

GÜNEŞ PANELLERİNDE POLİMER KOMPOZİT MALZEME KULLANIMI İLE OPTİMUM ISI TRANSFERİ PERFORMANSININ ELDE EDİLMESİ

Talha Batuhan KORKUT ^{*ID}

Aytaç GÖREN ^{*ID}

Alınma: 23.04.2022; düzeltme:04.12.2022; kabul: 05.12.2022

Öz: Fotovoltaik (FV) modüller, üzerine düşen güneş ışınlarından elektrik üretimini sağlayan ve yüzeyinde birden çok FV hücre bulunan yapılardır. FV hücreler, sadece direkt gelen ışınları değil, yüzeye gelen tüm ışığın belirli dalgaboyu aralığını enerji üretimi için kullanabilirler. FV modüller, yapıları gereği sıcaklıkları, ortam sıcaklığına kıyasla daha fazla olmakta ve bu durum FV hücrelerin elektriksel verim ve güç üretim düşümüne neden olmaktadır. Bu sebeple, FV modüllerde depolanan ısı enerjisinin dışarıya transferi konusunda akademik çalışmalar son yıllarda ivme kazanmıştır. Örneğin, FV modüllerden ısı enerjisi elde edilerek sıfır enerji tüketim hedefi altında konutların ısıtma yükü karşılanmakta ve ilerleyen çalışmalar ile birlikte sistem/enerji verimi artırılmaktadır. Bu çalışma, FV modüllerin ısı iletim performansının geliştirilmesine yönelik polimer esaslı takviye malzemelerin kullanımı ile oluşturulan kompozit yapılar incelenerek, FV modülde depolanan ısı enerjisinin azaltılmasını hedef almıştır. Bu amaçla, takviye malzemeler araştırılmış ve karbon, cam elyaf, aramid (kevlar) takviye malzemelerinin iki farklı parametre altında araştırılması uygun görülmüştür. Bu iki parametre, herbir takviye malzemenin farklı tabaka kalınlıklarındaki ve birbirleri ile oluşturduğu hibrit yapıdaki sahip oldukları ısı iletim performansını araştırmaktadır. Araştırma sonucunda karbon elyaf takviye malzemesi ile oluşturulan yapının $6,51 \text{ W/mm}^2$ ısı akısı ile birlikte optimum yapı olduğu elde edilmiştir. Isı iletim performansında karbon elyafı cam elyaf ($0,013 \text{ W/mm}^2$) ve aramid (4.10^{-4} W/mm^2) takip etmiştir. Bu araştırma polimer kompozit malzemeler ile lamine edilmiş FV modül ve konvansiyonel tip FV modül arasındaki ısı akısı farkını $0,0242 \text{ W/mm}^2$ olarak elde ederek FV modüllerden elde edilebilen ısı enerjisinin arttırımına katkıda bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik hücre, Isı akısı, Isıl iletim, Laminasyon, Polimer kompozit malzeme

Investigation of Optimum Heat-Transfer Performance Using Polymer Composite Materials on Solar Panels

Abstract: Photovoltaic (PV) modules are structures that produce electricity from the sun's rays falling on them and have more than one PV cell on their surface. PV cells can use not only direct rays, but also a certain wavelength range of all light coming to the surface for energy production. Due to their nature, PV modules have a higher temperature compared to the ambient temperature, which causes a decrease in the electrical efficiency and power generation of the PV cells. For this reason, academic studies on the transfer of heat energy stored in PV modules to outside have gained momentum in recent years. For example, by obtaining heat energy from PV modules, the heating load of the houses is met under the target of zero energy consumption, and the system/energy efficiency is increased with further work. This study aimed to reduce the heat energy stored in the PV module by examining the composite structures formed using polymer-based reinforcement materials to improve the heat conduction performance of PV modules. For this purpose, reinforcement materials were investigated, and it was found appropriate to investigate carbon, glass fiber, aramid (Kevlar) reinforcement materials under two different parameters. These two parameters investigate the heat conduction performance of each reinforcement material in

* Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 35390 Buca/İzmir
İletişim Yazarı: Talha Batuhan KORKUT (tbatuhankorkut@outlook.com)

different layer thicknesses and in the hybrid structure formed with each other. As a result of the research, it has been obtained that the structure formed with carbon fiber reinforcement material is the optimum structure with a heat flux of 6.51 W/mm^2 . In heat conduction performance, carbon fiber was followed by glass fiber (0.013 W/mm^2) and aramid (4.10^{-4} W/mm^2). This research contributed to the increase of the heat energy that can be obtained from PV modules by obtaining the heat flux difference between the PV module and the conventional type of PV module laminated with polymer composite materials as 0.0242 W/mm^2 .

Keywords: Heat conduction, Heat flux, Lamination, Photovoltaic cell, Polymer matrix composite

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzeme anlamına gelmektedir. Her bir bileşen genelde özelliklerini koruyabilmektedir. Bu sebeple farklı bileşenler kullanılarak farklı kimyasal yada fiziksel özelliklere sahip kompozit malzemeler elde edilebilmektedir (Rosato, 1997), (Zimmerli ve diğ., 2010). Kompozit yapıdaki her bir bileşende genelde iki tip madde bulunur. Bunlar matris ve takviye malzemesi olarak isimlendirilir. Matris ve takviye malzemeyi birbirinden ayıran unsur ise farklı fiziksel özelliklere sahip olmasıdır. Takviye malzemesi, yapıda, dayanımı esas sağlayan kısım, taşıyıcı bir görev üstlenir. Matris ise takviye malzemelerini bir arada tutmaya yardımcı olur. Ek olarak takviye malzemesi, ilgili yapıda termal genleşme katsayısı, iletkenlik, ve termal taşınım gibi diğer bütün özelliklerin belirlenmesinde baskın bir rol oynamaktadır. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları Tablo 1’de belirtilmiştir. Bu doğrultuda kompozit malzemeler genel olarak hafiftir, yüksek dayanıma sahiptir, karbon lifler hariç düşük elektrik iletkenliği ve termal genleşmeye sahiptir. Bunun yanında kompozit malzemelerin maliyetleri yüksektir, darbelere karşı hassastır, kullanılacağı sıcaklık aralığı düşünülmelidir ve düşük sünekliğe sahiptir (Balasubramanian, 2014), (Srivatsan, 1995), (Matthews ve Rawlings, 1999).

Tablo 1. Polimer kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları (Srivatsan, 2014), (Matthews, 1999)

| Avantaj | Dezavantaj |
|--|----------------------------------|
| Hafif | Malzeme maliyeti |
| Yüksek dayanım, sertlik | Düşük süneklik |
| Düşük elektrik iletkenliği (karbon lifler hariç) | Darbelere karşı hassasiyet |
| Düşük termal genleşme | Kullanılabildiği sıcaklık limiti |

Karbon fiberler çapı yaklaşık 5 ile 10 mikrometre (μm) olan ve çoğunlukla karbon atomlarından oluşan fiberlerdir. Karbon fiberlerin kullanım alanlarına göre çeşitli fiziksel özellikleri bulunmaktadır. Bunlar, yüksek sertlik, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek sıcaklık toleransı ve düşük termal genleşme (Bhatt ve Goe, 2017). Bu sebeple karbon fiberler diğer takviye malzemelere kıyasla daha geniş alanda kullanılmaktadır ve nispeten pahalıdır. Karbon fiberler yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahiptir. Karbon fiberlerin lif düzeni ve fiber uzunluğu gibi fiziksel parametreler üzerinde değişen termal iletim performansı bulunmaktadır. Karbon fiberler tiplerinin ortalama termal iletim katsayısı 260 W/mK olduğu sonucuna erişilmiştir (Fukai ve diğ., 2000), (Park ve Shim, 2010). Cam elyaf, çok ince cam telciklerinden üretilen bir maddedir. Isı yalıtımı ile dokuma ürünlerinde yaygın olarak kullanılır. Cam elyaf türlerinden birisi ise E-cam’dır ve

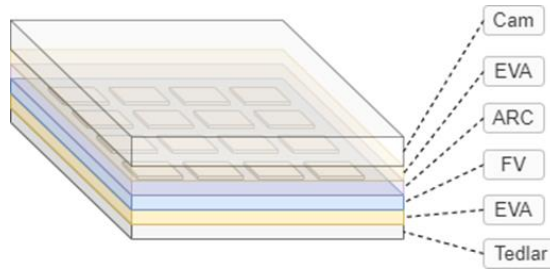
elektriksel yalıtımda kullanılmaktadır. Cam elyaflar multifilament demetler halinde üretilir. Filament çapları 3 ila 20 mm arasında değişmektedir. Cam elyafların termal ve elektriksel iletkenlikleri düşüktür ve cam elyaf takviyeli polimer matris kompozitler (PMK) genellikle termal ve elektrik yalıtkanları olarak kullanılır. Ayrıca cam elyafların termal genleşme katsayısı da çoğu metalle karşılaştırıldığında düşüktür. Cam elyafların ortalama termal iletim katsayısı 0,9 W/mK olduğu sonucuna erişilmiştir (Zweben, 2005), (Tavman ve Akinci, 2000). Aramid ya da ticari ismi ile Kevlar (DuPont), ısıya dayanıklı ve güçlü bir sentetik elyaftır. İlk olarak 1965 yılında DuPont firmasında geliştirilmiştir. Kısa bir süre sonra yüksek mukavemetli malzeme olarak ticari lastiklerde çeliğin yerini almıştır (Mera ve Takata, 2000). Kevlar, yüksek çekme mukavemeti-ağırlık oranı nedeniyle bisiklet lastiklerinden yarış yelkenlerine, kurşun geçirmez yelekler kadar birçok uygulamaya sahiptir. Aramid takviye malzemelerinin termal iletim katsayıları 1.10^{-5} ile 4 W/mK arasında değişmektedir (Barucci ve diğ., 2005), (Ventura ve Martelli, 2009).



Şekil 1:

Polimer kompozit malzeme üretimi için kullanılan aramid, karbon, ve cam elyaf takviye malzemelerin görüntüleri (Asmutlu ve diğ. 2018)

Dünyada giderek artan enerji ihtiyacı neticesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına olan talep artmaktadır. Bu enerji kaynaklarının başında güneş enerjisi gelmektedir. Fotovoltaik (FV) modül, üzerine düşen fotonları kullanarak elektrik üretebilen yapılardır. Silikon fotovoltaik hücrelerin dayanımı, kristal yapıları nedeniyle düşüktür. Bu sebeple güneş hücrelerinin son kullanıcıya sunulmadan önce, operasyonel anlamda kullanım ömrünün arttırımı için takviye yapılar kullanılır. Bu durum, kullanımda, sürdürülebilirlikte, ve ömründe avantaj olsa da elektriksel verimi açısından dezavantajları da bulundurmaktadır. FV hücreler, yapıları gereği sıcaklıkları arttıkça üzerine düşen güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüşüm oranları da azalmaktadır (Korkut ve diğerleri, 2022, A. K. Kara ve diğerleri, 2019). Konvansiyonel tip FV modülü yapısında etilen vinil asetat (EVA) film, tedlar ve cam gibi malzemeler kullanılmaktadır (Pern, 2008), (Cuddihy ve diğ., 1982). EVA film, etilen vinil asetat kopolimeri ve katkı maddelerinin kullanımına dayanmaktadır. EVA lamine cam filmi oluşturmak için FV modüllerde yaygın olarak kullanılmaktadır. EVA filmin termal iletim katsayısı 0,23 W/mK olarak elde edilmiştir. Tedlar filmin termal iletim katsayısı ise 0,36 W/mK olarak elde edilmiştir (Lee ve diğ., 2008).



Şekil 2:

Geleneksel tip fotovoltaik güneş paneli bileşenleri (Lee ve diğ. 2008)

Bunun yanında PMC malzemeler kullanılarak fotovoltaik panellerin laminasyonu gerçekleştirilmektedir (Korkut ve diğerleri, 2022). A. K. Kara ve diğerleri (2019), belirledikleri FV hücreyi cam elyaf takviye malzemesi kullanarak vakum destekli reçine transferi yöntemi (VARTM) ile lamine etmişlerdir. Bu süreçte takviye ve matris malzemeleri araştırmışlar ve dayanım, absorbe katsayısı gibi özellikler etrafında seçimlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın son bölümünde aynı tip lamine edilmiş ve edilmemiş FV hücrelerin ürettiği elektrik güçleri kıyaslanmış ve %20 güç üretim farkı olduğu kayda geçmiştir. T. B. Korkut ve diğerleri (2022), VARTM yöntemi ve E-cam takviye malzemesi kullanımı ile lamine edilmiş mono silikon FV hücrelerin termal olarak geliştirilmiş ve geliştirilmemiş tiplerinin ısı transferi mekanizmasını ve değişen FV hücre elektriksel verimini sayısal ve deneysel olarak incelemiş ve doğrulamıştır. Çalışma sonunda iki lamine FV modül arasındaki sıcaklık farkının maksimum 22 dereceye ulaştığı gözlemlenerek ısı transferinin FV modüllerde elektriksel güç üretimi adına önemi değerlendirilmiştir. A. Goren ve diğerleri (2008), PMK malzemelerin VARTM üretim yöntemini tanımlamışlardır. Bunun yanında PMK malzeme üretimi için gerekli üretim aşamalarına cevap verebilen bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonunda programlanabilir mantık denetleyici (PLC) ve dokunmatik ekran kullanılarak 200 °C sıcaklığa kadar sıcaklık ve kütleme döngülerini yönetebilen bir sistem geliştirmişlerdir. Gorter ve diğerleri (2012), konvansiyonel tip FV modüllere alternatif olabilecek 15 farklı PMC malzemeyi incelemişlerdir. Gerçekleştirilen araştırmalarda, FV modülün kütlesi ve ilgili alternatif malzemelerin maliyeti dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda epoksi matris malzemesinin FV modül kütle optimizasyonunda ve maliyet parametresi altında iyi bir alternatif olduğu elde edilmiştir. Bunun yanında cam elyaf takviye malzemesinin mekanik ve optik parametreler dikkate alındığında FV modül laminasyonu için doğru PMK malzeme olduğu sonucu elde edilmiştir. Zhu ve diğerleri (2021) tarafından, PMK malzemelerde en-boy oranı, örgü deseni, ve katman kalınlığı gibi fiziksel parametrelerin etkin ısı iletkenliği üzerindeki etkileri Lattice-Boltzmann metodu ile incelenmiştir. Çalışma sonunda katman kalınlığının efektif ısı iletkenliğini etkileyen en baskın parametre olduğu sonucuna erişilmiştir. Bunun yanında örgü deseninin ısı iletkenlik yönünü etkilediğine ayrıca dikkat çekilmiştir.

Bu bölümde belirtildiği üzere, FV modüllerin artan sıcaklıklarıyla elektrik enerjisi üretim kapasiteleri düşmektedir. Bu sebeple, FV modüllerde oluşan ısı enerjisinin transferi konusunda çalışmalar derinleşerek artmaktadır. Bu çalışma, belirtilen problemde yola çıkarak PMK malzemelerin (karbon, cam elyaf, aramid) termofiziksel özelliklerini incelemiş, farklı tabaka kalınlıkları altında kıyaslamış, ve bir FV modül için doğru kompozisyona karar vererek optimum ısı transferi performansı eldesine katkıda bulunmuştur. Çalışma sonunda ayrıca, konvansiyonel tip ve PMK malzemeler ile lamine edilmiş FV modüllerin karşılaştırılması gerçekleştirilerek, geliştirilen ısı transferi performansına dair fark paylaşılmıştır.

Tablo 2. Kısaltmalar ve isimlendirmeler

| | | | |
|-------|---------------------------------|-----|-------------------------------------|
| FV | Fotovoltaik | EVA | Etilen vinil asetat |
| PMK | Polimer matris kompozit | ARC | Yansıma önleyici kaplama |
| VARTM | Vakum destekli reçine transferi | PLC | Programlanabilir mantık denetleyici |
| CTE | Termal genleşme katsayısı | Si | Silisyum |
| L | Kalınlık | T | Sıcaklık |
| k | Isıl iletim katsayısı | R | Isıl direnç |

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Takviye Malzemelerine Ait Termofiziksel Özellikler

Model tasarımı ve sayısal yöntem ile araştırma öncesinde incelenecek takviye malzemelerin termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi, ilgili çalışmaların doğru neticelere ulaşması için önem taşımaktadır. Bu çalışma, çeşitli takviye malzemelerin matris malzeme ile bir yapı oluşturması kabulü eşliğinde değişen tabaka kalınlıklarında araştırılarak optimum ısı transferi performansı elde edilmesini amaçlamış ve ilgili takviye malzemelerin termofiziksel özellikleri, üreticiler tarafından deney ortamında incelenmiş ve doğrulanmış teknik veri dökümanlarından elde edilmiştir. Tablo 3’de karbon, aramid, ve cam elyaf takviye malzemesine ait belirlenen sekiz farklı ürüne ait termofiziksel özellikleri paylaşılmıştır. Karbon takviye malzemelerinin ısı iletim katsayıları 162 W/mK ile 651 W/mK arasında, aramid takviye malzemelerinin ısı iletim katsayıları 0,04 W/mK ve cam elyaf takviye malzemesinin ise ısı iletim katsayısı 1,30 W/mK olduğu görülmektedir. Bunun yanında ilgili ürün gruplarında farklı takviye malzemelerin özgül ısı ve termal genleşme katsayısı (CTE) değerlerinin birbirlerine çok yakın veya aynı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada hedef alınan kompozit yapının eldesi için ilgili takviye malzemelerin termal genleşme katsayıları, özgül ısı değerleri, ve ısı iletim katsayıları incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Tablo 3. Farklı takviye malzemelerine ait termofiziksel özellikler (16,17,25)

| Takviye malzeme | Karbon elyaf | | | | |
|-----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| Üretici firma | Toray | | | | |
| Ürün adı | M35J | M40J | M46J | M55J | M60J |
| CTE [$10^{-6}/K$] | -0,73 | -0,83 | -0,9 | -1,1 | -1,1 |
| Özgül ısı [J/kgK] | 723 | | 719 | 732 | |
| Isı iletim katsayısı [W/mK] | 162,8 | 279,9 | 349,8 | 651,0 | 629,7 |
| Takviye malzeme | Aramid (Kevlar) | | | | |
| Üretici firma | DuPont | | | | |
| Ürün adı | K29 | | K49 | | |
| Özgül ısı [J/kgK] | 1420 | | | | |
| Isı iletim katsayısı [W/mK] | 0,04 | | | | |
| Takviye malzeme | Cam elyaf | | | | |
| Üretici firma | Owens Corning | | | | |
| Ürün adı | E-Glass | | | | |
| CTE [$10^{-6}/K$] | 5 | | | | |
| Özgül ısı [J/kgK] | 810 | | | | |
| Isı iletim katsayısı [W/mK] | 1,30 | | | | |

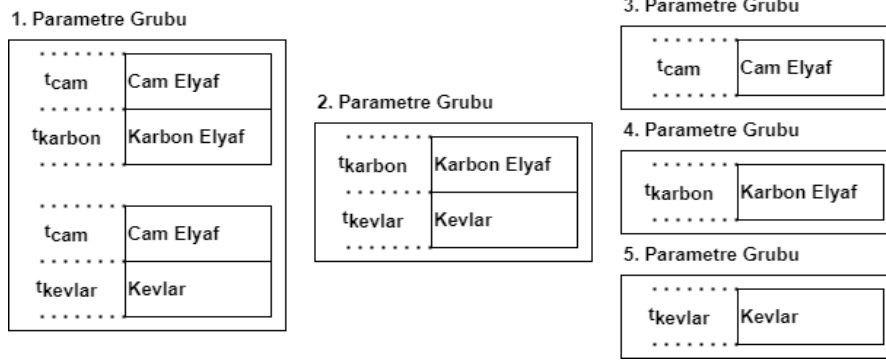
Bu çalışmada takviye malzemelerin termofiziksel özelliklerinin belirlenmesinin yanında FV modüllerde kullanılan malzemelerin de termofiziksel özellikleri yapıların doğru tayini ve kıyası için araştırılmıştır. Lee ve diğ. (2008) yaptığı çalışmalarda bir FV modül yapısının kompozisyonunda cam, etilen vinil asetat (EVA), yansımaya önleyici kaplama (anti-reflective coating, ARC), silikon FV hücre (Si), ve Tedlar olduğunu paylaşmış ve Tablo 4’de ise belirtilen termofiziksel özellikleri paylaşmışlardır. İlgili yapıda termal iletim katsayısı değeri en yüksek olan bileşen silikon FV hücre (Si) ile belirtilen fotovoltaiktir. Bunun haricinde bulunan malzemelerin ısı iletim katsayıları oldukça düşüktür. Kümülatifte fotovoltaiik haricindeki malzemelerin kalınlığı hesaplandığında 3,6 mm kalınlığında olduğu görülmektedir. Bu kalınlığın ısıl bir kapasite oluşturacağı ve aynı zamanda FV hücrelerde depolanan ısı enerjisinin dışarıya aktarımında direnç oluşturacağı düşünülmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada ince ve ısı iletimi yüksek bir kompozit malzeme araştırması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. Bir FV modülün malzeme kompozisyonu ve termofiziksel özellikleri (Lee ve diğ. 2008)

| # | Malzeme | Kalınlık [mm] | Isı iletim katsayısı [W/mK] |
|---|---------|---------------------|-----------------------------|
| 1 | Cam | 3,0 | 0,98 |
| 2 | EVA | 0,5 | 0,23 |
| 3 | ARC | $0,1 \cdot 10^{-3}$ | 1,38 |
| 4 | Si | 0,25 – 0,4 | 148,0 |
| 5 | Tedlar | 0,1 | 0,36 |

2.2. Parametrik Model Tasarımına İlişkin Özellikler

İlgili çalışmada gerçekleştirilecek sayısal araştırmalar sırasında ısıl iletimi yüksek, ve hafif PMK malzeme geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda farklı takviye malzemeleri incelenecek ve belirlenen fiziksel parametreler altında analiz edilecektir. Bu çalışmada ilgili kompozit yapı 2 boyutlu modellenmiştir. Bu doğrultuda 5 farklı parametre grubu oluşturulmuştur. Birinci parametre grubunda cam elyaf, karbon elyaf ve aramid ile birlikte araştırılmıştır. İlgili parametre grubunda her bir takviye malzemesinin kalınlıkları 1 ile 4 mm arasında değişmekte ve 32 farklı sayısal çalışmayı bulundurmaktadır. İkinci parametre grubunda karbon elyaf ve aramid takviye malzemeleri 1 ile 4 mm arasında değişen kalınlıklarda 16 farklı sayısal çalışma ile araştırılmıştır. Üçüncü, dördüncü, ve beşinci parametre gruplarında tekil olarak cam elyaf, karbon elyaf, ve aramid takviye malzemeleri 1 ile 10 mm kalınlık arasında 30 farklı sayısal çalışma ile araştırılmıştır. İlgili parametre gruplarına dair kompozisyonlar ve takviye malzemeleri Şekil 3’de belirtilmiştir. Bunun yanında ilgili parametre gruplarına dair kompozisyon ve takviye malzemelerin kalınlıkları Tablo 5’de belirtilmiştir.



Şekil 3:
Parametre gruplarına ait temsili görsel

Tablo 5. Parametre gruplarına dair fiziksel ölçütler

| Parametre | Çalışma | Takviye Malzeme | Kalınlık [mm] |
|-------------|---------|-----------------|-----------------------------|
| Parametre 1 | 16 | Cam elyaf | $1 \leq t_{cam} \leq 4$ |
| | | Karbon elyaf | $1 \leq t_{karbon} \leq 4$ |
| | 16 | Cam elyaf | $1 \leq t_{cam} \leq 4$ |
| | | Aramid | $1 \leq t_{aramid} \leq 4$ |
| Parametre 2 | 16 | Karbon elyaf | $1 \leq t_{karbon} \leq 4$ |
| | | Aramid | $1 \leq t_{aramid} \leq 4$ |
| Parametre 3 | 10 | Cam Elyaf | $1 \leq t_{cam} \leq 10$ |
| Parametre 4 | 10 | Karbon elyaf | $1 \leq t_{karbon} \leq 10$ |
| Parametre 5 | 10 | Aramid | $1 \leq t_{aramid} \leq 10$ |

2.3. Modellemede Kullanılan Eşitlikler

Problemin modellenmesinde kullanılan eşitlikler bu bölümde tartışılmıştır. İlgili geometri kompozit bir duvar olarak kabul edilmiştir. Bu geometri içerisinde farklı sayılarda katmanlar ve katmanları temsil eden farklı malzemeler bulunmaktadır. Bu kompozit yapı 2 boyutlu modellenmiş olup, dış kenarları adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Bu yapının üst kenarında bulunan bölgenin ($T_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$) sabit sıcaklıkta olduğu kabul edilerek alt kenar sıcaklığı (T_2) araştırılmıştır.

Kalınlığı L ve ortalama ısı iletim katsayısı k olan ve iki yüzeyi T_1 ve T_2 sıcaklıklarında tutulan bir katman göz önünde bulundurulduğunda Fourier ısı iletim kanunu (Çengel ve diğ. 2011);

$$Q'_{iletim} = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (1)$$

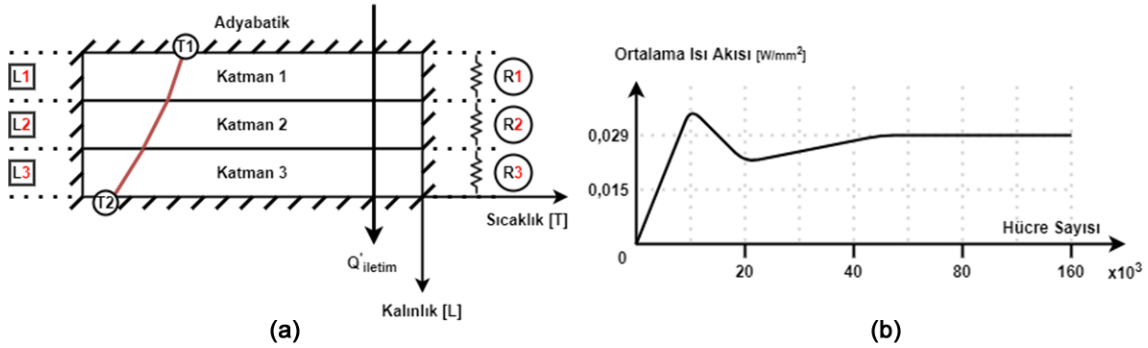
Şekil 4a'da görülen 3 katmandan oluşan kompozit yapı göz önünde bulundurulduğunda bu yapıdaki sürekli ısı transfer hızı (Çengel ve diğ., 2011);

$$Q' = (T_1 - T_2)/R_{toplam} \quad (2)$$

Denklem 1'de belirtilen ısı transferi hızı denkleminde bulunan R_{toplam} toplam ısı direnci olup şu şekilde tanımlanır (Çengel ve diğ. 2011);

$$R_{toplam} = R_{katman,1} + R_{katman,2} + R_{katman,3} = \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{L_3}{k_3 A} \quad (3)$$

$$R_{katman} = \frac{L}{kA} \quad (4)$$



Şekil 4:

Kompozit yapıya ait termal model, ısı direnci ağı (a), ve hücreden bağımsızlık çalışması (b)

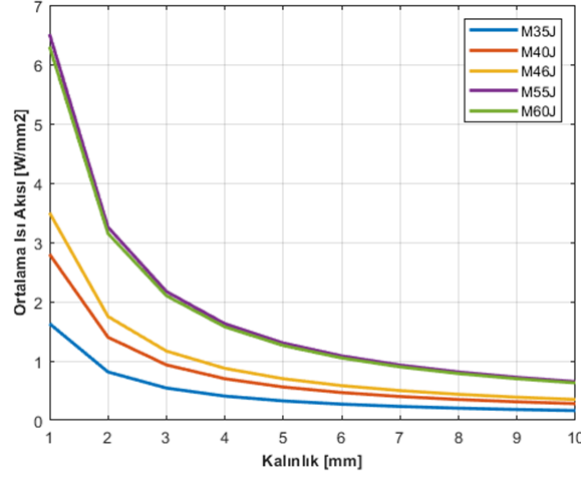
Modellemede kullanılan eşitliklerin çözümü, nümerik ve görsel sonuçların eldesi için ANSYS Fluent yazılım paketi kullanılmıştır. Çözümün gerçekleştirildiği bilgisayar donanımı Intel Core i7-8565U işlemci ve 32 GB hafıza barındırmaktadır. Modellemede kullanılan eşitlikler zamandan bağımsız, SIMPLE ayrık çözücü algoritması, ve ikinci dereceden ayrıştırma şemasına bağlı olarak çözümü 1.10^{-5} yakınsama kriteri altında gerçekleştirilmiştir. Bu problem kapsamında belirtilen parametrelerin çözümü öncesi, cam ve karbon elyaf bulunan kompozit yapının farklı hücre sayıları altında hücreden bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında farklı hücre yapılarında ortalama ısı akısı değerleri kıyaslanmış ve ilgili nümerik model sonuçları 60.000 hücre sayısından sonra değişmediği görülmüştür (Şekil 4b). Devam eden nümerik çalışmalarda ilgili hücre yapısı değiştirilmeden çalışmalara devam edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

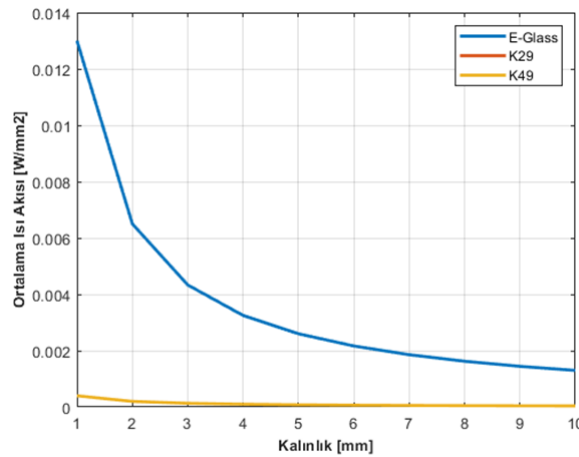
Bu çalışmada ısı iletimi yüksek ve bir tarafı elektriksel olarak yalıtılmış bir kompozit malzeme geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda takviye malzemelerden oluşan kompozit yapı değişen kalınlıklarda incelenmiş ve ısı akısı değerleri kıyaslanmıştır. Isı akısı, aynı zamanda ısı akış hızı yoğunluğu olarak da adlandırılmaktadır ve birim zaman başına alan birimi başına bir enerji akışı olarak tanımlanmaktadır. SI'da birimi metrekare başına Watt'tır. Hem yönü hem de büyüklüğü vardır ve bu nedenle vektörel bir niceliktir.

3.1. Tek Tip Takviye Malzeme Kullanımı Sonucu Oluşan Isıl İletim Performansı

Cam elyaf, karbon elyaf, ve aramid takviye malzemeleri 1 ile 10 mm arasındaki kalınlıklarda ısı iletim performansları araştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 5’de paylaşılmıştır. 5 farklı karbon elyaf değişen kalınlıklarda araştırılmıştır. Sonuçlar doğrultusunda M55J kodlu karbon elyaf takviye malzemesinin ısı iletim performansının ilgili takviye malzemeleri arasında en iyi karbon elyaf olduğu sonucuna erişilmiştir. Bu bağlamda M55J kodlu karbon elyafın kalınlık fiziksel unsuru altında 1 ile 10 mm arasında değişen kalınlıklar doğrultusunda ortalama ısı akısı değerleri $6,51 \text{ W/mm}^2$ ile $0,651 \text{ W/mm}^2$ arasında değiştiği görülmüştür. Belirlenen cam elyaf takviye malzemesi için gerçekleştirilen nümerik çalışmalarda ise ortalama ısı akısı değerleri $0,013 \text{ W/mm}^2$ ile $0,0013 \text{ W/mm}^2$ değiştiği görülmüştür. Belirlenen iki aramid ürün isimleri ise K29 ve K49’dur. K29 ve K49 isimli kevlar takviye malzemelerinin ortalama ısı akısı değerleri $4 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^2$ ile $4 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2$ arasında değişmektedir. Bu doğrultuda ısı iletim performansı kabiliyeti en iyi takviye malzemenin karbon elyaf olduğu sonucuna erişilmiştir. Fakat problem hedeflerinde de belirtildiği üzere, belirlenecek kompozit yapının elektriksel iletiminin olmaması, bir tarafının yalıtkan olması gerekmektedir. Bu sebeple ısı iletimi yüksek karbon elyafa ek elektriksel iletim konusunda yalıtkan özellik gösteren cam elyaf ya da aramid takviye malzemesi kullanımı gereği de bu çalışmada araştırılmıştır.



(a)

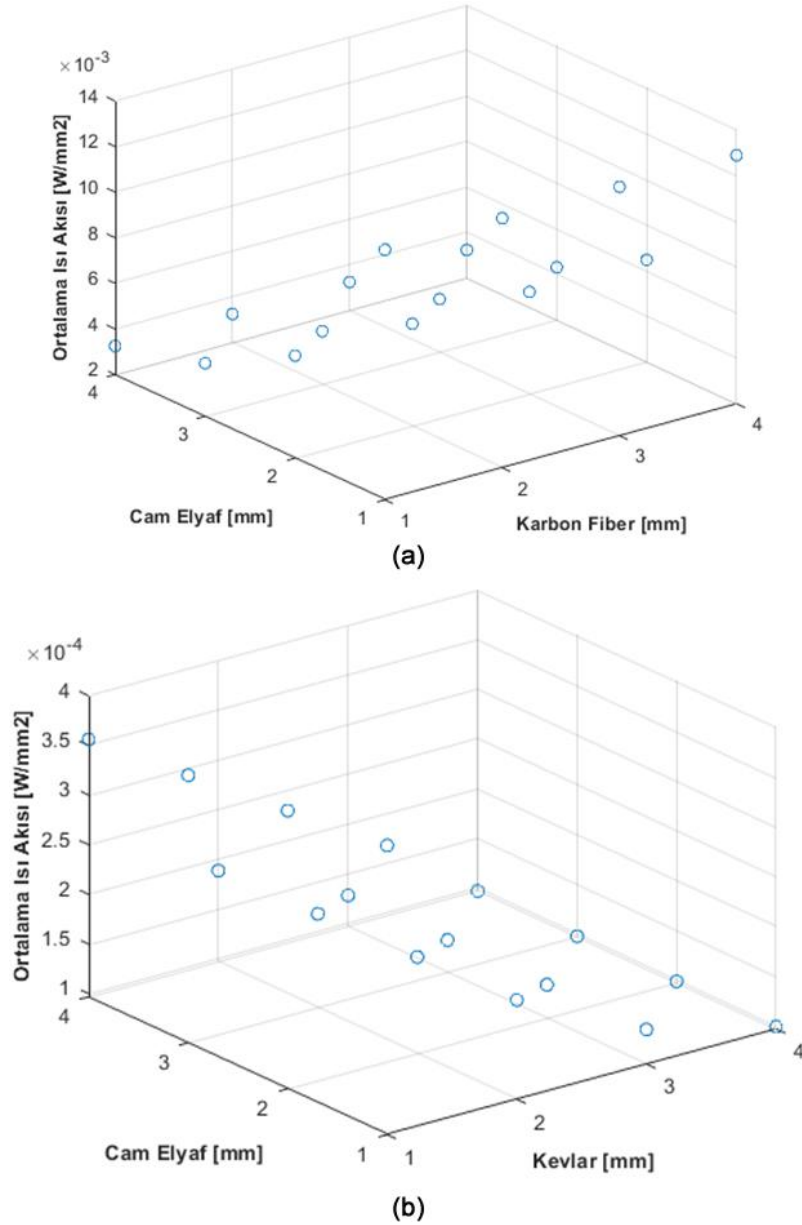


(b)

Şekil 5: Karbon elyaf (a), cam elyaf, ve aramid (b) takviye malzemelerinin değişen kalınlıklar doğrultusunda ortalama ısı akısı değerleri

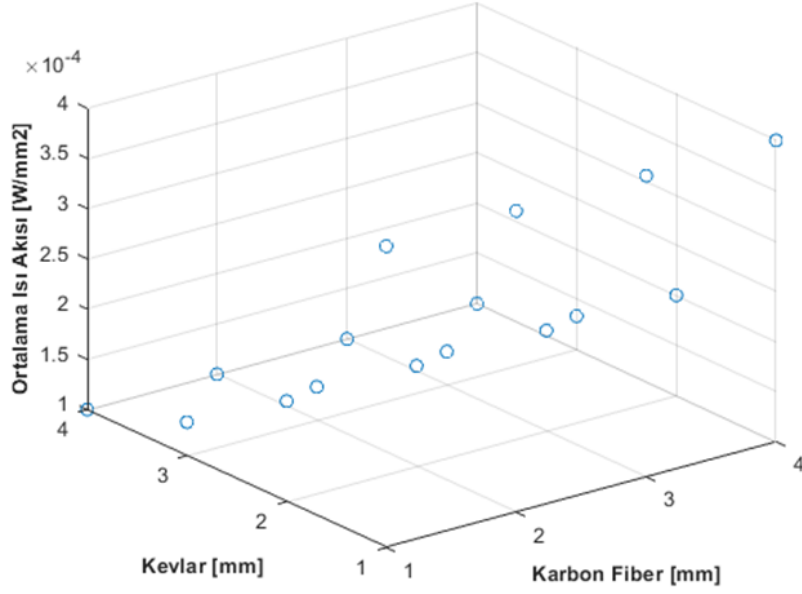
3.2. Farklı Takviye Malzemelerin Oluşturduğu Kompozit Yapıda Oluşan Isıl İletim Performansı

Tablo 3’de belirtilen parametre bir bölümünde cam elyafın karbon fiber ve aramid takviye malzemeleri ile birlikte oluşturduğu kompozit yapıdaki kalınlıklara göre değişen ortalama ısı iletim performansı Şekil 6’da paylaşılmıştır. Cam elyafın, karbon fiber ile oluşturduğu kompozit yapıdaki ortalama ısı akısı değerleri 0,029 W/mm² ile 0,0032 W/mm² arasında değişmektedir. Cam elyafın, aramid ile oluşturduğu kompozit yapıdaki ortalama ısı akısı değerleri 0,00039 W/mm² ile 0,0001 W/mm² arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 6:

Cam elyafın, karbon elyaf (a), ve aramid (b) ile oluşturduğu kompozit yapıdaki değişen ortalama ısı akısı değerleri

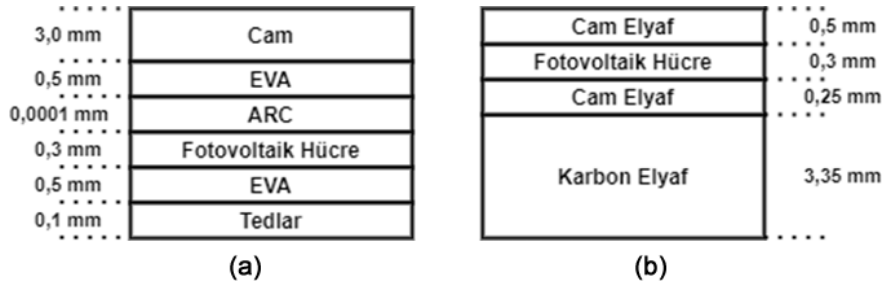


Şekil 7:

Karbon elyafın aramid ile oluşturduğu kompozit yapıdaki değişen ortalama ısı akısı değerleri

Tablo 3’de belirtilen parametre 2 bölümünde karbon fiberin aramid ile oluşturduğu kompozit yapıdaki değişen ortalama ısı akısı değerleri Şekil 7’de paylaşılmıştır. Bu kompozit yapıdaki ortalama ısı akısı değerleri 0,00039 W/mm² ile 0,0001 W/mm² arasında değiştiği görülmektedir.

Çalışmanın son bölümünde ise konvansiyonel tip bir FV modül ile polimer takviye malzemeler kullanılarak lamine edilmiş FV modül ısı iletim performansları karşılaştırılmıştır. Cam, etilen vinil asetat (EVA), yansımaya önleyici kaplama (ARC), fotovoltaik, ve tedlar konvansiyonel tip FV modülün bileşenlerini oluşturmaktadır ve Şekil 8.a’da bu bileşenlerin dizilimleri ve kalınlıkları belirtilmiştir. Bunun yanında konvansiyonel tip bir FV hücrenin bileşenlerine ait termofiziksel özellikler Tablo 4’de paylaşılmıştır. Cam elyaf, ve karbon elyaf ise polimer takviye malzemeler ile lamine edilmiş FV modülün bileşenlerini oluşturmakta ve Şekil 8.b’de bu bileşenlerin dizilimleri ve kalınlıkları belirtilmiştir. Bu FV modülde kullanılan cam elyaf (e-glass) ve karbon elyafa (M55J) ait termofiziksel özellikler Tablo 3’de belirtilmiştir.

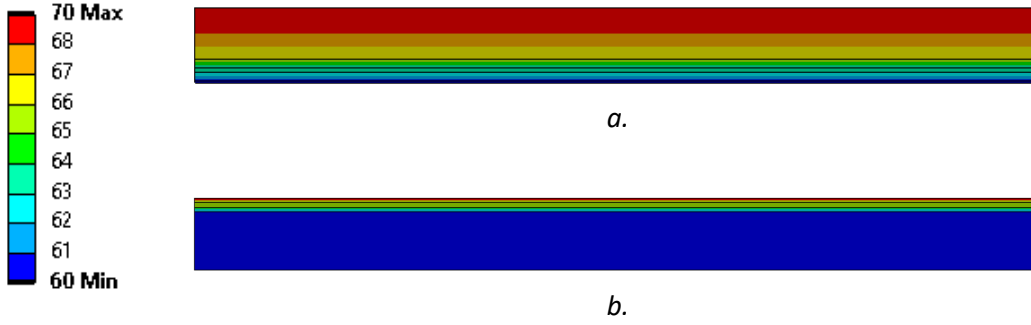


Şekil 8:

Konvansiyonel tip (a) ve polimer takviye malzemeler ile lamine edilmiş FV modüllerine ait kompozisyon dizilimi ve kalınlıkları

Gerçekleştirilen sayısal çalışmalar sonucunda konvansiyonel tip FV modüldeki ısı akısı değeri 0,0013 W/mm² ve polimer takviye malzemeler kullanılarak lamine edilen FV modülün ısı akısı değeri 0,0255 W/mm² olarak elde edilmiştir. Bu sebeple polimer takviye malzemeler ile lamine edilmiş FV modülde ısı iletiminin daha hızlı olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bu bilgi

doğrultusunda Şekil 4a'da belirtilen sınır koşulları altında ısı geçişinin iki FV modülün yüzey alanına dik olarak gerçekleştiği ve diğer boyutlarda ısı kaybı olmadığı kabul edilerek gerçekleştirilen sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 9'da paylaşılmıştır. Sonuçlar iki farklı FV modülde elde edilen ısı akısı değerlerini destekler nitelikte olup ortalama ısı akısı değeri $0,0242 \text{ W/mm}^2$ daha fazla olan polimer takviye malzemeler ile lamine edilmiş FV modülde depolanan ısı enerjisinin, konvensiyonel tip FV modüle kıyasla daha hızlı transfer edildiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 9:

(a) Konvensiyonel tip ve (b) polimer takviye malzemeler ile lamine edilmiş FV modüllere ait sıcaklık dağılımı.

4. SONUÇLAR

Bu araştırmada, farklı takviye malzemelerin kullanımı ile FV modüller için ısı iletim performansı yüksek bir kompozit yapı eldesi araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına dayanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Çalışmada karbon, aramid, ve cam elyaf takviye malzemelerine ait üreticiler tarafından teste tabi tutulmuş ve veri sayfalarında paylaşılan termofiziksel özellikleri araştırılmıştır. Isı iletim katsayıları kapsamında gerçekleştirilen araştırmalara göre ısı iletim performansı en yüksek takviye malzemesinin karbon elyaf olduğu elde edilmiştir. Karbon elyafın maksimum ısı akı değeri $6,51 \text{ W/mm}^2$ olduğu sonucu elde edilmiştir. Aramid ve cam elyaf ise konu hakkında birbirine çok yakın bir termal karakteristik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Cam elyafın elde edilen maksimum ısı akı değeri $0,013 \text{ W/mm}^2$ ve aramidin elde edilen maksimum ısı akı değeri $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ W/mm}^2$ 'dir. Bunun yanında aramid ve cam elyaf takviye malzemeleri elektriksel anlamda yalıtıcıdır. Beş parametre altında gerçekleştirilen araştırmalar sonucu ısı iletim performansı en yüksek takviye malzemesinin karbon elyaf olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca artan takviye malzeme kalınlığı ile ısı akısının değerinin düştüğü görülmektedir. Bu sebeple geliştirilen kompozit malzemelerin kalınlığının ince ve ısı iletim katsayısı yüksek olan elyafların kullanımı hedef alınmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise konvensiyonel tip bir FV modül ile PMK malzemeler kullanılarak lamine edilmiş bir FV modülün ısı iletim performansları karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda konvensiyonel tip FV modülün ısı akısı $0,0013 \text{ W/mm}^2$ ve bu çalışmada geliştirilen kompozit yapının ısı akısı $0,0255 \text{ W/mm}^2$ olarak elde edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde ise PMK malzemeler ile FV modüller için geliştirilen kompozit yapıdaki ısı iletim performansında $0,0242 \text{ W/mm}^2$ artış elde edildiği sonucuna erişilmiştir.

Tablo 6. Parametre gruplarına dair fiziksel ölçütler

| # | (a) | | (b) | |
|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------|
| | Malzeme | Isı akısı [W/mm ²] | Malzeme | Isı akısı [W/mm ²] |
| 1 | Karbon elyaf | 6,51 – 0,651 | Cam Elyaf + Karbon Elyaf | 0,029 – 0,0032 |
| 2 | Cam elyaf | 0,013 – 0,0013 | Cam Elyaf + Aramid | 0,00039 – 0,0001 |
| 3 | Aramid | 4.10 ⁻⁴ - 4.10 ⁻⁵ | Karbon Elyaf + Aramid | 0,00039 – 0,0001 |
| # | (c) | | (d) | |
| | Kalınlık [mm] | Malzeme | Kalınlık [mm] | Malzeme |
| 1 | 3,0 | Cam | 0,5 | Cam Elyaf |
| 2 | 0,5 | EVA | 0,3 | FV |
| 3 | 0,0001 | ARC | 0,25 | Cam Elyaf |
| 4 | 0,3 | FV | 3,35 | Karbon Elyaf |
| 5 | 0,5 | EVA | | |
| 6 | 0,1 | Tedlar | | |
| | Isı Akısı [W/mm²] | 0,0013 | Isı Akısı [W/mm²] | 0,0255 |

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada Smart Güneş Teknolojileri firmasına sağladığı destek için teşekkür eder.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Talha Batuhan Korkut çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi, makale taslağının oluşturulması, veri analizi ve yorumlama, Aytaç Gören çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin yönetimi, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk.

KAYNAKLAR

1. Asmatulu E., Alonayni A., Alamir M. (2018) Safety concerns in composite manufacturing and machining, *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII*, 10596, 421 – 428. doi: 10.1117/12.2296707
2. Balasubramanian M (2014) Composite materials and processing, *Boca Raton: CRC press*, 335 – 343.

3. Barucci M., Olivieri E., Pasca E., Risegari L., Ventura G. (2005) Thermal conductivity of Torlon between 4.2 and 300 K, *Cryogenics*, 45(4), 295 – 299. doi: 10.1016/j.cryogenics.2004.11.006
4. Bhatt P., Goe A. (2017) Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use, *Material Science Research India*, 14(1), 52 – 57. doi: 10.13005/msri/140109
5. Chou H. M., Wang J. C., Chang Y. P. (2013) An experimental study on heat conduction and thermal contact resistance for the AlN flake, *Advances in Materials Science and Engineering*. doi: 10.1155/2013/352173
6. Cuddihy E., Carroll W., Coulbert C., Gupta A., Liang R. (1982) Photovoltaic-module encapsulation design and materials selection, *Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA (USA)*. doi: 10.2172/5356871
7. Çengel Y. A., Tanyıldızı V., Dağtekin İ. (2011) Isı ve kütle transferi, Güven Kitabevi, ISBN: 978975624041
8. Fried E. (1969) Thermal conduction contribution to heat transfer at contacts, *Thermal conductivity*, 2, 253 – 274.
9. Fukai J., Kanou M., Kodama Y., Miyatake O. (2000) Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers, *Energy Conversion and Management*, 41(14), 1543 – 1556. doi: 10.1016/S0196-8904(99)00166-1
10. Goren A., Atas C. (2008) Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding, *Archives of materials Science and Engineering*, 34(2), 117 – 120. doi: 10.1.1.553.9882
11. Gorter T., Reinders A. H. (2012) A comparison of 15 polymers for application in photovoltaic modules in PV-powered boats, *Applied energy*, 92, 286 – 297. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.10.042
12. Kara A. K., Aksoy D., Yıldırım H., Türkay E. K., Goren A (2019) Mono Silikon Fotovoltaik Hücrelerin Polimer Kompozit Malzeme ile Laminasyonu, *PuTech Composites*, Temmuz – Ağustos 2019, 1 – 8.
13. Korkut T. B., Goren A., Rachid A. (2022) Numerical and Experimental Study of a PVT Water System under Daily Weather Conditions, *Energies*, 15(18), 6538. doi: 10.3390/en15186538
14. Lee B., Liu J. Z., Sun B., Shen C. Y., Dai G. (2008) Thermally conductive and electrically insulating EVA composite encapsulants for solar photovoltaic (PV) cell, *Express Polymer Letters*, 2, 357 – 363. doi: 10.3144/EXPRESSPOLYMLET.2008.42
15. Matthews F. L., Rawlings R. D. (1999) Composite materials: engineering and science, *Woodhead Publishing*.
16. Matweb (2022) Kevlar Takviye Malzemesinin Termofiziksel Özellikleri, Erişim Adresi: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7323d8a43cce4fe795d772b67207eac8> (Erişim Tarihi: 07.02.2022)
17. Matweb (2022) Cam Elyafının Termofiziksel Özellikleri, Erişim Adresi: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d9c18047c49147a2a7c0b0bb1743e812&ckck=1> (Erişim Tarihi: 07.02.2022)
18. Mera H., Takata T. (2000) High-performance fibers, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. doi: 10.1002/14356007.a13_001
19. Ozisik M. N. (1985) Heat transfer: a basic approach, *New York: McGraw-Hill*, doi: 10.1017/S0001924000014780
20. Park D. W., Shim S. E. (2010) A review on thermal conductivity of polymer composites using carbon-based fillers: carbon nanotubes and carbon fibers, *Carbon letters*, 11(4), 347 – 356. doi: 10.5714/CL.2010.11.4.347

21. Pern J. (2008) Module encapsulation materials, processing and testing (presentation) (No. NREL/PR-520-44666). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
22. Rosato D. V. (1997) Designing with reinforced composites: technology, performance, economics, SPE Books.
23. Srivatsan T. S. (1995) A review of:“Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications” by A. Brent Strong, *Material and Manufacturing Process*, 10(5), 1121 – 1122. doi: 10.1080/10426919508935097
24. Tavman I. H., Akinci H. (2000) Transverse thermal conductivity of fiber reinforced polymer composites, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27(2), 253 – 261. doi: 10.1016/S0735-1933(00)00106-8
25. Toray (2022) Karbon Elyafların Termofiziksel Özellikleri, Erişim Adresi: <https://www.toraycma.com/products/carbon-fiber/> (Erişim Tarihi: 06.02.2022)
26. Ventura G. Martelli V. (2009) Thermal conductivity of Kevlar 49 between 7 and 290 K, *Cryogenics*, 49(12), 735 – 737. doi: 10.1016/j.cryogenics.2009.08.001
27. Zhu C. Y., Gu Z. K., Xu H. B., Ding B., Gong L., Li Z. Y. (2021) The effective thermal conductivity of coated/uncoated fiber-reinforced composites with different fiber arrangements, *Energy*, 230, 120756. doi: 10.1016/j.energy.2021.120756
28. Zimmerli B., Strub M., Jeger F., Stadler O., Lussi A. (2010) Composite materials: composition, properties and clinical applications. A literature review, *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin*, 120(11), 972 – 986.
29. Zweben C. H. (2005) Composites Overview. Encyclopedia of Condensed Matter Physics, Elsevier, Pages 192-208, ISBN: 9780123694010

