ve ayrıca alttaş yüzeyinin pürüzlü davranışı sebebiyle gümüş ağ yapısında iletkenliğe zarar verecek boşluklar gözlemlenmiştir (Şekil 3 (c) ve (d)).

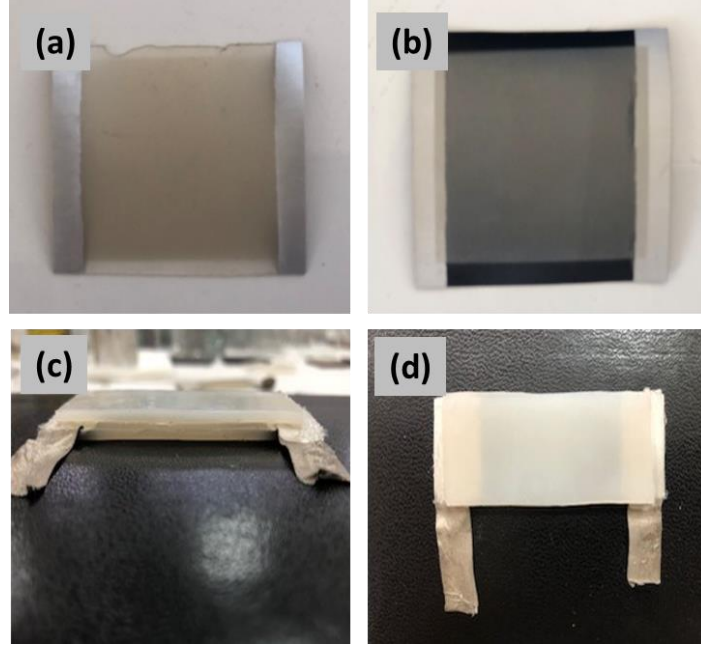


Şekil 3: SEM görüntüleri (a) kauçuk yüzey, (b) kauçuk alttaş yüzeyine kaplanan ince filmin a) 100 000, b) 25 000 ve c) 5 000 büyütmedeki SEM görüntüleri.

Morfolojik analiz sonuçları Ag ağ yapıların Neopren kauçuk üzerine bu yöntem ile kaplanmasının elektronik aygıtlar için uygun olmadığını göstermektedir.

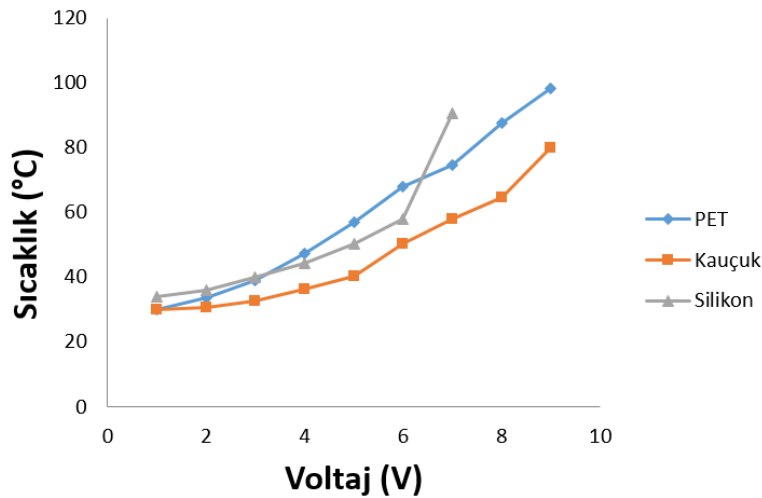
Silikon altlık sıcaklık dayanımı testine tabi tutularak 120°C sıcaklığa dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Silikon alttaş içerisinde S bulunmamaktadır. Neoprene göre oldukça düzgün yüzeyi olan Silikon üzerinde nanomalzeme tutunması daha yüksektir. Neopren ve Silikon malzeme kullanılarak

hazırlanan kupon boyuttaki elektrotermal sistemlere ait görüntüler Şekil 4'de verilmektedir. Şekil 4 (a) ve (b) koruyucu kaplama uygulanmış yapıları gösterirken Şekil 4 (c) ve (d) sandviç yapıyı göstermektedir. Filmlerin yüzeylerinde koruyucu filmler hem püskürterek kaplama hem de damlatarak kaplama yöntemlerinde nanoteller için gerekli koruma sağlanmıştır. Ancak iki yöntem uygulamasında da yüzeyde damla veya çizgi şeklinde izler bıraktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Silikon ve kontak malzemesi gerilme farklarından kaynaklı olarak kontak yüzeyden kalkmaktadır. Bu nedenle sandviç yapı üretilmiştir. İki Silikon alttaş kullanılarak üretilen sandviç yapıya ait görüntüler ise Şekil 6'da verilmektedir. Kontaklar arası direnç Neopren kauçuk kumaş için 25Ω , Silikon kauçuk kumaş için ise 11Ω olarak ölçülmüştür. Direnç ölçümü de filmlerin kalite farkını ortaya koymaktadır.



Şekil 4: Gümüş nanotel kaplanmış ve kontaklanmış (a) Silikon (koruyucu katman uygulanmış) (b) Neopren (koruyucu katman uygulanmış) (c) ve (d) Silikon sandviç yapı sırayla kesit ve yüzey görüntüleri.

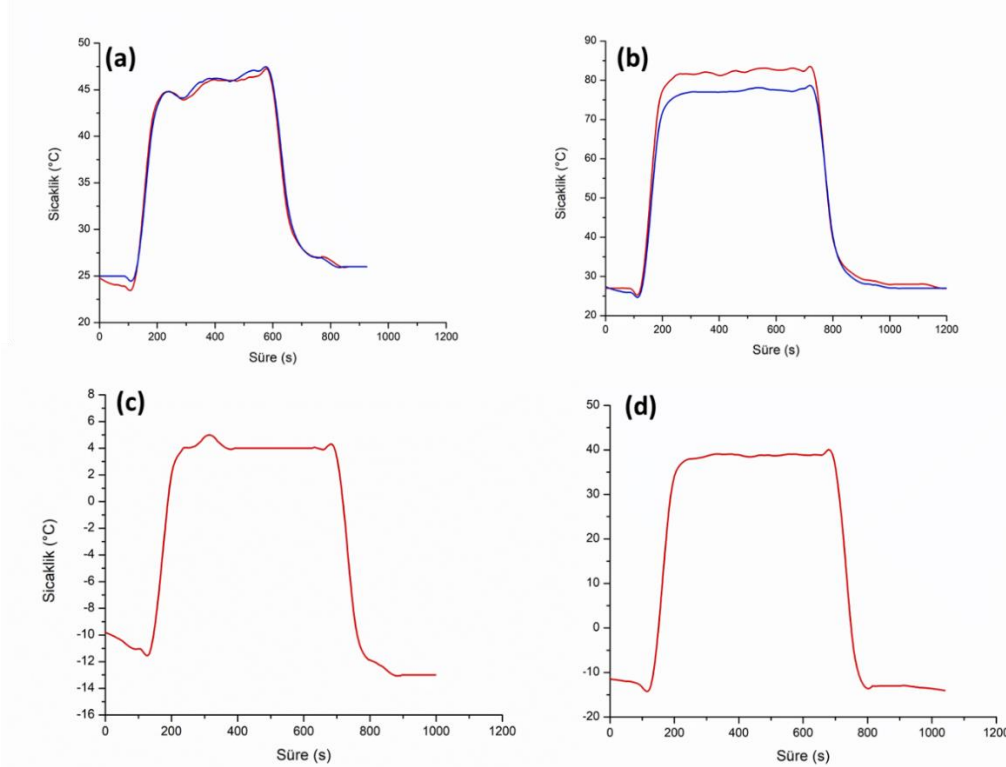
Kontaklama yapıldıktan sonra PET, kauçuk ve Silikon alttaşların voltaja bağlı sıcaklık değişimleri Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 5: Gümüş nanotel kaplanmış PET, kauçuk ve Silikon kumaşların voltaja göre sıcaklık değişimleri.

PET film 9 V'da 98 °C'ye ulaşmıştır. Diğer taraftan kauçuk kumaşın 9 V'da 80 °C'ye ulaştığı ve voltajın yükselmesiyle kontak malzemesinin zarar gördüğü gözlenmiştir. Bu durum kontak pastası ile kauçuk altlığın yeterince uyumlu olmamasına ve kaplama ile kontak arasındaki zedelenmeye bağlanmıştır. Son olarak, Silikon kumaş 7 V'da 90 °C'ye ulaşmıştır, ancak kontaklardaki çatlamalardan dolayı voltaj artırımına devam edilmemiştir. 7 V'daki değerler kıyaslandığında en yüksek sıcaklık Silikon alttaş malzeme ile sağlanmıştır. Malzeme içerisindeki F içeriği sayesinde polarizasyon kabiliyeti kazanan alttaş malzemenin ısı iletkenliği önemli ölçüde artmıştır.

Oda sıcaklığında voltaj değişimine göre termal performans PET üzerine kaplanmış ısıtıcılara 10 V, ve 20 V uygulanarak incelenmiştir (Şekil 6). 5 V ve 15 V değerleri de okunmuş şekilde verilmemiştir. 5V uygulamada gözlenen sıcaklık 30°C civarı iken 20V için 75°C olarak kaydedilmiştir. Örneklerin sıcaklık zaman grafikleri hızla ısıtılarak voltaj kesildiğinde tekrar hızla soğuma davranışlarını doğrulamaktadır.

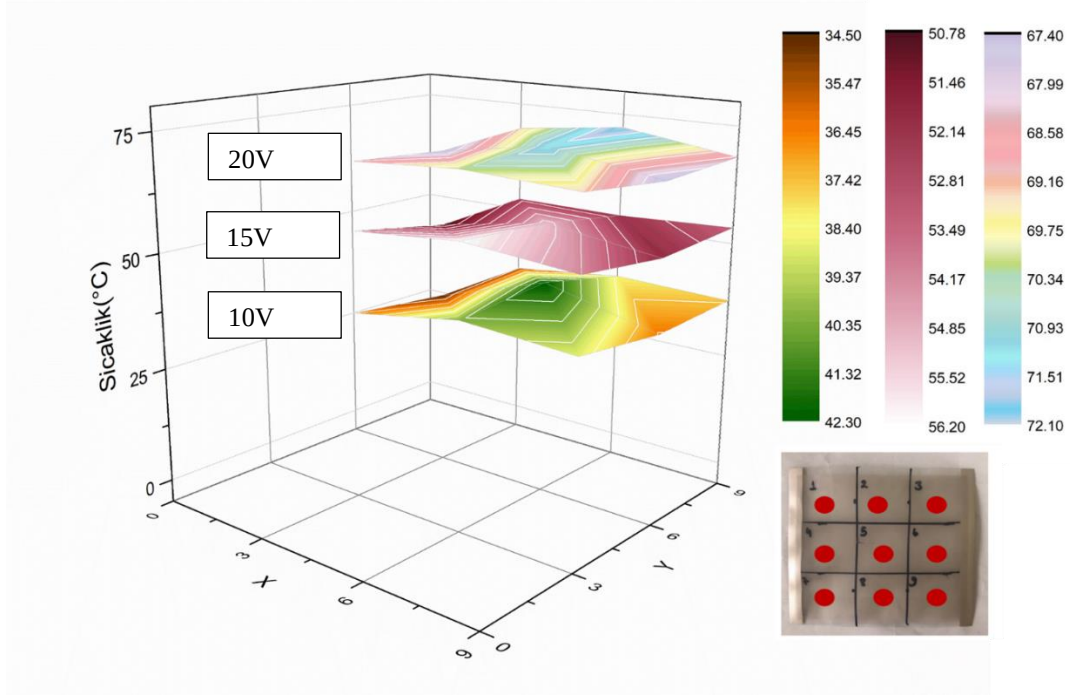


Şekil 6: Oda sıcaklığında (a) 10V altında ve (b) 20V altında ve -15°C'de (c) 10V altında ve (d) 20V altında PET film üzerindeki zamana bağlı sıcaklık değişimi.

10 V besleme esnasında sıcaklıktaki dalgalanma 20 V'a göre daha fazladır. Bu durum filmin direncinin 10 V için yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Geçen akım 20 V beslendiğinde daha yüksektir. Tekrar edilen ölçümde 20 V besleme ile yapılan deneyde sıcaklığın düştüğü görülmüştür (Şekil 6 (b)). Bunun nedeni çıkılan sıcaklıkta gümüş nanotellerin hasar görmesi olarak düşünülmektedir. Konunun aydınlanması için malzeme karakterizasyonu testlerinin voltaj verildikten sonra tekrarlanması gerekmektedir. Şekil 6 (c) ve (d)'de aynı örnekler voltaj değişimine göre termal performans testi -15 °C'de gerçekleştirilmiştir. -15 °C'de 10 V besleme sonrası 4 °C'ye çıkılabildiği Şekil 6 (c)'da gösterilmiştir. Şekil 6 (d)'de 20 V ile bu değerin 40 °C'ye çıkarılabildiği görülmektedir.

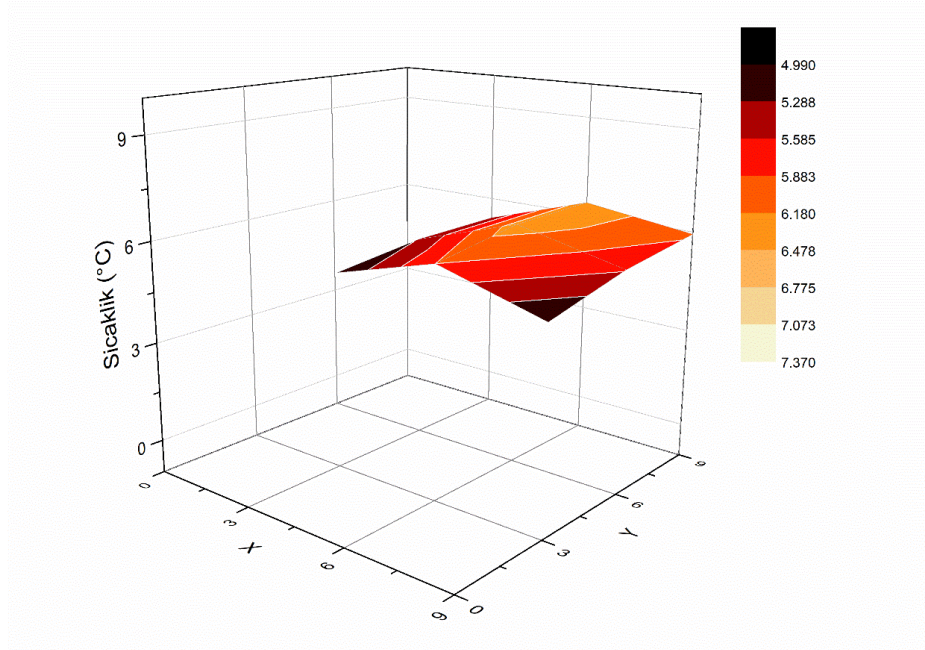
PET alttaş yüzeyine kaplanan ince filmin 10 V, 15 V ve 20 V altında pozisyona bağlı sıcaklık ölçümleri Şekil 7'da gösterilmiştir. 10 V'da 34 ve 42 °C arasında değişim gösteren sıcaklık 15 V için 50 ve 56 °C iken 20 V potansiyel fark sonucunda 67 ve 72 °C arasında belirlenmiştir. Voltajdaki

artış ile birlikte sıcaklıktaki oynama da azalmaktadır. Voltaj artışı ile birlikte örneklerdeki direnç sabit olduğu için akım artışı gerçekleşmektedir. Voltaj testleri termal performansın en iyilenmesi için akımın artırılması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 7: PET alttaş yüzeyine kaplanan ince filmin 10V, 15V ve 20V altında pozisyona bağlı sıcaklık değişimi.

Şekil 8’de 7 V potansiyel fark uygulaması ile Silikon alttaş üzerinde kaydedilen sıcaklık değişimleri gösterilmektedir. 5 ve 7 °C arasında değişim gösteren direnç değerleri belirlenmiştir. Hem PET hem de Silikon alttaş uygulamalarında yüksek sıcaklıklar örneğin orta kısımlarında okunmuş olup uç kısımlara doğru sıcaklık düşmektedir. Sıcaklık artışının akımla doğrudan ilişkili olmasının yanı sıra direnç değerlerindeki değişimle de sıcaklıkta oynamalar gerçekleşmektedir. Kontak atılan bölgenin etrafındaki sıcaklık değerlerinin diğer bölgelere nazaran düşük olduğu gözlenmiştir. Burada kontak bölgelerindeki direncin düşüklüğü elde edilen termal enerjide düşmeye neden olmuştur. Konu kapsamında daha detaylı araştırma yapılması gerekmektedir.



Şekil 8: Gümüş nanotelle kaplanan FKM alttaşın pozisyona bağlı direnç dağılımı.

SONUÇ

Gümüş nanotel temelli ısıtıcılar PET, Neopren ve Silikon attaş mazlemeler üzerine ultrasonik püskürtmeli kaplama yöntemi kullanılarak uygulanmıştır. Sıklıkla kullanılan Neopren alttaşın içeriğindeki S nedeniyle gümüş filmlerin ısıtma kabiliyetine olumsuz etki yarattığı gözlenmiştir. Floroelastomer temelli Silikon alttaşın sıcaklık dayanımı ve polarizasyon kabiliyeti ile yüksek termal iletkenlik sağlaması Silikonun iyi bir alttaş alternatifi olduğunu göstermektedir. Ancak Silikon alttaş üzerine kontak atılması için alternatif bazı yapıştırma stratejileri denenmelidir. Zira bu alttaş üzerinde elastik davranışı farklı olan kontak malzemesi tutunmamaktadır. Filmlerin oksitlenme davranışı koruyucu tabaka ve sandviç yapılar kullanılarak engellenmeye çalışılmıştır. PET üzerindeki filmlerde değişen Voltaj değerlerine bağlı olarak 10 cm x 10 cm alanda sıcaklık değişimleri düşük bir aralıkta kalmaktadır. Voltaj arttıkça sıcaklık aralığı düşmektedir. Benzer çalışma Silikon altlık üzerinde 7 V ile yine homojen ısıtma davranışı elde edildiğini göstermektedir. Bu sonuç gümüş nanotel filmlerin homojen kaplandığını ve kontakların kontrollü olarak uygulandığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre ağırlık ve enerjiden tasarruf sağlayarak buzdan koruma gerçekleştirilebilir. Çalışmanın devamı kapsamında sistemin uçak kanadına entegre edilmesi ve test kuponundan büyük boyutlu yapıdaki sistemlerde testlerin gerçekleştirilmesi üzerine çalışmalar sürdürülmektedir.

Kaynaklar

- Celle, C., Mayousse, C., Moreau, E., Basti, H., Carella, A., Simonato, J.-P., 2012. *Highly flexible transparent film heaters based on random networks of silver nanowires*, Nano Research Cilt.5, s.427–433
- Coskun, S., Ateş, E. S., Unalan H. E., 2013. *Optimization of silver nanowire networks for polymer light emitting diode electrodes.*, Nanotechnology, Cilt.24, 125202
- Coskun, S., Aksoy, B., Unalan H. E., 2011. *Polyol synthesis of silver nanowires: An extensive parametric study*, Crystal Growth & Design Cilt.11, s.4963-4969
- Ergun, O. Coskun, S., Yusufoglu, Y., Unalan, H. E. 2016. *High-performance, bare silver nanowire network transparent heaters*, Nanotechnology, Cilt.27, 44
- Jung, D., Han, M., Overzet, L. J., Lee, G., S., 2013. *Effect of hydrogen pretreatment on the spin-capability of a multiwalled carbon nanotube forest*, Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, Cilt.31, 06F102
- Ko, E.-H., Kim, H.-J., Lee, S. J., Lee, H.-J., Kim, H.-K., 2016. *Nano-sized Ag inserted into ITO films prepared by continuous roll-to-roll sputtering for high-performance, flexible, transparent film heaters*, RSC Advances, Cilt.6, s. 46634-46642
- Kulinich, S. A., Farhadi, S., Nose, K., Du, X. W., 2011. *Superhydrophobic surfaces: Are they really ice-repellent*, Langmuir, Cilt.27, s.25-29
- Ozbay, S., Erbil, H Y., 2016. *Ice accretion by spraying supercooled droplets is not dependent on wettability and surface free energy of substrates*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Cilt.504, s.210-218
- Wang, T., Zheng Y., Raji, A.-R. O., Li, Y., Sikkema, W. K. A., Tou, J. M., 2016. *Passive anti-icing and active deicing films*, ACS Appl. Mater. Interfaces, Cilt.8, s.14169-14173