



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Kalıplama ile Kompozit Parça Üretiminde Hava Kaçak Lokasyon Tespiti

Detection of Air Leak Locations in Composite Part Production Using Vacuum Assisted Resin Infusion Molding

Berkay Aydoğan , Yeliz Pekbey* 

Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, İzmir, Türkiye
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: yeliz.pekbey@ege.edu.tr

Öz

Kompozit parça üretiminde yaygın olarak kullanılan vakum destekli reçine infüzyon kalıplama metodolojisinde, yapıda boşluğa sebebiyet vererek parça kalitesine olumsuz etki eden hava kaçaklarının tespiti ve müdahalesi üretim öncesi veya sırasında çok önemlidir. Kompozit parça içerisine ihtiva etmiş hava boşlukları, endüstriyel uygulamalarda işletmeler için zaman kaybı, yapısal sorunlar ve dolayısıyla maliyet anlamına gelmektedir. Bu çalışmada endüstrideki kaçak tespiti yöntemleri incelenmiş ve hava akış sensörleri ile heterojen geçirgenliğe sahip kompozit parça üretimlerinde kullanılmak üzere bir algoritma geliştirilerek kaçak tespiti üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda termal kütle akış ölçerleri kullanılmış olup, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve çeşitli matematiksel optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Geliştirilen bu sistem endüstriyel ölçekte kullanılabilir şekilde tasarlanmış ve doğrudan hat üzerine montaja uygun biçimde testlere tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmalar vakum destekli reçine infüzyon kalıplama ile heterojen yapıdaki lamine kompozit parça üretiminde hava kaçak tespitinin zorluklarını açıkça ortaya koymuş bu zorlukların hangi yaklaşımlarla ortadan kaldırılabilirliği konusunda öneriler vermiştir. Çalışma sonucunda homojen yapıdaki lamine kompozit parça üretiminde %9,2 heterojen yapıdaki lamine kompozit parça üretiminde %16,5 ortalama hata oranı ile sonuç verebilen bir hava kaçak tespit sistemi geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit parça üretimi, Vakum destekli reçine infüzyon kalıplama, Hava kaçak tespiti, PSO, Termal kütle akış ölçer.

Abstract

In composite part production, particularly using vacuum assisted resin infusion molding methodology, detecting and addressing air leaks that cause voids in the structure and negatively affect part quality is crucial before or during the manufacturing process. Air voids within composite parts lead to time losses, structural issues, and increased costs in industrial applications. This study examines industrial leak detection methods and develops an algorithm using airflow sensors for detecting leaks in composite parts with heterogeneous permeability. The research utilized thermal mass flow meters and applied Particle Swarm Optimization (PSO) along with various mathematical optimization methods. The developed system is designed for industrial-scale use and tested for direct assembly on production lines. The study highlights the challenges of detecting air leaks in the vacuum assisted resin infusion of laminated composite parts with heterogeneous structures and provides recommendations on how to overcome these challenges. As a result of the study, a leak detection system was developed, achieving an average error rate of 9.2% for homogeneous laminated composite parts and 16.5% for heterogeneous laminated composite parts.

Keywords: Composite manufacturing, Vacuum infusion, Air leak detection, Thermal mass flow sensors, PSO, Laminated composites

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

This study focuses on the detection of air leaks in composite parts produced using vacuum assisted resin infusion molding methods, which are critical for maintaining the quality and integrity of the final product. Air leaks can lead to voids and defects, impacting the structural performance of composite materials. The research evaluates current industrial methods and proposes a novel algorithm integrating thermal mass flow sensors and Particle Swarm Optimization (PSO) to accurately identify air leaks during the manufacturing process. The developed system has been validated through rigorous testing and shows promising results,

especially in handling the complexities of heterogeneous laminated composites.

In the realm of composite part manufacturing, particularly with vacuum assisted resin infusion molding techniques, air leaks pose significant quality control challenges. These leaks can introduce voids within the composite structure, compromising the mechanical properties and overall integrity of the final product. Detecting and mitigating these leaks during the manufacturing process is crucial to ensuring high-quality outcomes. This research aims to explore existing industrial leak detection methods and develop a sophisticated algorithm that

utilizes thermal mass flow sensors to enhance the detection accuracy of air leaks in laminated composite parts.

Composite materials produced through vacuum assisted resin infusion molding are widely used in various industries due to their superior mechanical properties and lightweight characteristics. However, the presence of air leaks during the manufacturing process can lead to voids, which compromise the structural integrity of the composite parts. Traditional leak detection methods often fall short in identifying these defects accurately, especially in composites which have heterogeneous permeability lamination. Thus, there is a significant need for a reliable and efficient method to detect air leaks during the manufacturing process.

Materials and Methods

The methodology involves the use of thermal mass flow sensors coupled with PSO, a robust optimization technique, to pinpoint air leaks in composite laminates. Thermal mass flow sensors are employed due to their sensitivity and accuracy in detecting minute changes in airflow, which are indicative of leaks. PSO is an optimization algorithm inspired by the social behavior of birds flocking or fish schooling, and it is utilized to enhance the detection accuracy by optimizing the sensor data interpretation.

The experimental setup included laminated composites made from bi-axial glass fiber fabrics with varying layer densities and incorporated high-permeability polypropylene distribution meshes to simulate industrial conditions. Three different laminate configurations were tested: 2 layers, 10 layers, and 50 layers. Artificial air leaks were introduced using medical needles, creating controlled punctures to test the system's detection capabilities. The performance of the system was evaluated based on its ability to detect these leaks accurately.

Initial algorithmic attempts (MHADG) using fixed airflow values proved inadequate, particularly in regions with high permeability. The MHADG algorithm did not account for variations in airflow over time, which led to inaccuracies. Consequently, the algorithm was refined to account for time-dependent airflow values (ZBADG), enhancing the accuracy by considering the temporal aspect of airflow readings. This approach allowed for a more dynamic and responsive detection system.

Further improvements led to the development of the IZBADG algorithm, which integrated the area under the flow rate curve over time, significantly improving the precision of leak detection. By calculating the area under the curve, the algorithm could better account for variations in airflow that occur due to leaks, providing a more reliable detection method. The IZBADG algorithm was designed to adapt to the specific conditions of each

test scenario, making it robust and versatile for different composite configurations.

Results and Discussion

The IZBADG algorithm demonstrated substantial improvements in detecting air leaks within both homogeneous and heterogeneous laminated composites. The average error rates were reduced to 9.2% for homogeneous composites and 16.5% for heterogeneous composites. The presence of distribution meshes and the number of laminate layers were critical factors influencing detection accuracy. The enhanced algorithm effectively minimized these error rates, showcasing its potential for industrial application.

The findings highlight the complexity of air leak detection in vacuum assisted resin infusion molding processes, especially in heterogeneous laminated composites. The integration of thermal mass flow sensors with PSO optimization offers a viable solution for real-time leak detection, significantly improving manufacturing quality and reducing defect-related costs. The study also underscores the importance of sensor placement and algorithmic adjustments to accommodate varying material permeabilities and structural configurations.

The experimental results revealed that the IZBADG algorithm could effectively detect leaks introduced in various laminate configurations. For the 2-layer configuration, the algorithm showed a high degree of accuracy due to the relatively simple structure and low permeability. In the 10-layer configuration, the presence of more layers introduced additional complexity, but the algorithm still maintained a reasonable error rate. The 50-layer configuration posed the most significant challenge due to its high permeability and complexity, yet the algorithm adapted well, demonstrating its robustness.

The presence of high-permeability polypropylene distribution meshes significantly impacted the detection accuracy. These meshes are used to facilitate resin flow during the resin infusion process, but they also introduce additional pathways for air leaks, complicating detection. The IZBADG algorithm's ability to account for these complexities and maintain accuracy highlights its effectiveness and potential for real-world applications.

Conclusion

The conclusion should summarize the main findings of your study and their implications. It should also restate the purpose of your study and the specific research questions or hypotheses that you addressed. Make sure your extended abstract is free of grammatical, spelling, and punctuation errors. An impactful extended abstract will ensure the readability and citation of your paper.

1. Giriş

Vakum yardımıyla üretilen kompozit bileşenlerin üretim sürecinde, üretilen parçanın takviye ve matris malzemelerinin istenen oranda birleştirilmesi ve parçanın yüzeyine homojen bir basınç dağılımı oluşturulması için bir vakum folyosu gereklidir. Temel görevi, laminat ve ortam arasında yalıtımsal bir sınır oluşturmaktır. Esnek yapısı ve isostatik basınç prensibi sebebiyle, basınç farkı ile oluşan kuvvetler yüzeye eş oranlı ve yüzeyin normali yönünde etki eder.

Üretimi yapılacak olan parçanın içerisine ihtiva etmiş hava kabarcıkları son ürün mekanik özelliklerini düşürmektedir [1]. Fiber takviyeli kompozit yapılarıdaki %1,5'lük bir hava içeriğinin

kayma mukavemetini %50'ye kadar, kayma modulusünü de %10'a kadar düşürebileceğini belirtmiştir [2]. Frascino ve Zabulon (1994) yaptıkları çalışmada karbon takviyeli kompozit yapılarda artan hava içeriğinin yapı içerisinde rijitlik kaybına, dolayısıyla eğilme mukavemetinde ciddi düşüşlere sebebiyet verdiğini belirtmiştir [3]. Frascino ve Zabulon (1994) yaptıkları çalışmada kullanılan hava içerikli panellerin hava içerikleri Tablo 1'de, eğilme mukavemeti değerleri de Tablo 2'de verilmektedir. Bu hava kabarcıkları, yapıya, folyo üzerindeki hasarlardan veya folyoyu kalıba yapıştırıp yalıtımı tamamlamakta kullanılan yapıştırıcı bant ile kalıp yüzeyi arasından girebilir. Bu sebeple parçayı dış ortama karşı koruyan bu yalıtımsal sınırın parça kalitesi açısından önemi büyüktür.

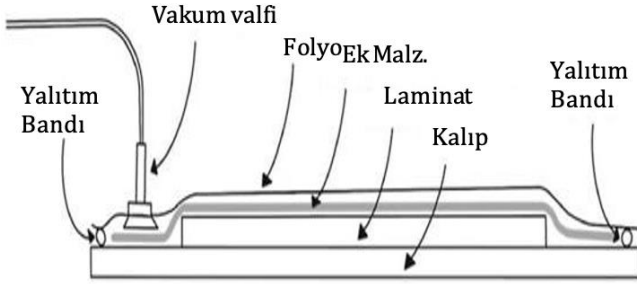
Tablo 1. Çalışma yapılan panellerin hava içerikleri [3].**Table 1.** Air content of the studied panels [3].

Plaka No	Numune No					Ortalama (%Vv)
	1	2	3	4	5	
1	1,39	1,28	1,46	1,22	1,33	1,34
2	4,26	4,33	4,34	3,83	4,32	4,22
3	5,41	5,78	5,37	5,12	4,87	5,31
4	5,81	6,02	5,69	6,06	5,74	5,86

Tablo 2. Çalışma yapılan panellerin eğilme mukavemetleri [3].**Table 2.** Flexural strengths of the studied panels [3].

Plaka No	Eğilme Mukavemeti (MPa)					Ortalama
	1	2	3	4	5	
1	1403	1451	1457	1416	1388	1423
2	1319	1360	1260	1274	1357	1314
3	1190	1219	1280	1209	1177	1215
4	1167	1257	1138	1263	-	1206

Vakum paketleme üretim yöntemlerinde çoğunlukla kullanılan malzemeler Şekil 1'de gösterilmiştir. Vakum folyosu, yalıtım bandı kaçak kaynağını oluşturabilmeleri, emme kumaşı ise bir hava iletim katmanı görevi görmesi sebebiyle kaçak tespitinde büyük önem taşımaktadırlar.

**Şekil 1.** Vakum paketleme şematiği [4,5].**Figure 1.** Vacuum packing schematic [4,5].

Vakumlu paketleme üretim yöntemlerinde uygulama yüksek oranda el işçiliği ile yapılmaktadır. Yalıtım bantları ile yapıştırılan vakum folyosu üzerine yeteri kadar baskı uygulamama, folyo çekilirken meydana gelecek kırışıklıklar, folyo yüzeyine delici/kesici malzemelerle baskı uygulanması, kalıp yüzeyinde meydana gelen mikro çatlaklar gibi sebeplerden dolayı laminasyon içerisine hava kaçakları olmaktadır. Bu hava kaçakları zamanında tespit edilip ilgili tamir veya düzeltmeler uygulanmaz ise mekanik mukavemet düşüşüne sebebiyet vererek kalitesizlik maliyetini ve doğal olarak atık miktarını artırır. Bu sebeplerden dolayı bir kaçak tespiti sisteminin vakumlu paketleme ile kompozit parça üretimi sırasında oluşturulması çok büyük önem arz etmektedir.

Vakumlu paketleme ile kompozit parça üretiminde ticarileşmiş kaçak tespit sistemleri ticari olmayan araştırma veya patent aşamasında olan kaçak tespit sistemlerine göre daha azdır. Mikro ölçekte hava kaçak tespiti için maliyetler artmakta ve tespit süresi ise azalmaktadır. Meskill ve Eret [6] geleneksel olarak kullanılan ultrasonik mikrofona detektörler ve basınç düşümü

testini, hassas ultrasonik mikrofona düzeneği kullanarak geliştirmiş ve ses frekanslarını optimize ederek mikro ölçekteki sızıntı şeklindeki hava kaçaklarını tespit edebilmiştir. Bu yöntem ile vakumlu paketleme ile üretim yapılacak bir kalıpta mobil bir ekipmanda harcanacak zaman kaybının önüne geçmek mümkündür. Ancak fabrika endüstriyel ölçekte düşünüldüğünde ortamdaki gürültü bu yöntemin tarama alanı veya hassasiyetine olumsuz etki edecektir. Haschenburger ve Heim 'in [7] testlerini gerçekleştirdiği hibrit bir yapısı olan vakum kaçak folyosu ile kaçak tespiti yöntemi, hızlı tepki süresi ile yine testini yaptıkları mürekkep yöntemi ve gaz detektörü yönteminin önüne geçmektedir. Ancak büyük çaplı vakumlu paketleme uygulamalarında yüksek maliyet ve zaman kaybına sebebiyet verecektir.

Convergent firması, hava kaçak tespitinde Kütle akış sensörlerini, kaçak tespiti algoritmasıyla kullanarak hızlı ve doğru tespiti sağlamıştır [8]. Bu yöntemde yüksek maliyetli bir çözümdür ancak hassas ve hızlı hava kaçak tespiti yapabilmektedir. Haschenburger vd. [4] bu yaklaşımı geliştirerek sisteme termal kameraların entegrasyonu ve trilateration yönteminin uygulanmasıyla kaçak lokasyonunun tespit hassasiyetini artırmıştır. Petricevic [9] piezoelektrik sensörler kullanarak vakum folyosunun basınç değişimini incelemiştir. Bu basınç değişimi sırasında üzerindeki sinyal değişiminin tespit ederek kaçak tespitini gerçekleştirmiş ve daha basit bir düzenek ile prototip denemelerini gerçekleştirmiştir.

Kızılötesi termografi yöntemi ile de kaçak tespiti yapılabilmektedir. Bu yöntemde Joule-Thompson etkisine dayanmaktadır ve Alman Havacılık ve Uzay Merkezi tarafından patentlenmiştir [4,10]. Kaçak tespit folyosu ile de kaçak tespiti yapılabilmektedir. Bu yöntemde vakum folyosunun altında, içerisinde oksijene tepki veren ve gaz geçirgenliği olan bir membran malzemesi bulunmaktadır. Hava kaçağı meydana geldiğinde ve bu malzeme oksijen ile temasa geçtiğinde görünüşü değişmekte ve hava kaçakları görsel olarak tespit edilebilmektedir [11].

Vakumlu paketleme uygulamaları için maliyet, çevrim süresi, ölçüm hassasiyeti hesaba katıldığında hava akış sensörü ile kaçak tespit sistemlerinin bu üretim metoduna daha verimli sonuçlar verebileceği öngörülmüştür. İlgili metodlar detaylıca incelenmiş olup, Tablo 3'te maliyet, hassasiyet ve süre parametreleri hesaba katılarak karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Bu çalışmada, vakum destekli reçine infüzyon kalıplama ile kompozit parça üretiminde oluşabilecek hava kaçaklarının lokasyonunu tespit edebilecek bir algoritma geliştirilerek hava kaçak tespit sistemi oluşturulmuştur. Kompozit parça üretiminde yaygın olarak kullanılan vakumlu paketleme metodolojisinde, yapıda boşluğa sebebiyet vererek parça kalitesine olumsuz etki eden hava kaçaklarının tespiti ve müdahalesi için üretim öncesi veya üretim sırasında sırasında bir algoritma geliştirilmiştir [12]. Bu amaçla yönelik olarak endüstrideki kaçak tespiti yöntemleri incelenmiş ve bir rüzgâr türbin kanadı imalatında kullanılan cam elyaf kat sayıları ve infüzyon planları referans alınmıştır. Geliştirilen algoritma ile Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve çeşitli matematiksel optimizasyon yöntemleri kullanılarak kaçak tespiti gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar endüstriyel ölçekte kullanılabilecek şekilde tasarlanmış ve doğrudan hat üzerine montaja uygun biçimde testlere tabi tutularak sonuçlar deneysel olarak kıyaslanmıştır.

Tablo 3. Kaçak tespit sistemlerinin büyük çaplı vakum destekli reçine infüzyon kalıplama üretimlerine uygulanabilirliğinin karşılaştırılması.

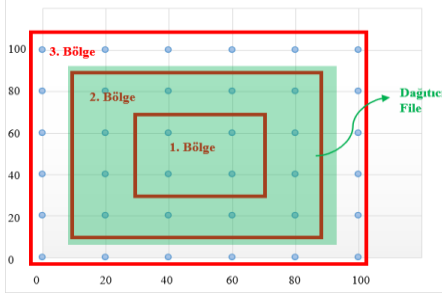
Table 3. Comparison of the applicability of leak detection systems to large scale vacuum assisted resin infusion moulding productions.

Kaçak Tespit Sistemi	Tahmini Yatırım Maliyeti	Tarama Alanı	Tespit Süresi
Mobil UT Mikrofön ve Basınç Düşümü Testi	Düşük	Düşük	Yüksek
Kızılötesi Termografi [4]	Orta	Orta	Düşük
Kaçak Tespit Folyosu [8]	Yüksek	Yüksek	Orta
UT Mikrofön Düzenegi [9]	Orta	Düşük	Düşük
Piezoelektrik Sensör Sistemi [10]	Orta	Orta	Düşük
Özel Mürekkep ile Tespit [7]	Düşük	Düşük	Yüksek
Gaz Detektörü ile Tespit [7]	Orta	Orta	Orta
Kütle Akış Hızı Sensörleri ile Tespit [11]	Orta	Yüksek	Düşük
Termal Kamera ve Akış Hızı Sensör Sistemi [4]	Yüksek	Yüksek	Düşük

Düşük: Maliyet <10k \$, Tarama alanı <5m², Tespit süresi >20 dk Orta: 10k \$<Maliyet<100k \$, 5m²<Tarama alanı<50 m², 10dk<Tespit süresi<20dk. Yüksek: 100k \$<Maliyet, Tarama alanı>50 m², 10dk>Tespit süresi

2. Materyal ve Metot

Yapılacak testlerde bir kompozit parça olarak kabul edilen rüzgâr türbin kanatlarının vakum destekli reçine infüzyon kalıplama yöntemi ile imalatı referans alınmıştır. Bu bağlamda rüzgâr türbin kanatlarında kullanılan biaksiyal 1000 g/m² cam fiber kumaşlar test düzeneklerinde 2,10 ve 50 katman olarak ayrı paketlerde test edilmesi kararlaştırılmıştır. Ek olarak yüksek permabiliteli ayırıcı olarak ise elmas konfigürasyonlu polipropilen dağıtıcı file kullanılmıştır.



Şekil 2. Test düzeneginde bölgelerin gösterimi.

Figure 2. Representation of the zones in the test setup.



Şekil 3. Dağıtıcı fileli (sol) ve dağıtıcı filesiz (sağ) laminalı görseller.

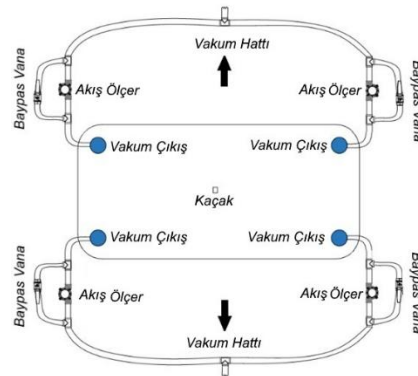
Figure 3. Laminated images with (left) and without (right) diffusing mesh.

Her bir test konfigürasyonunda, paketlerde oluşacak bir hava kaçağını simüle etmek için 0,8 mm çaplı medikal iğneler kullanılmış olup 1000x1000 mm'lik bir laminada toplamda Şekil 2'de gösterildiği gibi 36 adet delik açılması kararlaştırılmıştır. Vakum destekli reçine infüzyon kalıplama ile kompozit parça üretiminde vakum kanallarına olası matris malzeme (testlerde epoksi reçine kullanılmıştır) kaçağını engellemek adına reçine

tuzakları konulur. Yapılan testlerde hava kanalları iki adet reçine tuzakına bağlanmış ve bu tuzaklar ise vakum pompasına bağlanmıştır.

Şekil 3'te görüldüğü üzere paketlerin dört köşesine yerleştirilen akış ölçerler ile deney seti hazırlanmıştır. Dağıtıcı fileli pakette dağıtıcı filenin pozisyonu kenar kısımlardan(kumaş bitiş köşesi) 100 mm uzaklıkta(paket merkezine doğru) olacak şekilde belirlenmiştir. Bir rüzgâr türbin kanadının üretimi sırasında uygulanan infüzyon planları incelendiğinde kabukların ön ve arka keplerine kadar pozisyonlandırılan dağıtıcı fileler, kalıbın bitiş noktalarından ortalama 100 mm boşluk bırakılarak ve paket içerisine vakumu iletebilmek için kenar hatlar boyunca yerleştirilen geçirgenlik seviyesi yüksek cam elyaf emme kumaşları yerleştirilmektedir. Deney çalışmasında bu durum dikkate alınmış ve benzer durum 1000x1000 mm'lik deney çalışmalarında simüle edilmiştir.

Kurulan sistem, her bir sensördeki akış hızları üzerinde hortum uzunluklarının etkisini en aza indirmek için eşit uzunlukta hortumlar kullanarak oluşabilecek sensör okuma sapmalarını en aza indirmek için Şekil 4'te görülebileceği şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4. Kurulan sistemin şeması.

Figure 4. Schematic of the installed system.

Sistemde her sensör vakum hattı girişinin dört adet baypas vana hattı mevcuttur. Bu hatlar her çalışma öncesinde sensör okumalarını eşitlemek(sıfırlamak) için kullanılmıştır. Kaçak lokasyonunu tespit edecek hesaplama algoritması parçacık sürü optimizasyonu (PSO) olarak belirlenmiş ve kaynak koda yazılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde vakum destekli reçine infüzyon kalıplama ile kompozit parça üretiminde oluşabilecek hava kaçaklarının lokasyonunu tespit edebilecek bir algoritma geliştirilerek hava kaçak tespit sistemi oluşturulmuştur. Bu algoritma test sonuçları ile yakınsayıp yakınsamadığı belirlenmiştir. Bu bölümde 2, 10 ve 50 katlı paketlerde BX1000 dağıtıcı fileli ve filesiz test sonuçlarından kaçak tespit dağılımı, mutlak hava akış, zamana bağlı akış, iyileştirilmiş zamana bağlı değerlerine göre kaçak tespit dağılımı anlatılacaktır. Ayrıca, kumaş kat sayısının ve dağıtıcı filenin yapılmış algoritma etkinliği üzerindeki etkisi de tartışılacaktır.

3.1 Mutlak hava akış değerlerine göre (MHADG) yapılan çalışmalar

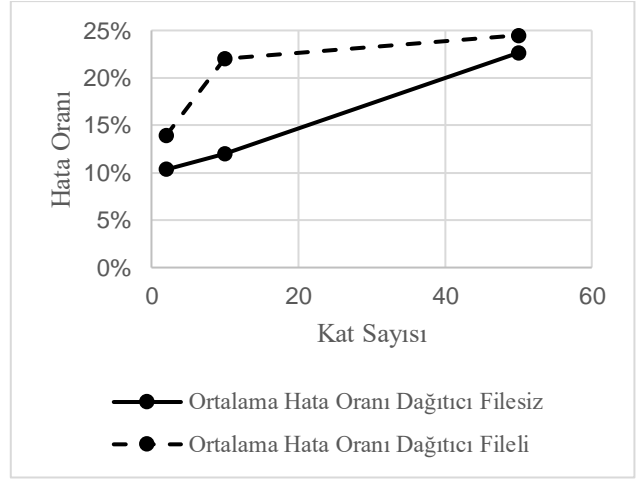
Bu çalışmada vakum destekli reçine infüzyon kalıplama ile kompozit parça üretiminde oluşabilecek hava kaçaklarının lokasyonunu tespit edebilecek bir algoritma geliştirilerek hava kaçak tespit sistemi oluşturulmuştur. Bu algoritma test sonuçları ile yakınsayıp yakınsamadığı belirlenmiştir. Bu bölümde, 2, 10 ve 50 katlı paketlerde BX1000 dağıtıcı fileli ve filesiz test sonuçlarından kaçak tespit dağılımı, mutlak hava akış, zamana bağlı akış, iyileştirilmiş zamana bağlı değerlerine göre kaçak tespit dağılımı anlatılacaktır. Ayrıca, kumaş kat sayısının ve dağıtıcı filenin yapılmış algoritma etkinliği üzerindeki etkisi de değerlendirilecektir.

Bu çalışmada amaç fonksiyonu minimize edilecek şekilde belirlenmiştir. Amaç fonksiyonunun hazırlanması, optimizasyon problemi kurulumunun kritik bir parçasıdır. Ana varsayım, havanın en yakın vakum portuna gitmesiydi. Bunu formüle etmek için, her bir kaçak konumu ile her bir ilgili vakum portundan geçen akış arasındaki mesafe çarpılarak hesaplanır. Ardından, tüm bu değerler bir kümede toplanır. Mesafe arttıkça, akış hızı azalır. Bunlar ters orantılıdır. Bu değer, birçok nedenden dolayı öngörülemez olduğundan (kaçak deliği boyutu, paket içindeki basınç, kaçak sayısı vb.) elde edilen mesafe ve akış hızı çarpımı kümesinin standart sapması olarak hesaplanır.

$$\Phi = StdDev\{\sqrt{(X_i - X_l)^2 + (Y_i - Y_l)^2} F_i | i = 1, n\} \quad (1)$$

Denklem 1, Φ amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. $X_i(i)$. portun x koordinatını; $Y_i(i)$. portun y koordinatını; X_l , hava kaçağının x koordinatını; Y_l , hava kaçağının y koordinatını temsil eder. F_i ise (i). porttaki hava akış hızını, n ise toplam akış ölçer sayısını belirtir. Bu parametreler, hava kaçaklarının en yakın vakum portuna olan uzaklıklarını ve portlardaki hava akış hızlarını hesaplamak için kullanılır.

Deney seti 1000x1000 mm lik bir alanda dağıtıcı fileli ve dağıtıcı filesiz olarak 2,10 ve 50 kat cam elyafı paketler olmak üzere toplam 6 adet yapılmıştır. Paket vakum folyosu ile yalıtılmış ve vakum pompası çalıştırılmıştır. Paket full basınç seviyesine ulaştığında sisteme bağlanan hava akış sensörleri baypas hatları yardımı ile aynı seviyeye(kalibrasyon) getirilmiştir. Her bir testte 36 adet 0,8 mm çaplı yapay kaçak deliği oluşturulmuş ve bu delik koordinatları kaydedilmiştir. Sırasıyla her bir delik lokasyonundan delikler açılmış sensörlerden alınan veriler kaydedilmiştir. Bu esnada, oluşturulan arayüz üzerinden de algoritmanın kaçakı tespit ettiği lokasyon kontrol edilmiştir. Her açılan delik sonrası veri alımı tamamlandıktan sonra delik macun ile kapatılıp bir sonraki delikte aynı işlem tekrarlanmıştır.



Şekil 5. Kumaş katı sayısının ve dağıtıcı filenin MHADG yapılmış algoritma etkinliği üzerindeki etkisi.

Figure 5. The effect of the number of fabric solids and dispersive mesh on the efficiency of the MHADG algorithm.

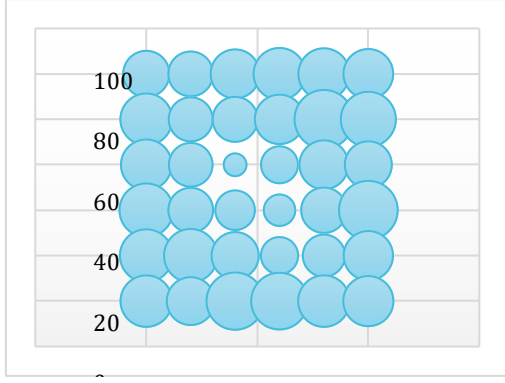
Şekil 5 incelendiğinde mutlak hava akış değerleriyle yapılmış algoritmanın 2, 10 ve 50 katlı paketlerde kaçak tespit hata oranı kapsamında artan bir eğilim göstermektedir. Bu artış, 50 katlı laminasyonlarda özellikle dağıtıcı filesiz yani geçirgenlik homojenliği bulunan paketlerde daha fazla olarak gözükmemektedir. Heterojen geçirgenliğe sahip yani dağıtıcı fileli paketlerde 10 kattan 50 kata geçişte dikkate değer bir değişkenlik bulunmamıştır. 2 ve 50 katlı paketlerde dağıtıcı filenin etkisi 10 katlı paketlere göre daha azdır. Bu durum paket içerisindeki cam elyaf yoğunluğunun çok az veya çok fazla olmasının toplam paket geçirgenliği üzerindeki etkisini göstermektedir.

Tablo 4. Katsayısı ve dağıtıcı file varlığına göre MHADG testlerden elde edilen hata oranları.

Table 4. Error rates obtained from MHADG tests according to the coefficient and the presence of dispersive mesh.

BX1000 Kat Sayısı	Ortalama Hata Oranı (%)	
	Dağıtıcı Filesiz	Dağıtıcı Fileli
2	10,33	13,92
10	11,97	22,03
50	22,64	24,49
Ortalama (%)	14,98	20,14

Tablo 4'teki sonuçlara göre, PSO algoritması ve hava akış sensörleri kullanılarak tasarlanmış bir kaçak tespit sisteminin kaçak tespitini dağıtıcı filesiz bir laminada(homojen) mutlak hava akış değerleri kullanılarak ortalama (2,10 ve 50 katlı çalışma ortalaması) %15, dağıtıcı fileli bir laminada ortalama (2,10 ve 50 katlı çalışma ortalaması) %20,1 hata oranıyla tespit edebilmiştir. Ek olarak kalınlık artışının hava kaçağı durumunda ortalama hata oranını olumsuz etkilediği sonucuna varılabilir. Ayrıca, dağıtıcı filenin varlığı geçirgenlik değerini değiştirdiği için bir diğer hata oranına olumsuz etki eden parametre olarak değerlendirilebilir.



Şekil 6. MHADG Yapılan Çalışmanın Ortalama Hata Oranı Dağılımı.

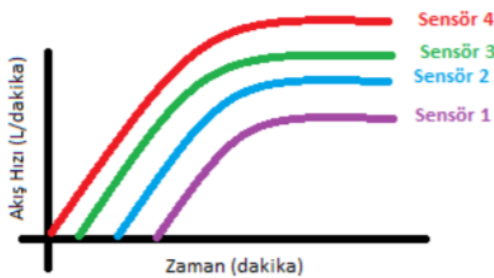
Figure 6. MHADG average error rate distribution of this study.

Hava akış sensörleriyle mutlak akış değerleri analiz edildiğinde, bir dağıtıcı filenin varlığı, bu alanın merkezinde hatanın azaldığını, merkezden uzaklaşıldıkça hata oranının yükseldiğini göstermiştir. Geçirgenlik seviyesi çok daha yüksek bu ağıs yapının paket içerisine giren havayı kendi üzerinde eşit şekilde dağıttığı tespit edilmiştir. Bu durumun geçirgenliği yüksek materyaller üzerinde hava kaçak lokasyon tespitini zorlaştırdığı açıktır. Şekil 6 incelendiğinde 1. bölgede (merkez) ortalama hata oranının düştüğü, 2. ve 3. bölgelerde arttığı görülebilir. Yapılan değerlendirme sonucunda sensörlerden mutlak değerler yerine zamana bağlı verilerin kullanılması uygun görülmüştür.

3.2 Zamana bağlı akış değerlerine göre (ZBADG) yapılan çalışmalar

Bir önceki test çalışmalarından elde edilen veriler değerlendirilmiş ve hava akış sensörlerinin kabiliyetleri de göz önüne alınarak algoritma güncellenmiştir. Güncellenen algortmada akış sensörlerinden saniyede 1 kez bir veri alma frekansında hava akışı bilgisi alınmış ve çalıştırılan kodda hava kaçak lokasyonu tespiti yapılmıştır.

MHADG yapılan çalışmada sabitlenen hava akış değerleri algortmada kullanılmıştı. MHDAG yapılan çalışmada sabitlenen akış değerleri özellikle geçirgenlik seviyesi çok yüksek olan dağıtıcı file alanı üzerinden yüksek hata oranı vermiştir. Bu durumun önüne geçmek ve hata oranını düşürmek için sensörlere gelen hava akışının ne zaman geldiği de algoritma tarafından kaydedilmiş ve zamana bağlı olarak elde edilen akış değerleri kaçak lokasyonunu bulmak için kullanılmıştır. Akış değerleri stabil hale geldiğinden manuel olarak kayıtlar durdurulmuştur. Veri akışı takip edilerek kontrollü bir şekilde deney gerçekleştirilmiştir.



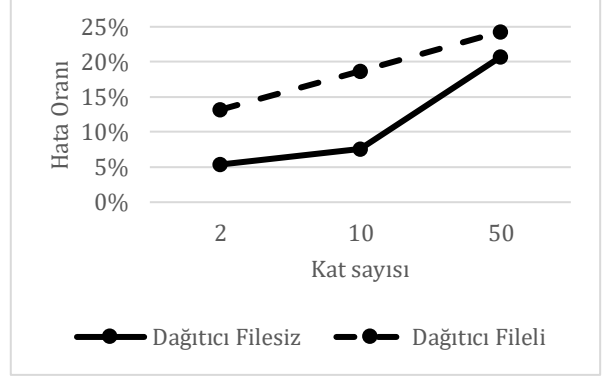
Şekil 7. Zamana bağlı akış değerlerine göre sensörlerin ayrımı.

Figure 7. Separation of sensors according to time-dependent flow values

Şekil 7'de görülebileceği gibi dört adet sensöre farklı zamanlarda gelen akış değerleri aralarında bir fark yaratacak ve amaç fonksiyonuna etkisi olacaktır.

$$\phi = \{\sqrt{(X_i - X_I)^2 + (Y_i - Y_I)^2} \Delta t_i | i = 1, n\} \quad (2)$$

Denklem 2'de görülebileceği gibi zamanın etkisi amaç fonksiyonuna Δt_i olarak eklenmiştir.



Şekil 8. Kumaş katı sayısının ve dağıtıcı filenin ZBADG yapılmış algoritma etkinliği üzerindeki etkisi.

Figure 8. The effect of the number of fabric solids and dispersive mesh on the efficiency of the ZBADG algorithm.

Şekil 8 incelendiğinde, zamana bağlı hava akış değerleriyle yapılmış algoritmanın 2, 10 ve 50 katlık paketlerde kaçak tespit hata oranı artan bir eğilim göstermektedir. Heterojen geçirgenliğe sahip yani dağıtıcı fileli paketlerde 2 kattan 10 kata geçişte %42, 10 kattan 50 kata geçişte hata oranı %30 artmıştır. 50 katlı paketlerde dağıtıcı filenin etkisi diğer paketlere göre çok daha azdır. Bu durum MHADG çalışmasındaki gibi paket içerisindeki cam elyaf yoğunluğunun çok fazla olmasının total paket geçirgenliği üzerindeki etkisini göstermektedir.

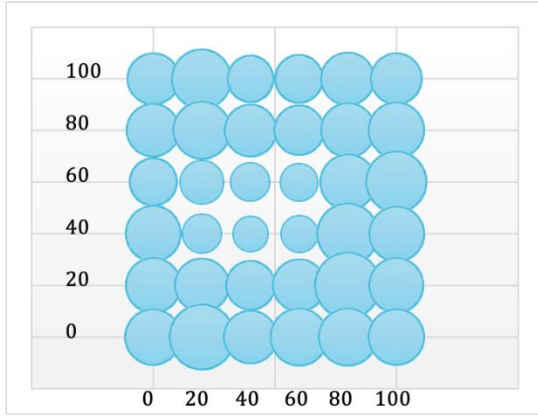
Tablo 5. Katsayısı ve dağıtıcı file varlığına göre ZBADG testlerden elde edilen hata oranları.

Table 5. Error rates obtained from ZBADG tests according to the coefficient and the presence of dispersive mesh.

BX1000 Kat Sayısı	Ortalama Hata Oranı (%)	
	Dağıtıcı Filesiz	Dağıtıcı Fileli
2	5,36	13,17
10	7,63	18,70
50	20,71	24,30
Ortalama (%)	11,24	18,72

Tablo 5'teki sonuçlara göre, PSO algoritması ve hava akış sensörleri kullanılarak tasarlanmış bir kaçak tespit sisteminin kaçak tespitini dağıtıcı filesiz bir laminada (homojen) zamana bağlı akış değerleri kullanılarak ortalama (2,10 ve 50 katlık çalışma ortalaması) %11,2, dağıtıcı fileli bir laminada ortalama (2,10 ve 50 katlık çalışma ortalaması) %18,7 hata oranıyla tespit edebilmiştir. Bir önceki mutlak hava akış değerlerine göre yapılan çalışmaya göre dağıtıcı filesiz paketlerde ortalama (2,10 ve 50 katlık çalışma ortalaması) hata oranında %3,8 dağıtıcı fileli paketlerde ortalama hata oranında %1,4 düşüş yakalanmıştır. Ek olarak kalınlık artışının hava kaçağı durumunda ortalama hata oranını olumsuz etkilediği sonucuna tekrar varılabilir. Dağıtıcı filenin varlığı geçirgenlik değerini değiştirdiği için bir diğer hata oranına olumsuz etki eden parametre olarak değerlendirilebilir. Bu durum, algoritmanın ilk varsayımını (kaçak yoluyla hava, en yakın vakum portlarına daha fazla akar) ihlal edeceği için

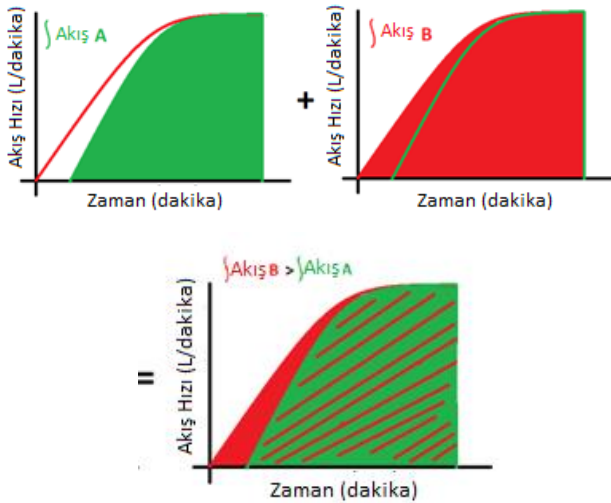
algoritmanın tahmininde hata oluşacaktır.



Şekil 9. ZBADG Yapılan Çalışmanın Ortalama Hata Oranı Dağılımı.

Figure 9. Average error rate distribution of the ZBADG study.

Hava akış sensörleriyle zamana bağlı akış değerleri analiz edildiğinde bir dağıtıcı filenin varlığı, bu alanın merkezinde hatanın azaldığını, merkezden uzaklaşıldıkça hata oranının yükseldiğini tekrar göstermiştir. Geçirgenlik seviyesi çok daha kabiliyetleri de göz önüne alınarak algoritma tekrar güncellenmiştir. Güncellenen algoritmada akış sensörlerinden saniyede 1 kez bir veri alma frekansında hava akışı bilgisi alınmış ve bu veriler veri akışı grafiğinin altında kalan alan hesaba katılarak yani belirli bir veri alım süresi sonunda integral değerlerinin algoritmada çalıştırılması amaçlanmıştır. Çalıştırılan kodda hava kaçak lokasyonu tespiti yapılmıştır.



Şekil 10. İyileştirilmiş zamana bağlı akış değerlerine göre hesaplama yapan algoritma değişikliği.

Figure 10. Modification of the algorithm calculating according to the optimised time-dependent flow values.

MHADG yapılan çalışmada sabitlenen hava akış değerleri, ZBADG yapılan çalışmada ise sensörlere gelen ilk akış zamanı algoritmada kullanılmıştı. Yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler (dağıtıcı file gibi) tüm akışların benzer değerlere yakınsamasına neden olmasına rağmen, sensörlere giden akışın başlangıç zamanı ve akışın yükselme hızı farklıdır. Akış hızının integral değeri hesaplandığında, benzer stabil değere sahip olan iki akış sensörünün birbirleri arasındaki fark ayırt edilebilir. Şekil 10'da

görülebileceği üzere iki farklı zamanda ve eğimde hareket eden hava akışı eğimin altında kalan alanın algoritmaya dahil edilmesi ile daha düşük hatalı sonuç verecektir. Şekil 10'da Akış B'nin, Akış A'dan daha fazla alana sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda algoritma B akışının ilgili sensöre daha yakın olduğunu hesaplayacaktır.

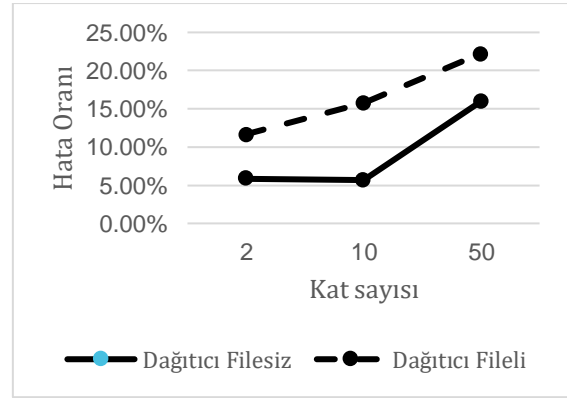
$$\phi = \{\sqrt{(X_i - X_l)^2 + (Y_i - Y_l)^2} \int F_i |i = 1, n\} \quad (3)$$

Denklem 3'te görülebileceği gibi akış değerlerinin oluşturduğu eğimin altında kalan alanlar amaç fonksiyonuna $\int F_i$ olarak eklenmiştir.

Veri akışını otomatik olarak kayıt altına alıp manuel işlemi engellemesi adına algoritmada son on akış değerinin standart sapmasının belirli bir değerin (algoritmada 1 değeri kullanılmıştır) altına inmesi durumu limit olarak belirlenmiştir.

$$\delta = \sqrt{\sum(Q_i - \mu)^2 / N} \quad (4)$$

Denklem 4'de Q_i (i). gözlemdaki akış değerini, μ ortalama akış değerini (tüm gözlemlerin ortalaması) ve N gözlem sayısını göstermektedir. Elde edilen grafikler incelendiğinde standart sapma yaklaşımının verimli sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 11. Kumaş katı sayısının ve dağıtıcı filenin İZBADG yapılmış algoritma etkinliği üzerindeki etkisi.

Figure 11. The effect of the number of fabric solids and dispersive net on the efficiency of the IZBADG algorithm.

Şekil 11 incelendiğinde iyileştirilmiş zamana bağlı hava akış değerleriyle yapılmış algoritmanın 2, 10 ve 50 katlık paketlerde kaçak tespit hata oranı artan bir eğilim göstermektedir. Heterojen geçirgenliğe sahip yani dağıtıcı fileli paketlerde 2 kattan 10 kata geçişte hata oranı %35, 10 kattan 50 kata geçişte hata oranı %41 artmıştır. 50 katlı paketlerde dağıtıcı filenin etkisi diğer paketlere göre çok daha fazladır. Bu durum yine MHADG ve ZBADG yapılan çalışmalarda olduğu gibi paket içerisindeki cam elyaf yoğunluğunun çok fazla olmasının total paket geçirgenliği üzerindeki etkisini göstermektedir.

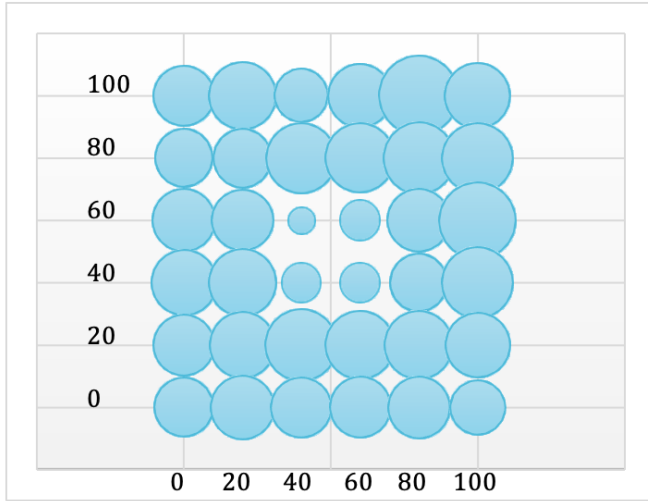
Tablo 6'daki sonuçlara göre, PSO algoritması ve hava akış sensörleri kullanılarak tasarlanmış bir kaçak tespit sisteminin kaçak tespitini dağıtıcı filesiz bir laminada (homojen) iyileştirilmiş zamana bağlı akış değerleri kullanılarak ortalama (2,10 ve 50 katlık çalışma ortalaması) %9,2, dağıtıcı fileli bir laminada ortalama (2,10 ve 50 katlık çalışma ortalaması) %16,6 hata oranıyla tespit edebilmiştir. Bir önceki zamana bağlı hava akış değerlerine göre yapılan çalışmaya göre dağıtıcı filesiz paketlerde ortalama (2,10 ve 50 katlık çalışma ortalaması) hata oranında %2, dağıtıcı fileli paketlerde ortalama hata oranında %2,2 düşüş yakalanmıştır.

Tablo 6. Katsayısı ve dağıtıcı file varlığına göre İZBADG testlerden elde edilen hata oranları.

Table 6. Error rates obtained from IZBADG tests according to the coefficient and the presence of dispersive mesh.

BX1000 Kat Sayısı	Ortalama Hata Oranı (%)	
	Dağıtıcı Filesiz	Dağıtıcı Fileli
2	5,84	11,67
10	5,67	15,74
50	15,96	22,23
Ortalama (%)	9,16	16,55

Ek olarak kalınlık artışının hava kaçağı durumunda ortalama hata oranını olumsuz etkilediği sonucuna tekrar varılabilir. Dağıtıcı filenin varlığı geçirgenlik değerini değiştirdiği için bir diğer hata oranına olumsuz etki eden parametre olarak değerlendirilebilir. Bu durum, algoritmanın ilk varsayımını (kaçak yoluyla hava, en yakın vakum portlarına daha fazla akar) ihlal edeceği için algoritmanın tahmininde hata oluşacaktır.



Şekil 12. İyileştirilmiş zamana bağlı akış değerlerine göre Yapılan Çalışmanın Ortalama Hata Oranı Dağılımı.

Figure 12. Average error rate distribution of the study according to the optimised time-dependent flow values.

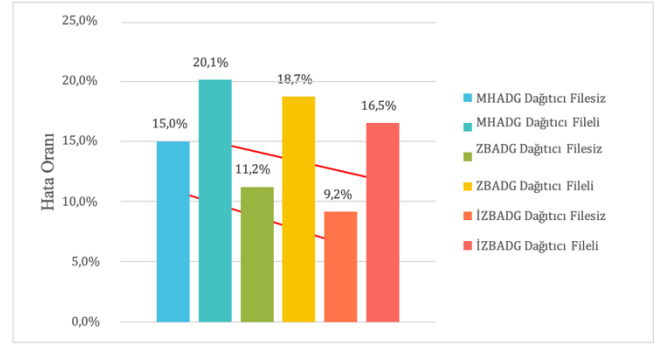
Hava akış sensörleriyle iyileştirilmiş zamana bağlı akış değerleri analiz edildiğinde, bir dağıtıcı filenin varlığı, yine MHADG ve ZBADG yapılan çalışmalarda olduğu gibi bu alanın merkezinde hatanın azaldığını, merkezden uzaklaştıkça hata oranının yükseldiğini göstermiştir. Geçirgenlik seviyesi çok daha yüksek bu ağıs yapının paket içerisine giren havayı kendi üzerinde eşit şekilde dağıttığı tespit edilmiştir. Bu durumun geçirgenliği yüksek materyaller üzerinde hava kaçak lokasyon tespitini zorlaştırdığı açıktır. Yapılan tüm çalışmalar arasında iyileştirilmiş zamana bağlı akış değerlerine göre yapılmış çalışmalar en düşük standart sapma ve hata oranı değerlerini vermiştir.

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmalar sonucunda PSO algoritması ve iyileştirilmiş zamana bağlı akış değerlerine göre 1000x1000 mm boyutlarında ve farklı laminasyon kalınlıklarında kaçak tespitleri gerçekleştirilmiştir. Bu tespitlere göre kat sayısının artışı hata oranını artırmaktadır. Ek olarak geçirgenliği cam elyaf geçirgenliğinden çok daha fazla olan dağıtıcı filenin varlığı özellikle bulunduğu bölgede hata oranını artırmaktadır.

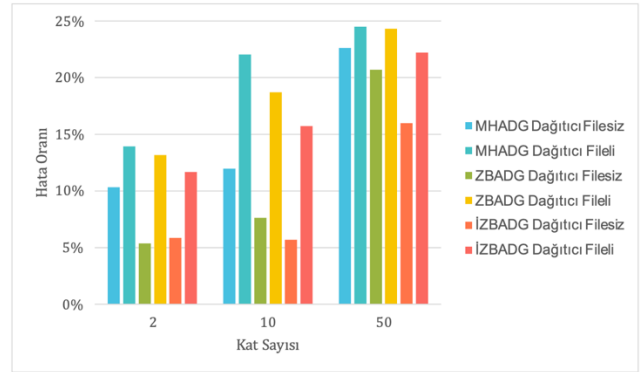
Şekil 13'te görülebileceği üzere yapılan çalışmalar ve algoritma iyileştirmeleriyle 2,10 ve 50 kat laminasyonlarda hava kaçağı tespiti hata oranında düşüş elde edilmiştir. En yüksek hata oranları sırasıyla 50, 10 ve 2 katlık laminalardan elde edilmiş olup kat sayısının major etkisi bu sonuca sebebiyet vermiştir.

Şekil 14'te bu azalım ortalama verilere göre ifade edilirse son durumda dağıtıcı fileli laminatlarda %16,5 dağıtıcı filesiz laminatlarda %9,2 seviyelerine getirilmiştir. Algoritma iyileştirmelerinin dağıtıcı filesiz çalışmalarda hata oranını ortalama %5,8, dağıtıcı fileli çalışmalarda ortalama %3,6 düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 13. Algoritmaların 2,10 ve 50 katlı çalışmalardaki ortalama hata oranları.

Figure 13. Average error rates of the algorithms in 2,10 and 50-fold runs.



Şekil 14. Algoritmaların hata üzerindeki etkisi.

Figure 14. The effect of algorithms on error.

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çalışmanın hedefi olan heterojen geçirgenliğe sahip paketler içerisinde gerçekleşen hava kaçağı tespitini, 2 katlı laminasyonlar için ortalama %11,7, 10 katlı laminasyonlar için ortalama %15,7 ve 50 katlı laminasyonlar için ortalama %22,2 lik hata oranlarıyla gerçekleştirmiştir.
- Laminasyon kat sayısının artışı hava akış sensörleri ile kaçak tespitini zorlaştırmaktadır.
- Yüksek geçirgenliğe sahip dağıtıcı filenin varlığı sistem içerisinde hava yönelim hızını major olarak tesir etmekte ve bölgesel olarak hata oranlarına etki etmektedir.
- Çalışmadan elde edilen verilerin daha fazla deney ile desteklenmesi ve özellikle dağıtıcı filenin 1000x1000 mm 'lik bir laminatta 800x800 mm'lik bir alan içerisinde kullanıldığı hesaba katılarak daha büyük boyutlarda deneylerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Bu yapılacak deneylerde dağıtıcı filenin boyutunun artması dikkatle incelenmeli ve artan boyutta hava kaçağının hareket hızı kayıt altına alınmalıdır. Bu adım sonrasında

elde edilecek veriler analiz edilip bir yapay zeka algoritması ile desteklenmeli ve sonuçlar bölümünde bahsedilen düzensizliklerin hata oranına etkisi azaltılmalıdır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, deneysel testlerin gerçekleştirilmesindeki ekipman desteklerinden dolayı TPI Kompozit SAN. ve TİC. A.Ş. teşekkürlerini sunarlar.

Yazar katkılarının beyanı

İlk yazar, literatür taraması, makale yazımı, deney tasarımı ve analizlerin gerçekleştirilmesi konularında görev almış, ikinci yazar ise metodolojinin geliştirilmesi, düzenlenmesi ve denetlemesini gerçekleştirmiştir.

Kaynaklar

- [1] Medikhani, M., Gorbatikh, L., Verpoest, I., Lomov, S., 2019. Voids in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review on Their Formation, Characteristics, and Effects on Mechanical Performance. *Journal of Composite Materials*, Cilt. 53(12), s. 1579-1669. DOI: 10.1177/0021998318772152
- [2] Hancox, N.L., 1977. The Effects of Flaws and Voids on the Shear Properties of CFRP. *Journal of Materials Science*, Cilt. 12, s. 884-892. DOI: 10.1016/0010-4361(78)90377-4
- [3] Frascino, Mfiller de Almeida, Zabulon dos Santos Nogueira, 1994. Neto Effect of Void Content on the Strength of Composite Laminates. *Composite Structures*, s. 139-148. DOI: 10.1016/0263-8223(94)90044-2
- [4] Haschenburger, A., Menke, N., Stüve, J., 2021. Sensor-Based Leakage Detection in Vacuum Bagging. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 116(7-8), s. 2413-2424. DOI: 10.1007/s00170-021-07505-5
- [5] Lengsfeld, H., Altstadt, V., Wolff-Fabris, F., Kramer, J., 2014. *Composite Technologi*. DOI: 10.3139/9783446440807
- [6] Meskel, C., Eret, P., 2012. Microphone Arrays for Compressed Air Leakage Detection. Evaluation of On-Site Energy Generation for Manufacturing Industry in a Decarbonized Energy System. 4th Berlin Beamforming Conference, 22-23 Kasım, Berlin, s. 6-9.
- [7] Haschenburger, A., Heim, C., 2019. Two-Stage Leak Detection in Vacuum Bags for the Production of Fibre-Reinforced Composite Components. *CEAS Aeronautical Journal*, Cilt. 10(3), s. 885-892. DOI: 10.1007/s13272-018-00357-y
- [8] David, M., Ee, V., Edvin, M., Bernstein, J.R., Wagner, J.W., 2021. Detection, Monitoring, and Management of Gas Presence, Gas Flow, Gas Leaks in Composites Manufacturing. *Convergent Manufacturing Technologies Inc.*, EP2861411A1, 5s.
- [9] Petricevic, R., Radestock, O., 2015. Technical Report: Leakage-Detection and -Localization with Vacuum-Autoclave-Processing of FRPs (iNDTact).
- [10] Bolke, J., Uçan, H., Stefaniak, D., Krombholz, C., Gramm, L., 2012. Leckageerkennung. DE102011100096B4, s. 1-7.
- [11] Finley, M., Michael, B., Kenneth, D., 2010. Leak Detection in Composite Tools. The Boeing Company, US 2010/0170326A1, s. 1-5. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/043981096/publication/US2010170326A1?q=US20100170326A1> (Erişim Tarihi: 21.12.2024)
- [12] Aydoğan, B., 2024. Vakum İnfüzyon ile Heterojen Yapıdaki Laminallı Kompozit Parça Üretiminde Hava Akış Sensörleri Kullanılarak Hava Kaçak Lokasyon Tespiti. Ege Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 103s, İzmir.