



## Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Termografik Muayene ile Kontrolü

Seyid Fehmi DİLTEMİZ\*<sup>1</sup>, Ersin EROĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havaacılık Bilimi ve Teknolojileri Bölümü, Eskişehir, Türkiye

\*fdiltemiz@ogu.edu.tr

(Alınış/Received: 11.11.2022, Kabul/Accepted: 23.01.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

**Öz:** Endüstriyel ihtiyaçlarda artış ve yeni mühendislik malzemelerinin gelişmesiyle birlikte her türlü makine ve araçta teknolojik gelişmeler büyük bir hız kazanmıştır. Raylı sistem teknolojilerinde seyahat sürelerinin azalması amacıyla yüksek hızlı araçların geliştirilmesini sağlamıştır. Bu araçların artan hızı ile yapısal olarak daha dayanıklı malzemelerin araştırılması ortaya çıkmıştır. Metalik malzemeler, özgül dayanım kapasiteleri, şekillendirilebilirlikleri ve yüksek iletkenlikleri nedeniyle raylı sistem uygulamalarında ihtiyaçları karşılamamaktadır. Alternatif olarak kompozit malzemelerin kullanımı bulunmaktadır. Ancak kompozit malzemelerin kullanımını sınırlayan etmenler vardır. Bunlardan biri tahribatsız kontrol metodlarının metalik malzemelere göre zor ve karmaşık olmasıdır. Tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan Termografik (TR) analiz yöntemi kompozitlerin muayenesinde kullanılmaktadır. Hızlı, düşük maliyet ve işlem kolaylığı TR'nin avantajlarını arasındadır. Bu çalışma iki kısımdan meydana gelmektedir. İlk bölümünde raylı sistem araçlarında kullanılan kompozit yapısal bileşenler hakkında literatür araştırılması yapılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında, raylı sistemlerde kullanılan katmanlı polimer matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Termografik yöntemi ile bu numunelerin tahribatsız kontrolü incelenmiştir. İncelemenin sonunda, üretilen kompozit parçalarda termografik test metodunun kusur tespitinde başarılı olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kompozit malzemeler, Termografi, Yüksek hızlı tren, Raylı sistem kompozit malzemeleri, Tahribatsız muayene

### Thermographic Testing of Composite Materials Used in Rail System Vehicles

**Abstract:** With the increase in industrial needs and the development of new engineering materials, technological advancements have gained great momentum in all types of machinery and vehicles. High-speed vehicles have been developed in rail system technologies to reduce travel times. With the increasing speed of these vehicles, the research for structurally more durable materials has emerged. Metallic materials do not meet the requirements due to their specific strength capacities, formability, and high conductivity. Alternatively, the use of composite materials is found. However, there are factors that limit the use of composite materials. One of these is that non-destructive control methods are difficult, and complex compared to metallic materials. Thermographic (TR) analysis method, which is one of the non-destructive examination methods, is used in the examination of composites. Fast, low-cost and ease of process are among the advantages of TR. This study consists of two parts. In the first part, literature research on composite structural components used in rail system vehicles was carried out. In the second part of the study, layered polymer matrix composite specimens which are used in railway systems were produced. The non-destructive control of these specimens was examined by the thermographic method. As a result of the examination, it was observed that the thermographic test method was successful in detecting defects in the composite parts produced.

**Keywords:** Composite materials, Thermography, High speed train, Rail vehicles composite materials, Non-destructive inspection

Atıf için/Cite as: S. F. Diltemiz, E. Eroğlu, "Raylı sistem araçlarında kullanılan kompozit malzemelerin termografik muayene ile kontrolü" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 186-198, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1202657

## 1. Giriş

Kompozit malzemeler uzun yıllardır kara, deniz ve hava araçlarında kullanıldığı gibi demiryolları araçlarında da kullanılmaktadır. Her bir araçta kullanım yeri ve ihtiyaca göre, kompozit malzemelerin avantajlarından faydalanılmaktadır. Kompozit malzemeler uzun yıllardır demiryolu endüstrisindeki belirli uygulamalar için rutin olarak kullanılmaktadır.

İngiltere'nin, Güney Bölge banliyösünde, 1950'lerin başından itibaren geleneksel metal kaplı ahşap kapıların yerine, yorulma ömrünün en az iki kat olan cam elyaf takviyeli plastik (CTP) içeren kapılar kullanılmaktadır [1].

Karmaşık üç boyutlu kalıplanmış profillerin, kabin gövde yapısal bileşenlerinin ve araç iç kısımların imalatında, yüksek sertlik-ağırlık oranına sahip kompozit paneller günümüz raylı araçlarında kullanılmaktadır. Araştırma kuruluşları ve kompozit malzeme üreticileri tarafından demiryolu araçları için kinematik kapaklar, ön gövde, biniş ve iniş kapıları, dış yan duvar panelleri, tavan dış panelleri, yan alt panelleri, bojiler, zemin altı yapılar, iç havalandırma tavan panelleri, iç duvar panelleri, masalar, bagaj rafları, koltuklar ve tekerlek setleri gibi daha gelişmiş kompozit yapılara yönelik araştırmalar ise halen yürütülmektedir [2].

Kompozit sandviç yapılar, hafif ve nispeten kalın bir ara tabaka (çekirdek) ile ayrılmış iki ince fakat sert yüzey katmanından oluşur [3]. Yüzey katmanları, daha yüksek elastik özelliklere bağlı olarak, bükülme ve düzlem içi hareketlere dayanırken, kesme yükleri çekirdek tarafından karşılanır [4]. Bu nedenle kompozit sandviç yapılar, havacılık yapıları, yüksek hızlı deniz araçları, trenler ve yarış arabaları gibi ağırlığın minimumda tutulması gereken yüksek performanslı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Bununla birlikte, zayıf yangın direnci kritik bir sorundur [6]. Yanıcı olmaları nedeniyle, polimer kompozit kaplamalar genellikle yangına maruz kaldıklarında katmanlarının arası ayrılır, tabakalaşma oluşur, tutuşur ve yanar. Ateş/alev koruması olmadan, sandviç kompozitler büyük miktarda ısı ve toksik duman salınımı ile yanabilir, bu da kullanımını sınırlar ve yüzey katmanının ve çekirdeğin ayrışması nedeniyle yapısal arızaya neden olabilirler [7].

Kompozitlerin yanmaya karşı direnç özelliklerini geliştirmek için katkıların eklenmesiyle polimer matrisinin modifikasyonudur [8]. Çeşitli çalışmalarda Tetrabromobisphenol A (TBBPA), Alüminyum Tri-hidroksit (ATH), Amonyum polifosfat (APP), Silikonlar gibi alev geciktirici katkı maddeleri eklenmesi, kompozit malzemelerin yangına karşı olan özelliklerini başarıyla geliştirmiştir [9], [10], [11].

Demiryolu endüstrisi için, fenolik reçineler, düşük seviyede zehirli dumanlar ile yanmaya karşı dirençlidir. Bu nedenle tipik olarak Londra Metrosu gibi tünel gibi kapalı alanlarda çalışmak üzere tasarlanmış raylı araçlar için kullanılırlar [12].

Kompozit malzemelerin üretim kaynaklı hatalarının yanı sıra, hizmet ömrü boyunca çalışma koşullarından kaynaklanan çeşitli hasarları ile de karşılaşmaktadır. Yapıların hasarlarını karakterize etmek ve gerekli tedbirleri almak için çeşitli tahribatsız muayene yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Kompozit malzemelerin üretim yönteminin, geleneksel üretim yöntemlerden farklı olması ve güvenlik gereksinimlerinden dolayı belirli periyotlarda kontrol edilmesi şarttır. Kompozit malzemelerin yapışma kontrolü için Fokker yapışma testi, akustik emisyon, ultrasonik, X-ray/nötron radyografi, shearografi, termografi, görsel muayene; kaçak testi ve tap test gibi geleneksel tahribatsız muayene yöntemleri kullanılmaktadır [14]. Bu kontrol yöntemleri çeşitli olmakla beraber hepsinin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu yöntemlerin kullanım

yerleri ve hassasiyetleri açısından farklılık olmakla beraber kontrol edilecek malzeme ve aranılan hataya göre metot seçimi yapılmaktadır.

Kompozit malzemelerin gelişmesinin bir sonucu olarak, büyük yapısal kompozit malzemeler seri imalat sistemlerde üretilmektedir. Gerek ihtiyaç duyulan iş gücünün azaltılması gerekse üretim hızını arttırmak için, üretim esnasında temassız termografi kontrolleri kullanılmaktadır [15].

Kompozit malzemelerin kusurlarının tespit etmek için termografinin etkinliğini Avdelidis ve ark. [16] incelemiştir. Termografi analiz yöntemi ile incelenen tüm örneklerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tekniğin avantajları, yüzey veya yakın yüzey kusurları için hızla geniş alanların kontrol edilebilmesi ve kolayca yorumlanabilir sonuçlar üretmesidir. Dezavantajları ise, başarısının kusur derinliğine ve boyutuna bağlı olmasıdır.

Termografi, NAS410 ve EN4179 gibi uluslararası NDT standartlarında tanımlanmıştır. Geçmişte termografi ekipmanı maliyeti yüksek olmasına rağmen, yakın zamanda geliştirilen portatif sistemler daha uygun fiyatlarla temin edilebilmektedir [17].

Bu çalışmada ilk olarak, raylı sistem araçlarında kullanılan kompozit yapıları parçaları literatür yönüyle irdelenmiştir. Ayrıca raylı sistemlerde kullanılan polimer matrisli kompozitlerde sık rastlanılan hata tiplerinin termografi ile tespit edilebilirliği deneysel olarak test edilmiştir.

## 2. Raylı Sistem Yapılarında Kullanılan Kompozit Yapılar

Araştırmacılar ve kompozit malzeme üreticileri tarafından kompozit malzemelerin yapısal bileşenler olarak kullanım avantajları tespit edilmiştir. Bu nedenle kullanım alanlarının artması sonucu raylı sistem uygulamalarında kompozitlerin kullanımı son yıllarda oldukça artmıştır. Mevcut uygulamalarda raylı sistem araçlarında kompozitlerin kullanımı büyük ölçüde kabin gövdesi ve koltuk parçalarındadır. Yüksek sertlik / ağırlık oranı gerektiren diğer iç bağlantı parçaları ve paneller gibi karmaşık üç boyutlu profillere sahip bileşenlerle sınırlıdır. Ayrıca ray traverslerinde kompozit malzemelerin kullanımı da araştırılmaktadır [18]. Raylı sistem yapılarında kullanımı yaygın olan, örnek parçalar sırasıyla maddeler halinde ele alınmıştır.

### 2.1. Uzay kafes yapısı

Özellikle hafif raylı toplu ulaşım araçlarından tramvay ve metro kabinlerinde gövde destek parçalarının ağırlık azaltılması ve yüksek mukavemet gereksiniminden dolayı fiber takviyeli kompozit uzay kafes yapıları kullanılması ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır [19].

Fiber destekli kompozitlerin endüstriyel kullanımı, son on yılda yapısal uygulamalar için büyük oranda artmıştır. Mukavemet özelliklerinin örgü açısına bağımlılığı, yapıya özgü optimizasyon yoluyla ağırlığın düşürülmesi için avantaj sağlamaktadır. Singh ve ark. tarafından yapılan çalışmada optimize edilmiş kompozit tasarım, metal tasarımına kıyasla yaklaşık % 15,7 ağırlık kazanımı sağlamıştır [19].

### 2.2. Demiryolu aksı

Demir yolu aksı, demir yolları üzerinde seyahat eden raylı sistemler taşıtının, ray üzerinde bulunan tekerlerinin bağlı olduğu yapısal bileşen olup, demiryolu akslarının hafifletilmesi potansiyeli, öncelikle bir raylı taşıtın aksının yay olmadan ağırlığının azaltılması araştırılmıştır [20]. Raylı aracın, en çok gerilmeye maruz kalan bileşenlerinden biri olan yaysız aks kütlelerini azaltılması; ray hasarını, enerji tüketimini, emisyon değerlerini ve toplam işletme maliyetlerini azaltmaya yardımcı olacak ve daha hafif bir taşıt elde edilecektir [21], [22], [23]

Ray tekerlek takımı hafiflemesi açısından, bir yük vagonu ile ilgili Shahverdi vd. [24] tarafından fizibilite çalışması yayınlanmıştır. Ayrıca British Rail Gelişmiş Yolcu Treni'nin geliştirilmesi sırasında bir ray aksının hafiflemesine için karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin kullanımını araştırılmıştır [1].

Kompozit demiryolu aksı tasarımı için çeşitli tasarım konseptleri geliştirilmiştir. Bu konseptler yorulma dayanımını arttırmak için matris olarak epoksi reçine ile takviye edici karbon fiber kullanılmasına dayanmaktadır [21].

### 2.3. Ön kabin

Yüksek hızlı trenlerin gelişimi ile ön kabinin hücum kenarında yer alan yüzeylerin darbe dayanımı, hafiflik, aerodinamik tasarım, üretilebilirlik ve endüstriyel estetik tasarım ihtiyaçlarından dolayı kompozit malzeme kullanım ihtiyacı doğmuştur. 200 km/s hıza ulaşan hızlı trenlerde cam elyaf takviyeli poliüretan çekirdekli çift kaplama yüzeyli sandviç kompozit malzemeden imal edilmiş ön kabin tasarımı kullanılmıştır [1].

Kompozitlerin günümüzde kabin ön uçları için makul bir seçim olduğuna örnek, Adtranz tarafından tedarik edilen C20 Stockholm metro aracı için verilen kararda görülmektedir. Ön kabinin karmaşık şekli, üreticiyi kompozit malzeme kullanımına yöneltmiştir. Kabin, tünel operasyonları için yangın güvenliği gerekliliklerini yerine getirirken, genel sertliğe katkıda bulunacak şekilde tasarlanmıştır [2].

### 2.4. Kapılar

Raylı sistem araçlarında personel, yolcu ve yük kapıları mekanik olarak tekrarlı yükleme altında olduğundan, yorulma hasarı oluşmaktadır. Yorulma ömrü ile bağlantılı olarak bu kapıların kullanım ömrü hesaplandığında; güvenli ve bakım maliyeti etkinliği açısından 1950'lerde İngiltere banliyö kapılarının dökme alüminyum veya çelik yerine cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemeden üretilmesi halinde yorulma ömrünün en az iki kat fazla olduğu görülmüştür [1]. İspanyol raylı sistemler üreticisi CAF firması tarafından, İngiliz demiryolu işletmeleri için, tren setlerinin vagon aralarındaki geçiş kapıları, alüminyum dış kaplamalı bal peteği çekirdekli sandviç yapıdan imal edilmiştir [25].

### 2.5. Zemin panelleri

Zemin panelleri kabin tabanında bulunan uzun boyutlu yürüyüş ve yük taşıma amacıyla tasarlanan yapısal bileşenlerdir. Yüksek hızlı trenlerin artan hızı ile artan araç içi gürültü, sorunu yeni bir problemi ortaya çıkarmaktadır. Yüksek hızlı bir trende en gürültülü yerler genellikle vagonun uç kısımlarındadır [26]. Bu alandaki önemli ses kaynakları; boji bölgesindeki tekerlek / ray gürültüsü, aerodinamik gürültü ve titreşimdir [27]. Başlıca gürültü aktarım yolları ise havadan gelen ses ve zeminden gelen yapı kaynaklı sestir [28].

Yüksek hızlı bir trenin kompozit zemini büyük ve karmaşıktır. Dışarıdan içeriye doğru olan sandviç yapıdaki malzemeler titreşim sönümlenme kaplaması, alüminyum ekstrüzyon destek parçaları, ahşap destek kirişleri, titreşim sönümlenme kaplaması, ses emici malzemeleri, ses yalıtım malzemesi, ahşap zemin ve zemin kaplamasından oluşur. Kompozit malzemelerin zemin panellerinde kullanılması ile özellikle ses ve titreşim yalıtımının sağlanması amaçlanmaktadır [29].

### 2.6. Boji

Raylı sistemler aracının bojesi, araç gövdesinin ağırlığını destekler, tekerlekleri üzerinde barındırır ve titreşimleri sönmeler [30]. Bojinin ağırlığı, toplam araç ağırlığının yaklaşık %37'sini oluşturur. Özellikle, boji ağırlığının yaklaşık %20'sini oluşturan boji çerçevesi, aracın gövdesi tarafından dikey yük, frenleme ve hızlanma yükü, burulma yükü ve çekiş yükü gibi ağır statik ve dinamik yükleri desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle, yekpare çelik (özellikle bir yük arabası) veya kaynaklı yapılarla boji çerçeveleri üretmek yaygındır. Bu tür boji çerçeveleri ağırdır [31]. Geleneksel boji yapısı, ağırlığı azaltmak için kaynaklı bir çelik kutu olarak üretilmiştir. Kompozit boji de dış form olarak geleneksel olana benzer. Kompozit bojiler, cam/epoksi önceden reçine emdirilmiş eyaflardan, ribler ve köpük ara tabaka (çekirdeklerden) imal edilir.

### 2.7. Gövde - kabin

Raylı sistemlerde gövdenin hafif tasarıma sahip olabilmesi için kompozitler kullanılmıştır. Bu sayede daha hafif araçlar üretilebilmiş ve faydalı yük kapasitesinde artış sağlanarak veya hafif aracın mevcut demiryolu altyapısı üzerindeki zararlı etkisini azaltarak fayda sağlanmıştır. Kore'de kullanılan bir raylı sistem gövdesinde, sandviç kompozit bir yapının, paslanmaz çelikte birlikte hibrit bir tasarımı kullanılmaktadır [32]. Ağırlığı en aza indirmek için sandviç kompozit yapıdan yararlanılırken, elektrikli ekipmanın kolay montajı ve tasarım modifikasyonu için çelik alt çerçeve kullanılmıştır.

### 3. Raylı Sistemlerde Kullanılan Kompozitlerin Tahribatsız Kontrol Yöntemleri

Raylı sistemlerde de kullanılan kompozitlerin tahribatsız muayenesi, seyahat güvenliğinin sağlanması açısından kritik seviyede önemlidir. 1998 yılında Almanya'da meydana gelen ve 101 kişinin ölümü, 88 ağır toplam 194 yaralanması ile sonuçlanan hızlı tren kazası, tahribatsız muayene tekniklerinin uygun kullanılmaması sonucu meydana gelmiştir. Kompozit bir parça olmamakla beraber, tren tekerleğindeki imalat kaynaklı kusur, ultrasonik tekniklerin uygun şekilde kullanılmaması nedeniyle tespit edilememiş, sonuçta tekerlek yapısal bütünlüğünü kaybederek trenin yüksek hızda raydan çıkmasına neden olmuştur [33]. Bu olay, raylı sistemlerde tahribatsız tekniklerin uygun kullanımı ve güvenilirliğinin yüksek olması gerekliliğinin önemini vurgulamaktadır. Kompozit malzemelerde sık karşılaşılan kusurlar, katmanlar arası ayrılma, çarpılma, darbe, yük kaynaklı hasarlar (çökme, ezilme, fiber kırılması vb.), yüzey çatlakları, erozyon şeklinde sıralanabilir [34].

Kompozitlerin kontrolünde ilk olarak akla gelen tahribatsız muayene metodu görsel muayenedir. 3 boyutlu tarayıcılar, CMM ve diğer hassas ölçüm aletleri ile kompozit malzemelerin ölçüsel değişimleri görülebilir. Yüksek çözünürlüklü kameralar, basit optik büyüteçler yardımıyla; fiber yönelimi, çarpılma, darbe, yük kaynaklı hasarlar (çökme, ezilme, fiber kırılması vb.), yüzey çatlakları vb. süreksizlikler şiddetleri ve konumlarıyla birlikte tespit edilirler [34].

Radyografik test ile bal peteği yapılarda bulunabilen su absorpsiyonu, katmanlar arası ayrılma (delaminasyon) kusurları değerlendirilebilmektedir. Radyasyon kaynağı olarak günümüzde genellikle X ışın katot tüplerinden yararlanılmaktadır [35].

Ultrasonik test tekniği kompozitlerde yaygın olarak kullanılır, katmanlar arası ayrılma, fiber kırıkları, boşluk, çatlak gibi kompozit kusurlarının tespiti yapılabilmektedir [35]. Proben, test parçası ile tam teması (kuplaj) ultrasonik kontrolü yavaşlatan ve hassasiyeti üzerinde etkili olan bir faktördür. Son zamanlarda kompozitlerin ultrasonik kontrolünde daldırma (immersion) tekniği kullanılarak yapılan çalışmalarda, piezo kristal ultrasonik probun test parçasıyla temas etme gerekliliği ortadan kaldırılmaktadır [36]. Yaygın kullanılan bu tekniklerin yanında, akustik emisyon metodu ray testi ile çatlakların tespiti ve rüzgâr türbin kanatçıklarının kontrolünde kullanılmaktadır. Bir diğer test yöntemi olan Fiber Bragg Grating testi ile raylı sistem

tekerleklerinin ve havacılık parçalarının kontrolünde kendine yer bulmaktadır [35], [37], [38], [39], [40].

Kızılötesi termografi, yüzey sıcaklıklarını bir nesneden, bir nesneye doğru, bir nesneden ve/veya bir nesneye akarken ölçen veya haritalayan NDE tekniğinden biridir. Parça içerisinde yer alan süreksizliklerin, kusursuz bölgelerle arasındaki ısı geçirgenlik farklarından yararlanarak, tespit edilebilmesine olanak tanır. İç anomaliler, sıcaklık değerlerindeki değişim veya termal görüntülerde kusurları/anomalileri ‘sıcak/soğuk noktalar’ olarak göstermek için gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanarak tanımlar. Kompozit malzemelerin tahribatsız muayenesinde termografi; yukarıda bahsedilen tekniklere göre daha yüksek işlem hızı, yerinde denetleme imkanı, ısı iletim farkları ile iç kusurların tespiti, çözünürlük, hassasiyet gibi yönleriyle öne çıkmakta ve ultrasonik kontrol gibi tekniklerin yerini almaktadır [41], [42]. Bu yaklaşımda, kısa bir termal darbe, metal ve karbon-karbon malzemeleri gibi yüksek iletkenlik malzemesi için birkaç milisaniyeden, grafit-epoksi katmanlı yapılar gibi düşük iletkenlik numuneleri için birkaç saniyeye kadar sürer. Malzemenin sıcaklığı ilk termal darbeden sonra hızla değişir, çünkü termal difüzyon ile yayılır. Elde edilen termal görüntüler, görüntü işleme gibi teknikler kullanılarak işlenir.

Kompozit malzemelerin tahribatsız muayenesi, metalik malzemelere göre daha zor ve karmaşıktır. Bu durumun başlıca nedenleri; kompozitlerin metallere göre homojen olmaması, her yerinde aynı özellik göstermemesi, metalik malzemelerdeki kadar tahribatsız muayene deneyiminin bulunmaması, kompozit yapıların tamir sonrası muayenesinin zor olması, çoğu teknikte parça üzerine yollanan sinyallerin saçılması şeklinde sayılabilir [42], [43].

#### 4. Metot

Deneyisel çalışma ile termografik kontrolün etkinliği, farklı kompozit hata türlerinde incelenmiştir. Bu amaçla bir ölçüm düzeneği tasarlanarak, numuneler üzerinde testler gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1. Araştırma yöntemi

Yapılan deneysel uygulamada termografik analiz yöntemi ile sıcaklık değerlerindeki değişim veya termal görüntülerde kusurları/anomalileri ‘sıcak/soğuk noktalar’ olarak göstermek için gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanılmıştır. Belirli hata tipleri içeren ve raylı sistemlerde sık kullanılan fiber takviyeli plastik matrisli kompozit malzemelerdeki kusurların tespit edilebilmesi için, ısı plakası kullanılarak test parçaları ısıtılmış ve sıcaklık dağılımı Optris PI 400 model termal kamera ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmada; katmanlar arası yabancı madde, katmanlar arası yüksek ısı iletkenlik farkları, boşluk ve katman kalınlık değişimleri gibi sık karşılaşılabilen kusurların termografi ile tespit edilebilirliği incelenmiştir.

##### 4.2. Örnek kompozit malzeme seçimi ve üretim yöntemleri

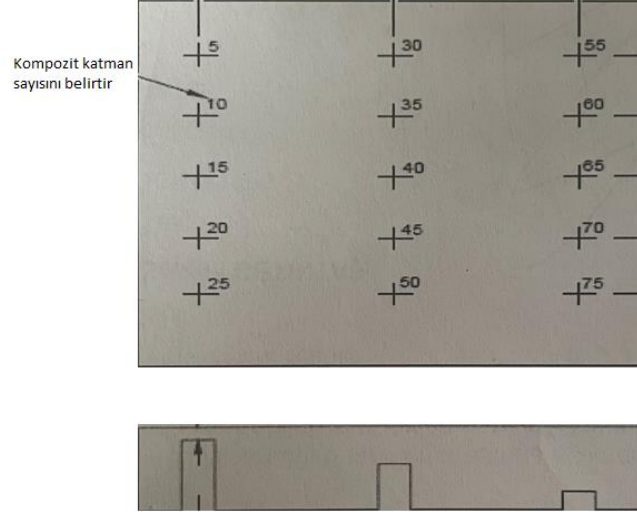
Örnek malzemelerin üretilmesi için raylı sistem iç yapılarında kullanılan hafifliğin ve yüksek mukavemet özelliğinden dolayı önceden reçine emdirilmiş karbon bezi kullanılmaktadır. Ham malzeme olarak Hexcel M70 önceden epoksi reçine emdirilmiş 3K-70-PW karbon bezi kullanılmıştır [44]. 3K-70-PW stil karbon fiber dokuma özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** 3K-70-PW dokuma özellikleri

Stil	Dokuma	Çözgü sayısı	Atkı sayısı	Doldurma ve Çözgü İpliği	Ağırlık (g/m <sup>2</sup> )	Kalınlık (mm)
3K	Plain	11.5	11.5	AS4GP 3K	193	0,22

#### 4.3. Test parçaları ve üretim yöntemleri

Deneylerde kullanılan numuneler, önceden reçine emdirilmiş malzemenin 0/90/-45/+45° yönlerinde ve 80 kat olarak temiz oda koşullarında el yatırması ve vakum çantası yöntemi kullanarak, otoklav fırınında kütleme işlemi uygulanması ile üretilmiştir. Şekil 1’de gösterilen test numunesi üzerinde farklı kalınlıkların tespiti için uygun katmanlar oluşturulmuştur.

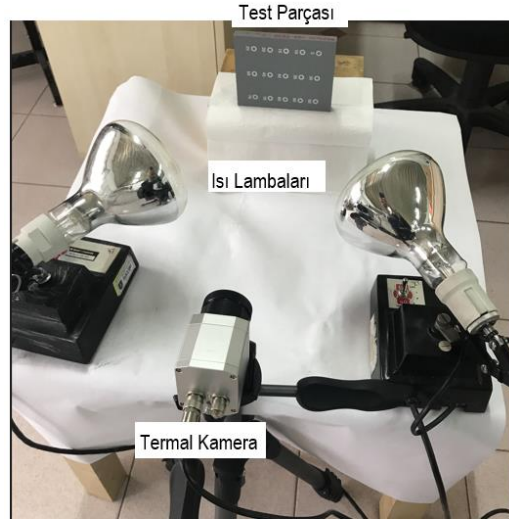


Şekil 1. Karbon epoksi 80 katmanlı test numunesi

Test parçaları için seçilen ham malzemenin şekillendirilip nihai ürüne getirilmesi için 3 farklı üretim yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem sırası ile el yatırması yapılarak parçanın şekli verilmiş, açık kalıplama yapılacağı için vakum çantası yöntemi ile fazla reçinenin alınması ve daha homojen bir yapının oluşması sağlanmış ve önceden reçine emdirilmiş ham malzemenin matris/reçinesinin kür olması için otoklav yöntemi uygulanmıştır. Numuneler, Tenny Engineering Otoklav fırınında 5 C°/dk ısıtma/soğutma hızı ile 175 C°’de 2 saat kürlenmiştir ve oda sıcaklığına soğutulmuştur. Otoklav fırınında kür süresinde 1,37 bar basınç, 0,83 bar vakum uygulanmış, ayrıca kalıp malzeme üzerine yerleştirilen termoçift vasıtası ile kür döngüsü sıcaklığı takip edilmiştir.

#### 4.3. Test düzeneği

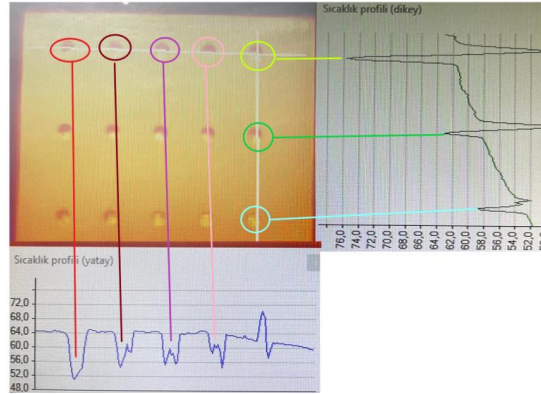
Termografik muayenenin raylı sistemler kompozit yapılarında kontrolünün yapılabilmesi için çeşitli ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer termal uyarım açısından pasif olan (ısı kaynağı olmayan) test parçaları kontrol edilecek ise, termal kameradan sıcaklık değişimlerinin gözlemlenebilmesi için, harici bir ısı kaynağı kullanılmaktadır. Dijital olarak elde edilen ve geriye dönük olarak tekrarlı bir şekilde kontrol yapılabilmesi ve verinin saklanabilmesi amacıyla termal kamera, bilgisayar ve depolama birimi kullanılmaktadır. Ayrıca, kameranın sabitlenmesi için kamera sabitleme ayağı (tripod), kablo bağlantıları gibi yardımcı ekipmanlardan yararlanılmıştır. Şekil 2’de hazırlanan test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2. Test düzeneği

## 5. Bulgular

Birinci test parçasında, üretim esnasında farklı kalınlıklardaki katman sayılarının belirlenebilmesi, ayrıca en fazla kaç katmana kadar tespit yapılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla 5-10-15-20-25-30-60 kat ölçüm sonuçları incelenmiştir.

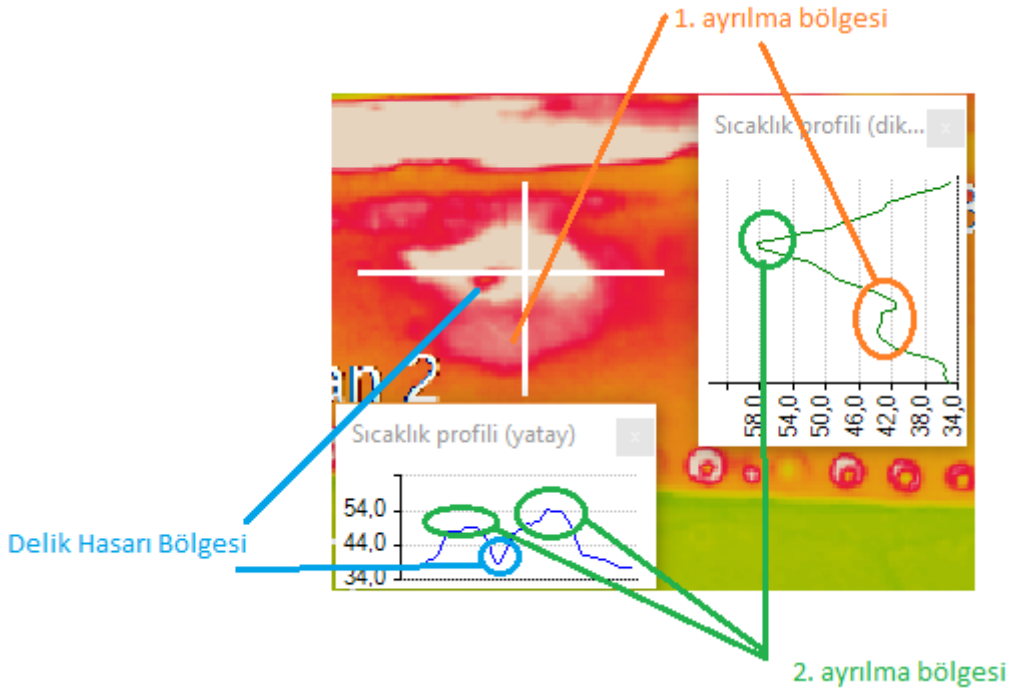


Şekil 3. Test parçası termografik sonuçları

Şekil 3'te birinci test parçasının termografik test sonucu görülmektedir. Yatay ve düşey doğrultudaki sıcaklık ölçüm profilleri(°C), resmin alt ve sağında yer alan grafiklerde görülmektedir. Termal kamera yönünde yüzey düzlemi aynı olmasına rağmen katman kalığı arttıkça ısı kapasite düştüğünden daha soğuk bölgeler tespit edilmiştir.

İkinci test parçasında, birinci test parçasının tersi düşünülerek termal kamera yüzeyinde farklı kalınlıkların termal görüntüsü incelenmiştir ve katmanlı kompozit levhada delik hasarı görüntüsü incelemek amaçlanmıştır.

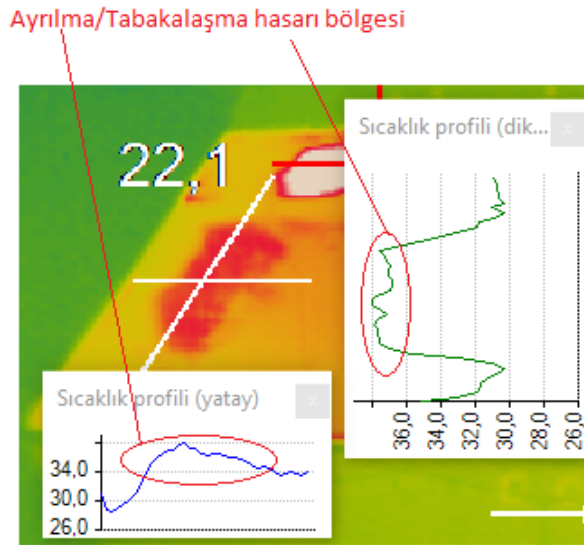




Şekil 4. İkinci test parçası delik hasarı (Yatay ve düşey doğrultudaki sıcaklık ölçüm profilleri(°C)'dir.)

Şekil 4'te gösterildiği gibi ikinci test parçasında delik hasarı olan bölgede çevre yapılara göre daha yüksek sıcaklık tespit edilmiştir, burada aynı ısıl kapasite beklenirken düşen ağırlık/hacim oranından dolayı sıcaklık farkının artmış olduğu görülmektedir. Yatay ve düşey doğrultudaki sıcaklık ölçüm profilleri(°C)'dir.

Üçüncü test parçasında katmanlı kopmpozit yapılarında sıklıkla karşılşın bir diğer hasar tipi olan ayrılma/tabakalaşma hasarının termografik olarak görüntüsü Şekil 5'te incelenmiştir. Tabakalaşma olan bölgelerde ısıl enerjinin yoğunluğunun arttığı ve ayrılan katman ısıl iletkenliği düştüğünden bölgelerin lokal olarak daha sıcak bölgeler olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5. Ayrılma/Tabakalaşma hasar tespiti örneği (Yatay ve düşey doğrultudaki sıcaklık ölçüm profilleri(°C)'dir.)

Üzerinde üç farklı tipte hata oluşturulan test numunelerinin tümünde, termografik kontrol hataları, hızlı bir şekilde konumlarıyla beraber tespit edebilmiştir. Bu durum, termografik kontrol tekniğinin büyük ilgi çekmesi ve ultrasonik C Scan gibi daha yavaş metotlara göre alternatif olarak kullanımına dair görüşleri de desteklemektedir [41], [42].

## 6. Sonuç

Bu çalışmada, önceden reçine emdirilmiş karbon elyafı dokumadan katmanlı olarak imal edilen raylı sistem araçları gövde iç panellerinde kullanılan kompozit deney numuneleri incelenmiştir. Kompozit malzemelerin raylı sistemlerde yüksek rijitlik, mekanik dayanım, ağırlıkta tasarruf gibi avantajlarla öne çıkmaktadır.

Raylı sistemlerde yaygın kullanılan fiber takviyeli plastik matrisli kompozit malzemelerde görülebilen farklı katman kalınlıkları, delik ve ayırma/tabakalaşma hasarı incelenmiştir. Numunelerdeki hasarları termografik değerlendirme performansının elde edildiği bir çalışma yapılmıştır.

Raylı sistemlerde kullanılan kompozit malzemelerde termografinin etkinliğinin incelenmesi amacıyla farklı katman kalınlıklarının tespit edilebilirliği ile nüfusiyet kalınlığının tespit edilmesi, delik hasarının tespit edilebilirliği ve son olarakta ayrılma/tabakalaşma hasarlarının incelenmesi amacıyla test malzemeleri hazırlanmış ve termografik kontrol ile kusur tespitinin etkinliği incelenmiştir. İncelenilen bu kusur tipleri, raylı sistem kompozitlerinde sık karşılaşılabilecek kusurlardır.

Hazırlanan test düzeneğinde, termografik olarak bu hataların tümünün tespit edilebildiği gözlenmiştir. Üretilen kompozit test parçaları, raylı sistem panellerinde kullanılan malzemelerden yapıldığı için, gerçek raylı sistem parçalarında termografik kontrolün uygulanabilirliği de gösterilmiştir. Termografik kontroller ile karmaşık, sökümü zor kompozit tren parçalarının hızlı ve ekonomik tahribatsız testleri mümkün olacaktır.

Test edilen kompozit malzemelerinde, dahili hasarlar incelenmiş olup, gelecek çalışmalarda; malzeme dış yüzeylerinde bulunabilecek hasarların da termografik tekniklerle kontrol edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, raylı sistemlerde kullanılan kompozitlerde bulunabilecek farklı malzeme, parça geometrilerinin ve hata türlerinin de belirlenecek yeni test parametreleri ile termografik metotlarla tespitinde çalışmalar yapılabileceği değerlendirilmektedir.

## Kaynakça

- [1] J. Batchelor, "Use of fibre reinforced composites in modern railway vehicles," *Materials and Design*, vol. 2, no. 4, pp. 172–182, 1981, doi: 10.1016/0261-3069(81)90017-0
- [2] M. Robinson, E. Matsika, and Q. Peng, "Application of composites in rail vehicles," in *ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2017, doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.03965-5
- [3] T. Li and L. Wang, "Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials," *Composite Structures*, vol. 175, pp. 46–57, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.05.001
- [4] H. Y. Sarvestani, A. H. Akbarzadeh, H. Niknam, and K. Hermenean, "3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance," *Composite Structures*, vol. 200, pp. 886–909, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.04.002
- [5] A. Zinno, E. Fusco, A. Prota, and G. Manfredi, "Multiscale approach for the design of composite sandwich structures for train application," *Composite Structures*, vol. 92, no. 9, pp. 2208–2219, Aug. 2010, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2009.08.044
- [6] M. Kim, J. Choe, and D. G. Lee, "Development of the fire-retardant sandwich structure using an aramid/glass hybrid composite and a phenolic foam-filled honeycomb," *Composite Structures*, vol. 158, pp. 227–234, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.09.029

- [7] A. Hörold, B. Schartel, V. Trappe, M. Korzen, and J. Bünker, "Fire stability of glass-fibre sandwich panels: The influence of core materials and flame retardants," *Composite Structures*, vol. 160, pp. 1310–1318, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.11.027
- [8] C. Zhu *et al.*, "Fire performance of sandwich composites with intumescent mat protection: Evolving thermal insulation, post-fire performance and rail industry testing," *Fire Safety Journal*, vol. 116, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103205
- [9] M. Rakotomalala, S. Wagner, and M. Döring, "Recent Developments in Halogen Free Flame Retardants for Epoxy Resins for Electrical and Electronic Applications," *Materials 2010, Vol. 3, Pages 4300-4327*, vol. 3, Aug. 2010, doi: 10.3390/MA3084300
- [10] F. Laoutid, L. Bonnaud, M. Alexandre, J. M. Lopez-Cuesta, and P. Dubois, "New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 63, no. 3, pp. 100–125, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.MSER.2008.09.002
- [11] M. Bar, R. Alagirusamy, and A. Das, "Flame retardant polymer composites," *Fibers and Polymers* 2015 16:4, vol. 16, no. 4, pp. 705–717, Jun. 2015, doi: 10.1007/S12221-015-0705-6
- [12] P. J. Mistry, M. S. Johnson, and U. I. K. Galappaththi, "Selection and ranking of rail vehicle components for optimal lightweighting using composite materials:," <https://doi.org/10.1177/0954409720925685>, vol. 235, no. 3, pp. 390–402, Jun. 2020, doi: 10.1177/0954409720925685
- [13] A. Poudel, K. R. Mitchell, T. P. Chu, S. Neidigk, and C. Jacques, "Non-destructive evaluation of composite repairs by using infrared thermography", *Journal of Composite Materials*, vol. 50, no. 3, pp. 351–363, Mar. 2015, doi: 10.1177/0021998315574755
- [14] B. Ehrhart, B. Valeske, and C. Bockenheimer, *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, Woodhead Publishing, 2013
- [15] T. Ullmann, R. Aoki, and T. Schmidt, "Lock-in Thermography for Process Integrated Non-destructive Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Aircraft Structures," in *10th International conference on Quantitative InfraRed Thermography*, 2010, pp. 781-788
- [16] N. P. Avdelidis, B. C. Hawtin, and D. P. Almond, "Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites," *NDT and E International*, vol. 36, no. 6, pp. 433–439, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0963-8695(03)00052-5
- [17] Quality Magazine, "Active Thermography for Nondestructive Composites Testing", July, 2013, [Online]. Available: <https://www.qualitymag.com/articles/91207-active-thermography-for-nondestructive-composites-testing>, [Accessed: Apr. 26, 2022]
- [18] F. Çeçen , B. Aktaş , H. Öztürk , İ. Ş. Öztürk and M. B. Navdar , "Karbon-Fiber Plaka Donatılı Traverslerin, B70-Tipi Öngerilmeli Beton Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 97-110, Jan. 2022, doi:10.47072/demiryolu.1028740
- [19] A. Singh, Z. Gu, X. Hou, Y. Liu, and D. J. Hughes, "Design optimisation of braided composite beams for lightweight rail structures using machine learning methods," *Composite Structures*, vol. 282, p. 115107, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.115107
- [20] P. J. Mistry, M. S. Johnson, S. Li, S. Bruni, and A. Bernasconi, "Parametric sizing study for the design of a lightweight composite railway axle," *Composite Structures*, vol. 267, p. 113851, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113851
- [21] J. J. Carruthers, M. Calomfirescu, P. Ghys, and J. Prockat, "The application of a systematic approach to material selection for the lightweighting of metro vehicles," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 223, no. 5, pp. 427–437, Sep. 2009, doi: 10.1243/09544097JRRT279
- [22] CER - The Community of European Railways, "Moving towards sustainable mobility summary a strategy for 2030 and beyond for the european railway sector", [Online]. Available: [https://www.cer.be/sites/default/files/publication/CER-UIC\\_Sustainable\\_Mobility\\_Strategy\\_SUMMARY.pdf](https://www.cer.be/sites/default/files/publication/CER-UIC_Sustainable_Mobility_Strategy_SUMMARY.pdf), [Accessed: Apr. 14, 2022].
- [23] V. Giannella, R. Sepe, A. Borrelli, G. de Michele, and E. Armentani, "Numerical investigation on the fracture failure of a railway axle," *Engineering Failure Analysis*, vol. 129, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ENGFANAL.2021.105680
- [24] M. Shahverdi, T. Good, G. Hannema, and R. Paradies, "Towards Noise and Weight Reduction by Application of FRP wheelsets for Freight Cars," *19th International Wheelset Congress*, Italy, 2019
- [25] "Metal composite doors for UK rail," *Reinforced Plastics*, vol. 64, no. 1, pp. 8-8, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.REPL.2019.12.021

- [26] J. Zhang, X. biao Xiao, X. zhen Sheng, R. Fu, D. Yao, and X. song Jin, "Characteristics of interior noise of a Chinese high-speed train under a variety of conditions," *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 18, no. 8, pp. 617–630, Aug. 2017, doi: 10.1631/JZUS.A1600695
- [27] C. Mellet, F. Létourneaux, F. Poisson, and C. Talotte, "High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 293, no. 3–5, pp. 535–546, Jun. 2006, doi: 10.1016/J.JSV.2005.08.069
- [28] H. M. Noh, "Contribution analysis of interior noise and floor vibration in high-speed trains by operational transfer path analysis," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 8, pp. 1–14, Aug. 2017, doi: 10.1177/1687814017714986
- [29] J. Zhang, D. Yao, R. Wang, and X. Xiao, "Vibro-acoustic modelling of high-speed train composite floor and contribution analysis of its constituent materials," *Composite Structures*, vol. 256, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113049
- [30] J. S. Kim, "Fatigue assessment of tilting bogie frame for Korean tilting train: Analysis and static tests," *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, no. 8, pp. 1326–1337, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.10.007
- [31] J. S. Kim and H. J. Yoon, "Structural behaviors of a GFRP composite bogie frame for urban subway trains under critical load conditions," in *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 2375–2380, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.391
- [32] J. S. Kim, S. J. Lee, and K. B. Shin, "Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody," *Composite Structures*, vol. 78, no. 4, pp. 468–476, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.11.006
- [33] Wikipedia, "Eschede\_derailment", [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Eschede\\_derailment](https://en.wikipedia.org/wiki/Eschede_derailment), [Accessed, June, 26, 2022]
- [34] S. Fotouhi, F. Pashmforoush, M. Bodaghi, M. Fotouhi, "Autonomous damage recognition in visual inspection of laminated composite structures using deep learning", *Composite Structures*, vol. 268, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113960
- [35] C. J. Hellier, *Handbook of nondestructive evaluation*, New York, USA, McGraw Hill, 2020
- [36] A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, S. Marzano, M. D. Piccioni, "Mechanical characterization of CFRP composites by ultrasonic immersion tests: Experimental and numerical approaches", *Composites Part B: Engineering*, vol. 66, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.04.024
- [37] D. Xu, P.F. Liu, Z.P. Chen, "Damage mode identification and singular signal detection of composite wind turbine blade using acoustic emission", *Composite Structures*, vol. 255, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112954
- [38] Q. Hao, Y. Shen, Y. Wang, J. Liu, "An adaptive extraction method for rail crack acoustic emission signal under strong wheel-rail rolling noise of high-speed railway", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 154, 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107546
- [39] S. Mishra, P. Sharan, K. Saara, "Real time implementation of fiber Bragg grating sensor in monitoring flat wheel detection for railways", *Engineering Failure Analysis*, vol. 138, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106376
- [40] D. D. Kumar, S. S. Raj, V. Sivananth, V. Ramkumar, "Damage detection in Aerospace structures using Chirped fiber Bragg grating", *Materials Today: Proceedings*, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.149
- [41] R. Yang, Y. He, "Optically and non-optically excited thermography for composites: A review", *Infrared Physics & Technology*, vol. 75, p. 26-50, 2016, doi: 10.1016/j.infrared.2015.12.026
- [42] Composites UK, "How can composites be monitored?", [Online]. Available: <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/properties/inspection>, [Accessed: 25. June-2022].
- [43] A. Ghobadi, "Common Type of Damages in Composites and Their Inspections". *World Journal of Mechanics*, 7, 24-33, 2017, doi: 10.4236/wjm.2017.72003
- [44] Hexcel, "Hex Force Reinforcements" [Online]. Available: [https://lindberg-lund.no/wp-content/uploads/2018/06/Hexcel\\_Handbok\\_fiberprodukter.pdf](https://lindberg-lund.no/wp-content/uploads/2018/06/Hexcel_Handbok_fiberprodukter.pdf), [Accessed, September 19, 2022]
- [45] A. Shimamura, Y. Hotta, H. Hyuga, M. Hotta, K. Hirao, "Improving the thermal conductivity of epoxy composites using a combustion-synthesized aggregated  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> filler with randomly oriented grains", *Scientific Reports*, Vol. 10, 14296, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71745-w>
- [46] X. Pan, M. G. Debije, J. Schenning, W. Cees, M. Bastiaansen, "Enhanced Thermal Conductivity in Oriented Polyvinyl Alcohol/Graphene Oxide Composites", *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 13, 28864, 2021, doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c06415>

**Özgeçmiş****Seyid Fehmi DİLTEMİZ**

1973 yılında Malatya’da doğmuştur. 1994 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 1999-2020 yılları arasında Hava İkmal Bakım Merkez Komutanlığında Malzeme Laboratuvarında çalışmıştır. 2011 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümünde doktora çalışmasını, 2020 yılında Amerika Birleşik Devletleri Calstate Üniversitesinde doktora sonrası araştırmasını tamamlamıştır. Halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümünde Dr. Öğr. Görevlisi olarak çalışmalarını yürütmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

E-posta: fdiltemiz@ogu.edu.tr

**Ersin EROĞU**

1985 yılında Eskişehir’de doğmuştur. 2009 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2007-2012 yıllarında Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.’de Tasarım Mühendisi olarak çalışmıştır. 2012 yılından beridir 1. Hava Bakım Fabrika Müdürlüğünde Kompozit Malzeme Sistem Mühendisi olarak çalışmaktadır. Halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Havacılık Bilimi ve Teknolojisi A.B.D. doktora çalışmasına devam etmektedir.

E-posta: ersineroglu@hotmail.com

**Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.