
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KOMPOZİT RADOMLARDA TAMİR UYGULAMALARININ MEKANİK VE ELEKTROMANYETİK PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİ

Muhammed Esad KARADUMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammed Esad KARADUMAN

23/06/2025

KOMPOZİT RADOMLARDA TAMİR UYGULAMALARININ MEKANİK VE ELEKTROMANYETİK PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammed Esad KARADUMAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında, havacılıkta kullanılan bir kompozit radomun hasar görmüş bölgelerine çeşitli tamir yöntemleri uygulanarak, yapısal dayanımın yeniden kazandırılması ve elektromanyetik performansın korunması amaçlanmıştır. Radomlar, sadece yapısal taşıyıcı elemanlar değil, aynı zamanda radar sistemlerinin sürekliliğini sağlayan elektromanyetik geçirgen yapılardır. Bu nedenle, tamir işlemleri yalnızca mekanik değil, aynı zamanda elektromanyetik bütünlüğü de koruyacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu kapsamda, kuvars fiber takviyeli, epoksi reçine esaslı prepreg malzeme kullanılmış ve bal peteği yapısıyla sandviç panel formunda kuponlar üretilmiştir. Elle serim yöntemiyle hazırlanan kuponlar, otoklav ile kürlenerek nihai forma getirilmiş; ardından merdiven tipi hata açma işlemleri uygulanarak farklı tamir senaryoları oluşturulmuştur. Bu senaryolar kapsamında hem ek kat içeren hem de ek katsız tamir uygulamaları gerçekleştirilmiş ve her biri tahribatlı (ASTM C393 standardına uygun üç nokta eğme testi, ASTM C297 standardına uygun sandviç yapı çekme testi) ve tahribatsız (TTU, mikroyapı analizi) test yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Ayrıca, radyo frekans geçirgenlik performansı da S-parametre ölçümleri ile analiz edilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, kompozit radom yapılarında uygulanabilecek tamir yöntemlerinin yapısal ve elektromanyetik performans üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak inceleyerek, en uygun ve optimize tamir stratejilerini belirlemektir.

Bilim Kodu	:	91417
Anahtar Kelimeler	:	Radom, kompozit yapı tamiri, kompozit hasarı, kuvars fiber
Sayfa Adedi	:	81
Danışman	:	Doç. Dr. Fatih AKTAŞ
İkinci Danışman	:	Doç. Dr. Mehmet Çağrı TÜZEMEN

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND ELECTROMAGNETIC PERFORMANCE OF REPAIRED COMPOSITE RADOMES

(M. Sc. Thesis)

Muhammed Esad KARADUMAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

In this thesis, various repair techniques were applied to the damaged regions of a composite radome used in aerospace applications to restore structural integrity and preserve electromagnetic performance. Radomes are not only structural components but also electromagnetically transparent enclosures that ensure the continuity of radar systems. Therefore, repair procedures must be designed to maintain both mechanical strength and electromagnetic transparency. Within this scope, quartz fiber-reinforced, epoxy resin-based prepreg materials were utilized to fabricate sandwich panel coupons with a honeycomb core structure. The coupons were manufactured using the hand lay-up method and cured in an autoclave to achieve their final form. Subsequently, step-scarf defects were introduced to simulate damage scenarios, and different repair configurations—both with and without additional reinforcing plies—were implemented. Each repair scenario was evaluated using both destructive (three-point bending tests in accordance with ASTM C393 and flatwise tensile tests in accordance with ASTM C297) and non-destructive (TTU and microstructural analysis) test methods. Furthermore, radio frequency (RF) transparency performance was assessed through S-parameter measurements. The primary objective of this study is to comparatively investigate the effects of various repair methods on the structural and electromagnetic performance of composite radomes and to determine the most effective and optimized repair strategies.

Science Code	:	91417
Key Words	:	Radome, composite structure repair, composite damage, quartz fiber
Page Number	:	81
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Fatih AKTAŞ
Co-Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Mehmet Çağrı TÜZEMEN

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasında bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, değerli katkı ve destekleriyle her aşamada yanımda olan tez danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Fatih AKTAŞ ve Doç. Dr. Mehmet Çağrı TÜZEMEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma süreci boyunca birlikte emek verdiğimiz, fikir alışverişlerinde bulunduğumuz ve pek çok zorluğun üstesinden birlikte geldiğimiz değerli ekip arkadaşlarım Kurtuluş ERSOY, Yasin KARSANDIK, Merve Yıldız BOZER, Akif YURT ve Mustafa FURTANA'ya da gönülden teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, sevgisi ve desteğiyle beni bugünlere getiren değerli anneme ve babama; kardeşlerime minnettarlığımı sunuyorum. Akademik hayatım boyunca bana daima destek olan, sabır ve anlayışlarıyla motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan sevgili eşim Çağla KARADUMAN ve varlığıyla hayatıma neşe katan oğlum Çınar KARADUMAN'a en derin şükranlarımı sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. KOMPOZİT MALZEMELER VE TAMİR YÖNTEMLERİ 5

2.1. Kompozit Malzemeler 5

2.1.1. Takviye lifleri 5

2.1.2. Quartz fiber takviyeli kompozitler 5

2.2. Kompozit Tamir Yöntemleri 8

3. LİTERATÜR TARAMASI 17

3.1. Radom Yapıları 17

3.2. Radom Tasarım Kriterleri 17

3.3. Radom Tamir Performansı 19

4. MATERYAL VE YÖNTEM 25

4.1. Malzeme Seçimi 25

4.2. Kupon Üretimleri 25

4.3. Tamir Uygulamaları 30

4.3.1. Hata açma 32

Sayfa

4.3.2. RF kupon tamirleri 34
4.3.3. Otoklav kupon tamirleri 37
4.4. Mekanik Test Düzenekleri 38
4.5. TTU Ölçüm Cihazı 39
4.6. Mikro Yapı analizi 39
4.7. Elektromanyetik Ölçüm Test Düzeneği 41
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 43
5.1. Ultrasonik Muayene Bulguları 45
5.2. Mikro Yapı Analizi 47
5.3. Üç Nokta Eğme Testi 49
5.4. Sandviç Yapı Çekme Testi 52
5.5. Otoklav Kuponları 62
5.6. Ultrasonik Muayene Bulguları 64
5.7. RF Test Sonuçları 65
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 73
KAYNAKLAR..... 77
ÖZGEÇMİŞ..... 81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Üretim ve kullanım sırasındaki hataların listesi 9

Çizelge 4.1. Otoklav kürleme çevirimi 28

Çizelge 4.2. Isı battaniye kürleme çevirimi 37

Çizelge 5.1. Üç nokta eğme testi sonuçları 51

Çizelge 5.2. Sandviç yapı çekme testi sonuçları 62

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Boeing 787 uçağında kullanılan kompozit malzemeler 1

Şekil 1.2. Uçaklarda kullanılan kompozit yüzdeleri 2

Şekil 1.3. Hava araçlarında kullanılan çeşitli radom örnekleri 4

Şekil 2.1. Cam fiber üretimi 7

Şekil 2.2. Ultrasonik muayene yöntemleri 11

Şekil 2.3. Yapısal tamir tipleri 13

Şekil 2.4. Final torbalama ve ısı battaniye ile kürleme 15

Şekil 3.1. Radom duvar yapıları 19

Şekil 3.2. Tamirli kompozit RF geçirgenliği grafiği 21

Şekil 3.3. Tamir katmanlarının şekline dayalı dayanımları 22

Şekil 4.1. A, C, E kupon tamiri 31

Şekil 5.1. ASTM C393 test konfigürasyonu 50

Şekil 5.2. ASTM C297 test konfigürasyonu 53

Şekil 5.3. RF kuponlar |S21| sonuçları 66

Şekil 5.4. RF kuponlar |S11| sonuçları 67

Şekil 5.5. C kuponu |S21| sonuçları 68

Şekil 5.6. C kuponu |S11| sonuçları 68

Şekil 5.7. D kuponu |S21| sonuçları 69

Şekil 5.8. D kuponu |S11| sonuçları 69

Şekil 5.9. E kuponu |S21| sonuçları 70

Şekil 5.10. E kuponu |S11| sonuçları 71

Şekil 5.11. E kuponu |S21| sonuçları 71

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.12. E kuponu |S11| sonuçları 72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. GERBER marka prepreg kesim cihazı 26

Resim 4.2. Temiz oda 26

Resim 4.3. Serim işlemleri 27

Resim 4.4. Final Torbalama 27

Resim 4.5. ASC marka otoklav 28

Resim 4.6. Üretilen kuponlar 29

Resim 4.7. Bindirme (scarf) yöntemi hata açma 32

Resim 4.8. Merdiven (step) metodu hata açma 33

Resim 4.9. Konik (scarf) hata 33

Resim 4.10. Merdiven (step) hata 34

Resim 4.11. RF kuponlar tamir görselleri 35

Resim 4.12. Final torba ve ısı battaniye 36

Resim 4.13. MTS marka test ekipmanı 38

Resim 4.14. TTU cihazı 39

Resim 4.15. Nikon ECLIPSE MA200 cihaz 40

Resim 4.16. Bakalite alınmış numuneler 40

Resim 4.17. RF ölçüm cihazı 41

Resim 5.1. A ve B RF kupon görüntüsü 43

Resim 5.2. C RF kuponu ön ve arka görüntüsü 44

Resim 5.3. D RF kuponu ön ve arka görüntüsü 44

Resim 5.4. E ve F RF kupon görüntüsü 45

Resim 5.5. TTU Test Düzeneği 46

Resim 5.6. RF test kuponları -6dB kayıp görüntüsü 47

Resim **Sayfa**

Resim 5.7. RF Test kuponları -12DB kayıp görüntüsü 47

Resim 5.8. Mikroskop numuneleri..... 48

Resim 5.9. B numunesi mikroskop görüntüsü 48

Resim 5.10. D numunesi mikroskop görüntüsü..... 49

Resim 5.11. Üç nokta eğme testi kırım görselleri..... 50

Resim 5.12. A kuponu sandviç yapı çekme testi 54

Resim 5.13. B kuponu sandviç yapı çekme testi 55

Resim 5.14. C kuponu sol parça sandviç yapı çekme testi 56

Resim 5.15. C kuponu orta parça sandviç yapı çekme testi..... 57

Resim 5.16. D kuponu sandviç yapı çekme testi 58

Resim 5.17. E kuponu sandviç yapı çekme testi..... 59

Resim 5.18. F kuponu sandviç yapı çekme testi..... 60

Resim 5.19. Referans kupon sandviç yapı çekme testi 61

Resim 5.20. C kuponu otoklav tamir ön ve arka görüntüsü..... 63

Resim 5.21. D kuponu otoklav tamir ön ve arka görüntüsü 63

Resim 5.22. E ve F otoklav tamiri kuponları görüntüsü 64

Resim 5.23. Otoklav tamiri tahribatsız muayene sonuçları 65

SİMGELER VE KISALTMALAR

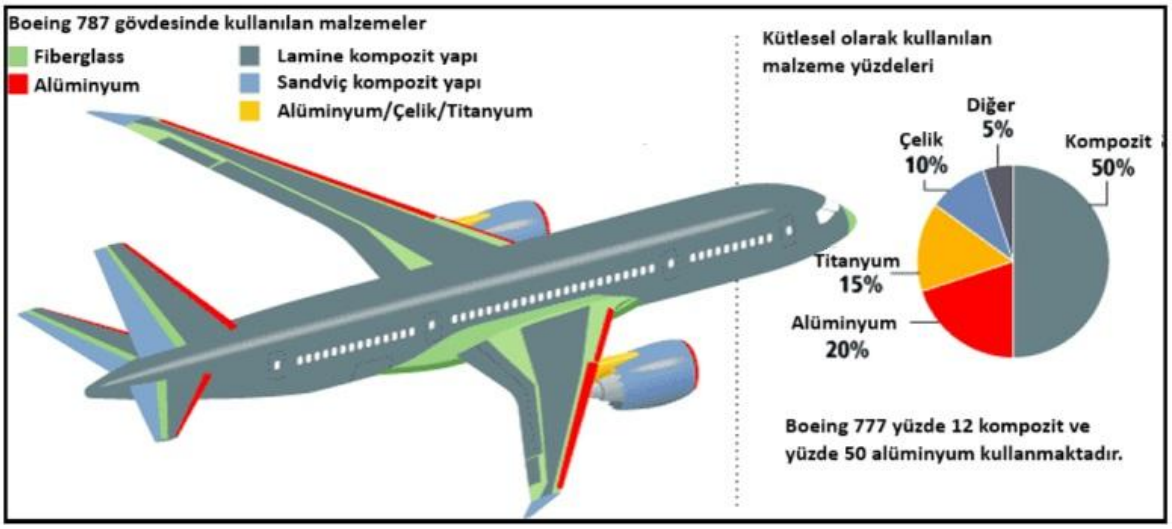
Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
MPa	Megapascal
N	Newton
db	Desibel
hz	Hertz
mm	Milimetre
in	İnç
εr	Dielektrik sabiti
tan δ	Dielektrik kayıp tanjantı (loss tangent)
λ	Elektromanyetik dalga boyu
%	Yüzde
C^0	Santigrat derece

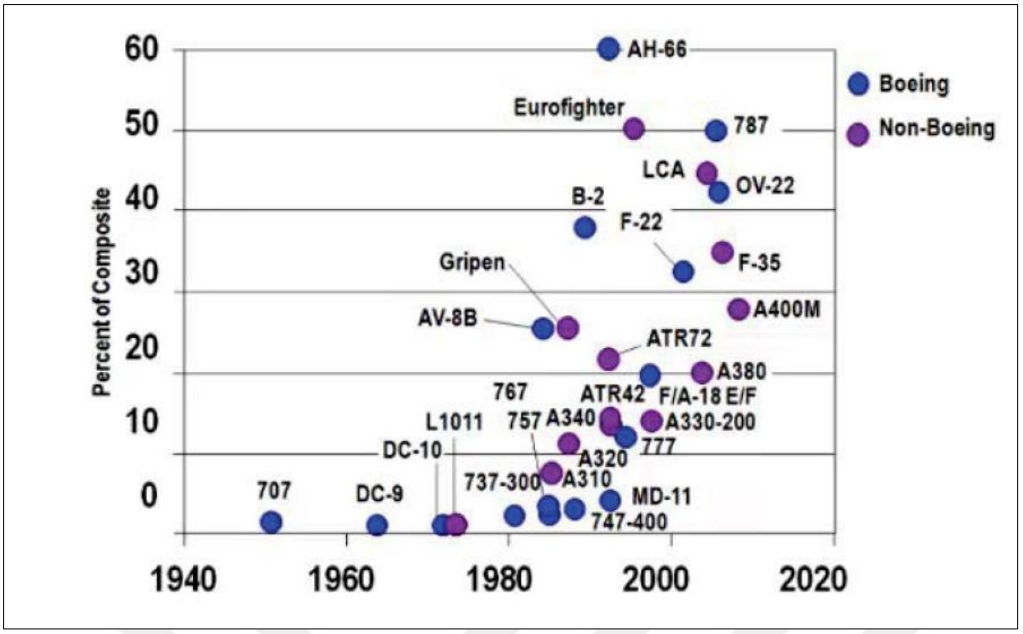
Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ASTM	American Society for Testing and Materials
EM	Elektromanyetik
NDT	Non-Destructive Testing
RF	Radyo frekans
SiO_2	Silika
SRM	Structural Repair Manual
TTU	Through-Transmission Ultrasound
UD	Unidirectional (tek yönlü takviye yönelimi)

1. GİRİŞ

Havacılık endüstrisinde kompozit malzemelerin kullanımı, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi avantajları nedeniyle giderek yaygınlaşmaktadır. Hava araçlarının birincil yapılarında dahi sıklıkla kompozit malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Şekil 1.1'de örneği verilen, Boeing 787 ve Airbus A350 XWB uçaklarının yapısal bileşenlerinin %50'den fazlası, alüminyum alaşımları yerine kompozit malzemelerden üretilmiştir [1]. Geleneksel metal malzemelere kıyasla, kompozit malzemeler uçak yapılarında daha hafif ve dayanıklı çözümler sunarak yakıt verimliliğini artırmakta aynı zamanda işletme maliyetlerini düşürmektedir. Alüminyum gibi metalik malzemelerin yerine kompozit malzemelerin kullanılması, yapısal ağırlıkta %15-30 oranında bir azalma sağlamakta ve bu da yakıt verimliliğinde %20-25 oranında bir iyileşmeye katkıda bulunmaktadır [2]. Tarihsel olarak ilerleyen süreç içerisinde hava araçlarındaki farklı modellere göre kompozit kullanım oranları Şekil 1.2'de görüldüğü üzere artış göstermektedir.



Şekil 1.1. Boeing 787 uçağında kullanılan kompozit malzemeler [1]



Şekil 1.2. Uçaklarda kullanılan kompozit yüzdeleri [3]

Uçaklarda kullanılan kompozit bileşenlerden biri de radom yapılarıdır. Radom aslında "radar" ve "dome" terimlerinin birleşmesiyle oluşan, bir radarın üzerine yerleştirilen ve onu fiziksel çevresel etkilere karşı koruyan yapıdır [4]. Çeşitli radom örnekleri Şekil 1.3'te sunulmuştur. Bu yapı, radar sinyallerinin iletimine olanak tanırken aynı zamanda çevresel etkilere karşı da koruma sağlamaktadır. Çalışma frekanslarında radyo frekans (RF) iletim performansını koruması gereken radomlar, aynı zamanda yıldırım çarpması, yağmur aşındırması, kuş çarpması, aerodinamik ve termodinamik yükler gibi dış etkilere de dayanıklı olmalıdır [5]. Radomun tasarımında kullanılan kompozit malzemeler, yüksek elektromanyetik geçirgenlik ve mekanik dayanım özellikleri ile optimize edilmektedir. Bu yapılar tüm kritik senaryolar göz önünde bulundurularak tasarlansa da mekanik ve çevresel etkilerden dolayı zamanla hasar görmesi kaçınılmazdır. Radomlar, çeşitli çevresel ve operasyonel etkilere bağlı olarak hasar görebilmektedir. En yaygın hasar türlerinden biri, statik deşarj (elektrik boşalması) sonucu oluşan deliklerdir. Bu delikler büyük ve kolayca fark edilebilir olabileceği gibi, gözle zor tespit edilebilen küçük delikler de olabilir. Ancak, boyutlarından bağımsız olarak, bu delikler nemin radom içine sızmasına ve zamanla iç tabakalarda delaminasyona sebep olabilir. Özellikle, ısıl farklar oluşması sonucu nemin donması ve çözünmesi durumunda yapısal hasar daha da ciddi hale gelebilir. Ayrıca, iç yüzeyde nem birikmesi radar sinyallerinin iletim performansını bozarak sinyal kaybına ve geri dönüşlerin zayıflamasına yol açabilir. Bunun yanı sıra, yüksek hızlı hava akımı etkisi, delikler aracılığıyla radomun iç yüzeyine nüfuz ederek iç yapının kırılmasına ve balpeteği

malzemenin üst tabakalardan ayrılmasına neden olabilir. Radom hasarlarına ayrıca taş veya kuş çarpması gibi darbeler ile yanlış bakım ve taşıma süreçleri de sebep olabilmektedir. Bu tür fiziksel hasarlar genellikle yüzeyde çizik ve ezik şeklinde ortaya çıkmakta olup, görsel muayene ile tespit edilebilir. Tüm bu faktörler, radomun mekanik dayanımını ve elektromanyetik performansını doğrudan etkileyerek, radar sisteminin verimliliğini azaltabilir ve uçuş güvenliğini riske atabilir [6]. Hasar gören kompozit yapıların tamir edilmesi, havacılık güvenliği ve operasyonel süreklilik açısından büyük önem taşımaktadır Hasar almış bir radomun tamir edilmesi, yalnızca mekanik dayanımı yeniden kazandırmakla kalmaz, aynı zamanda radar sisteminin etkin çalışmasını sürdürmesi açısından da kritik bir rol oynar.

Kompozit tamir süreçleri, hasar seviyesine ve konumuna bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan tamir yöntemleri arasında elle serim ile vakum torbalama, ısıl battaniye, fırın ve otoklav ile kürleme yöntemleri yer almaktadır. Bu yöntemler, kompozit yapıların mekanik bütünlüğünü tekrar kazandırmak amacıyla uygulanır. Ancak, kompozit bir radom tamiri söz konusu olduğunda yalnızca yapısal olarak değil, aynı zamanda tamirin elektromanyetik performans açısından da uygun olması gerekmektedir. Özellikle radom tamirlerinde, kullanılan malzemenin radar sinyallerine etkisi göz önünde bulundurulmalı ve tamir edilen bölgenin elektromanyetik geçirgenliği analiz edilmelidir. Aksi halde, tamir edilen bölgede yansıma, sinyal kaybı ve frekans bandı değişimi gibi istenmeyen etkiler ortaya çıkabilir.

Bu tez kapsamında, kompozit malzeme tamirlerinin elektromanyetik performansa olan etkileri detaylı bir şekilde incelenecektir. Çalışma, hasar görmüş radom yapılarına uygulanan farklı tamir tekniklerinin mekanik ve elektromanyetik performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. İlk aşamada, havacılıkta yaygın olarak kullanılan quartz prepreg kompozit malzemeler ile çeşitli tamir senaryoları oluşturulacaktır. Bu tamir senaryoları elle serim yöntemi ile üretilmiş kuponlara, ısıl battaniye ve otoklav kürleme yöntemi kullanılarak uygulanacaktır. Daha sonra, elde edilen tamirli numuneler üzerinde tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri ile mekanik ve elektromanyetik karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir. Özellikle Through-Transmission Ultrasound (TTU) ve mikroskop inceleme yöntemleri ile tamirli bölgelerdeki iç kusurlar tespit edilecek, ardından RF testleri ile tamirlerin radomun elektromanyetik geçirgenliği üzerindeki etkileri incelenecektir.

Ayrıca elde edilen kuponlara üç noktadan eğme ve yapışma performans testleri yapılarak mekanik performansları incelenecektir.

Bu çalışmanın havacılık sektörü için önemli çıktılar sağlaması hedeflenmektedir. Elde edilen veriler, radom tamir süreçlerinde kullanılacak yöntemlerin belirlenmesine katkı sağlayacak ve mekanik dayanım ile elektromanyetik geçirgenlik arasındaki ilişkiyi anlamaya yönelik bilimsel katkı sunacaktır. Böylece, havacılık endüstrisinde daha güvenilir ve performans açısından optimize edilmiş kompozit tamir süreçlerinin oluşturulmasına yardımcı olacaktır.



Şekil 1.3. Hava araçlarında kullanılan çeşitli radom örnekleri [7]

2. KOMPOZİT MALZEMELER VE TAMİR YÖNTEMLERİ

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan ve bileşenlerin tek başına sahip olduğu özelliklerden daha üstün performans sergileyen bir yapıdır. Metal alaşımlarından farklı olarak, kompoziti oluşturan her bileşen kendi kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini korur. Kompozit malzemeler temel olarak bir matris ve bir takviye elemanından oluşur. Bu malzemelerin en büyük avantajları, yüksek mukavemet ve rijitliği düşük yoğunluk ile birleştirerek geleneksel malzemelere kıyasla önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlamalarıdır [8].

Havacılıkta kullanılan kompozit malzemeler genellikle lif (fiber) takviyeli polimer matrisli yapılardır. Bu tür kompozitlerde lifler, yük taşıyıcı eleman olarak görev yaparken, polimer matris yapısı lifleri bir arada tutar ve dış ortamdan korur. Özellikle termoset bazlı epoksi reçineler, mekanik ve ısıl özellikleri ve iyi yapışma kabiliyetleri nedeniyle havacılık uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir.

2.1.1. Takviye lifleri

Kompozitlerin performansı, büyük ölçüde kullanılan takviye liflerine bağlıdır. Radom yapıları ve havacılıkta kullanılan başlıca takviye lifleri quartz fiber takviyeli kompozitler, cam fiber takviyeli kompozit malzemeler ve karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler olarak sıralanabilir.

2.1.2. Quartz fiber takviyeli kompozitler

Quartz fiberler, silika (SiO_2) esaslı liflerdir ve çok düşük dielektrik kayıp katsayısına sahiptirler. Bu özellikleri nedeniyle özellikle elektromanyetik geçirgenliğin kritik olduğu yapılarda, örneğin radomlar gibi uygulamalarda tercih edilir. Quartz fiber takviyeli kompozitler yüksek sıcaklık dayanımı, düşük termal genleşme ve üstün elektromanyetik geçirgenlik özellikleriyle öne çıkar. Bunların yanı sıra quartz takviyeli kompozitler oldukça pahalı malzemelerdir [8].

Havacılıkta, özellikle radar sinyallerinin bozulmadan iletilmesi gereken bölgelerde, quartz fiberli prepreg (ön reçinelenmiş takviye) sistemleri kullanılarak üretilmiş radomlar, uçak burunlarında yer almaktadır. Ayrıca, bu malzemeler yüksek frekansta çalışan RF sistemlerinin bulunduğu bölgelerde de sinyal bütünlüğünü korumada etkilidir.

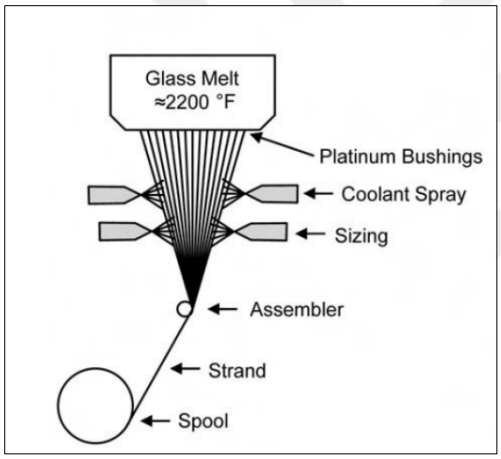
Quartz fiber takviyeli kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılan cam, bazalt ve aramid fiberlerle kıyaslandığında, elektromanyetik dalga geçirgenliği açısından belirgin bir performans üstünlüğü sunmaktadır. Özellikle dielektrik sabitinin 3.78 ve dielektrik kaybının 0.0002 gibi düşük seviyelerde olması, bu malzemeyi yüksek frekanslı uygulamalarda oldukça avantajlı kılmaktadır. Bunun yanı sıra, kuvars fiberler yüksek ısıya dayanıklılığı ve kimyasal kararlılığı ile de öne çıkmaktadır [9, 10].

Cam fiber takviyeli kompozitler

Cam fiber takviyeli kompozit malzemeler, hafiflik, yüksek mekanik dayanım, korozyon direnci ve uygun maliyet gibi avantajları sayesinde birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan cam fiber, polimer matris ile birleştirilerek yapısal mukavemeti artırır. Cam fiberlerin başlıca türleri arasında E-glass ve S-glass yer alır. E-glass, iyi elektriksel yalıtım ve genel mekanik performans sunarak en yaygın kullanılan türdür. S-glass, yüksek çekme mukavemeti ve sıcaklık dayanımı ile savunma ve havacılık gibi ileri uygulamalarda tercih edilir [11]. Cam fiberler, yaklaşık 1200–1500 °C sıcaklığa kadar ısıtılan camın, elektrikli fırınlarda eritilmesiyle elde edilir. Şekil 2.1'de glass fiber üretim prosesinin şematik gösterimi sunulmuştur. Yüksek sıcaklıklarda eritilmiş camın platin alaşımlı delikli plakalar aracılığıyla çekilmesiyle elde edilir. Bu yöntem sürekli filament üretimi olarak adlandırılır ve yüksek mukavemetli, düzgün çaplı lifler üretmek için kullanılır. Lifler çıkış sırasında özel yüzey işlemlerine tabi tutularak reçine ile daha iyi bağ yapmaları sağlanır. Alternatif olarak, kesikli cam fiber üretimi de mevcuttur; bu yöntemde erimiş cam, yüksek basınçlı hava veya santrifüj etkisiyle püskürtülerek kısa lifler haline getirilir. Bu tür lifler genellikle yalıtım malzemelerinde kullanılır. Cam fiber takviyeli kompozitler el yatırması, vakum infüzyon, pultruzyon ve prepreg gibi yöntemlerle üretilebilir ve otomotiv, denizcilik, inşaat ve havacılık gibi birçok alanda başarılı uygulamalara sahiptir.

E-glass fiberler, yüksek dielektrik dayanımı, iyi mekanik özellikler ve düşük maliyet avantajı ile yaygın olarak kullanılan cam fiber türüdür. E-glass lifler, epoksi matrislerle birlikte kullanıldığında, mekanik performans ve yeterli kimyasal direnç sunar. Havacılıkta, ikincil yapısal elemanlar, kabin içi paneller, sistem muhafazaları gibi çok yüksek mukavemet gerektirmeyen ancak hafif ve dayanıklı olması gereken uygulamalarda tercih edilir. Ayrıca metalik malzemeler ile karbon yapılar arasında kullanılarak korozyona karşı önleyici bir katman olarak kullanılır.

Cam fiberler aynı zamanda kuvars fiberlere göre daha uygun fiyatlıdır ve elektromanyetik geçirgenliği de tatmin edici seviyelerdedir. Bu nedenle, bazı radom uygulamalarında veya radar şeffaflık istenen ikincil bölgelerde E-glass da kullanılabilir.



Şekil 2.1. Cam fiber üretimi [7]

Karbon fiber takviyeli kompozitler

Karbon fiber, havacılık uygulamalarında en yaygın kullanılan takviye malzemesidir. Çok yüksek çekme ve basma dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek rijitlik ve mükemmel yorulma direnci ile kritik yapısal uygulamalarda tercih edilir. Uçak gövde panelleri, kanat kutuları, iskelet yapılar, stabilizatörler, helikopter pervaneleri gibi birincil yük taşıyan bileşenlerde kullanılır.

Karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler, otoklav gibi kontrollü koşullarda üretildiklerinde oldukça düşük boşluk oranı ve yüksek yapışma özelliği sunar. Ancak, karbon fiberin elektriksel iletkenliği yüksek olduğundan dolayı, radom gibi RF geçirgenliği istenen

uygulamalarda doğrudan kullanılması uygun değildir. Radom yapılarının RF geçirgenliği istemeyen yapısal kısımlarında karbon fiber tercih edilebilir.

2.2. Kompozit Tamir Yöntemleri

Kompozit malzemelerden üretilmiş uçak parçaları çelik, alüminyum gibi diğer metalik parçaların maruz kaldığı yorulma, çatlak oluşumu ve korozyon gibi ciddi hasar biçimlerine karşı daha dayanıklıdır. Ancak kompozit bileşenler mekanik darbelere karşı daha duyarlıdır ve bu darbelerden ötürü kompozit yapılarda hasarlar oluşmaya daha yatkındır. Bu sebeple, hasar görmüş kompozit yapıların serviste ya da detay parça seviyesinde uygun yöntemlerle tamir edilebilmesi, parçaların servis ömrünü uzatmak açısından oldukça önemlidir [12].

Kompozit parçalarda oluşan hasarlar genellikle çıplak gözle kolayca görülemeyebilir. Bu tür gizli hasarların varlığı ve boyutu, yapısal bileşenlerin güvenilirliğini ve performansını doğrudan etkilediğinden, hasarın tespiti için uygun tahribatsız muayene (Non-Destructive Testing, NDT) yöntemleri kullanılır [13]. Ayrıca daha basit bir yöntem olarak, kompozit yüzeye hafifçe vurarak alınan ses tepkisine göre hasarlı bölgeler hızlıca tespit edilebilir. Sağlam bölgeler net ve yankılı bir ses verirken, hasarlı bölgelerden gelen ses donuk ve farklı olacaktır.

Kompozit yapıların tamir süreçleri, özellikle uçak sanayinde büyük önem taşımakta ve bu süreçler genellikle Uçak Yapısal Tamir El Kitabı (Aircraft Structural Repair Manual- SRM) talimatlarına göre yürütülmektedir. Diğer endüstrilerde ise kompozit bileşenlerin tamirinden sonra, orijinal teknik özellikleri ve mekanik performans kriterlerini karşılaması beklenmektedir. Bu nedenle tamir yöntemleri dikkatli bir planlama ve hassas uygulama gerektirir. Hasar tespitinin ardından uygun tamir yönteminin belirlenmesi ve uygulanması, kompozit malzemenin orijinal mukavemet ve bütünlüğüne tekrar kavuşması açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle hasara yatkın bölgelerin düzenli bakım ve kontrol süreçleriyle izlenmesi, tamir süreçlerinin etkinliğini artırmakta ve yapısal bütünlüğün korunmasını sağlamaktadır.

Kompozit yapılarda hata oluşumları oluştukları yere, oluşum şekillerine ve oluştukları hasar farklılıklarına göre sınıflara ayrılmaktadır [14]. Üretim ve servis sırasında oluşan bu hata kodları Çizelge 2.1’de sunulmuştur.

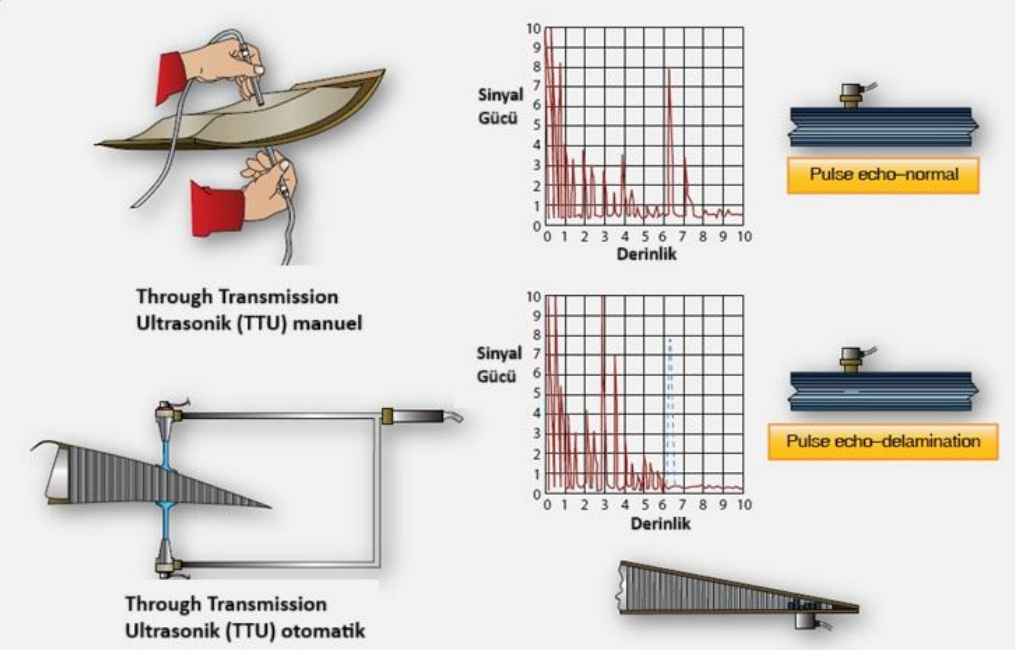
Çizelge 2.1. Üretim ve kullanım sırasındaki hataların listesi [14]

Malzeme İşleme	Parça Üretimi	Kullanım Sırasında
Hasar görmüş filamentler	Kabarcık oluşumu	Yüzey oturma hasarı
Lif dağılımındaki düzensizlik	Kontaminasyon (yabancı madde bulaşması)	Kenar/köşe çatlağı
Lif hataları	Köşe/kenar yarılmaları	Köşe yarıçapında tabaka ayrılması
Lif/reçine(matris) ayrışmaları	Çatlaklar	Sürünme (creep)
Lif hizasızlığı	Tabaka ayrılmaları (delaminasyon)	Ezilme
Buruşmuş (marcelle) lifler	Ayrılma (debonding)	Kesikler ve çizikler
Katman yanlış hizalanması	Aşırı tabaka bindirmesi	Tabaka ayrılması (delaminasyon)
Son kullanımı doldurmuş prepreg	Bağlantı deliği problemleri: Uzama, Hatalı montaj, Hatalı oturma, Müdahaleli montaj, Eksik bağlantı elemanları, Aşırı sıkılmış bağlantı elemanları, Çekilip kopma, Reçine yetersiz temas yüzeyi, Eğik havşa deliği	Ayrılma (debonding)
Prepreg değişkenliği	Lif kıvrımları	Göçükler
	Lif hizasızlığı	Kenar hasarı
	Kırılmalar	Aşınma (erozyon)
	Delik problemleri: Matkap yanığı, Uzama, Delikten çıkışta delaminasyon, Hatalı delme ve dolgu, Gözeneklilik, Eğik delikler	Bağlantı deliği problemleri: Uzama, Delik aşınması, Hatalı montaj, Hatalı oturma, Müdahaleli montaj, Eksik bağlantı elemanları, Aşırı sıkılmış bağlantı elemanları, Çekilip kopma
		Sökme ve yeniden montaj
		Eğik havşa deliği
		Lif kıvrımları
		Kırılmalar
		Delik ve penetrasyon
		Matris çatlağı
		Matris çatlama çizgileri

Kompozit yapılarda meydana gelen bazı hasarlar görsel olarak açıkça fark edilebilirken, bazı durumlarda hasar başlangıçta oldukça küçük gibi görünse de gerçekte çok daha geniş bir alanı etkileyebilir. Özellikle darbe kaynaklı hasarlar, yüzeyde yalnızca hafif bir göçük olarak algılansa da fiber takviyeli yapının altında ciddi iç hasarlar oluşabilir. Bu nedenle, görünür hasarın ötesinde, alt katmanlardaki potansiyel hasarın tespiti için dikkatli değerlendirme yapılması gerekmektedir [15].

Bir kompozit parçanın onarılması ya da hurdaya ayrılması yönündeki karar, öncelikle yapının orijinal mekanik ve yapısal performansının onarımla ne ölçüde geri kazandırılabileceğine göre verilir. Bununla birlikte, onarımın maliyeti, hasarın konumu ve erişilebilirliği, ayrıca uygun tamir malzemelerinin ve tamir altyapısının mevcut olup olmaması gibi faktörler de bu kararda önemli rol oynamaktadır.

Hasar tespiti için Through Transmission Ultrasonik (TTU), pulse echo ve tap test gibi yöntemler kullanılmaktadır. Pulse-echo yöntemi, ultrasonik darbelerin hem gönderilmesi hem de alınması için bir dönüştürücü kullanmaktadır. Gönderilen ultrasonik dalgalar, farklı yüzeylerden yansıyarak dönüştürücüye geri döner ve bu dönüş sinyallerinin algılanma zamanları, dalganın yansıtıcı yüzeye ulaşma süresine göre farklılık gösterir. Yansıyan ultrasonik dalganın genliği, yansıtıcı yüzeyin boyutuyla doğrudan ilişkilidir. Pulse-echo ultrasonik yönteminde, elde edilen sinyallerin analizi, sinyal genliği ve sinyaller arasındaki zaman farkı temel alınarak gerçekleştirilir. TTU yöntemiyse, ultrasonik dalgaları üretmek ve algılamak için iki ayrı dönüştürücü kullanmaktadır. Bu dönüştürücülerden biri ultrasonik dalgaları oluştururken, diğeri ise bu dalgaları algılamak üzere konumlandırılır. İki dönüştürücü arasındaki ses yolunda bir kusur bulunması durumunda, ultrasonik dalga iletimi kesintiye uğrar. Meydana gelen bu kesintinin büyüklüğü, yani ses dalgası genliğinde oluşan değişim, test sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. TTU ve pulse-echo yöntemlerinin kullanım şekilleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Ultrasonik muayene yöntemleri [16]

Kompozit yapıların tamir işlemleri genellikle hasarın türüne ve büyüklüğüne göre sınıflandırılır. Basit tamirler, boyut olarak küçük olan veya yapısal bütünlüğe önemli bir etkisi bulunmayan hasarlar için uygulanır. Bu tür tamir işlemleri, genellikle lamine ya da sandviç paneller için belirlenmiş basit yönergeler takip edilerek gerçekleştirilir. Karmaşık tamirler ise hasarın geniş kapsamlı olduğu ve parçanın yapısal performansını yeniden sağlamanın gerekli olduğu durumlarda tercih edilir. Bu tür durumlarda tamirde kullanılacak en uygun malzemeler, genellikle parçanın üretiminde kullanılan orijinal lifler, dokumalar ve matris reçinesidir. Farklı malzemelerin kullanılması gerektiğinde ise, tamir edilen kompozit yapının sıcaklık, nem ve mekanik yüklenmeler gibi servis koşullarına olan uyumu dikkatli biçimde değerlendirilmelidir. Ayrıca önerilen tamir prosedürünün, parçanın orijinal tasarım kriterlerini tam anlamıyla karşılaması beklenir. Bu bağlamda yapılan tamir işlemleri, kalıcı ya da geçici olarak uygulanabilmektedir [16].

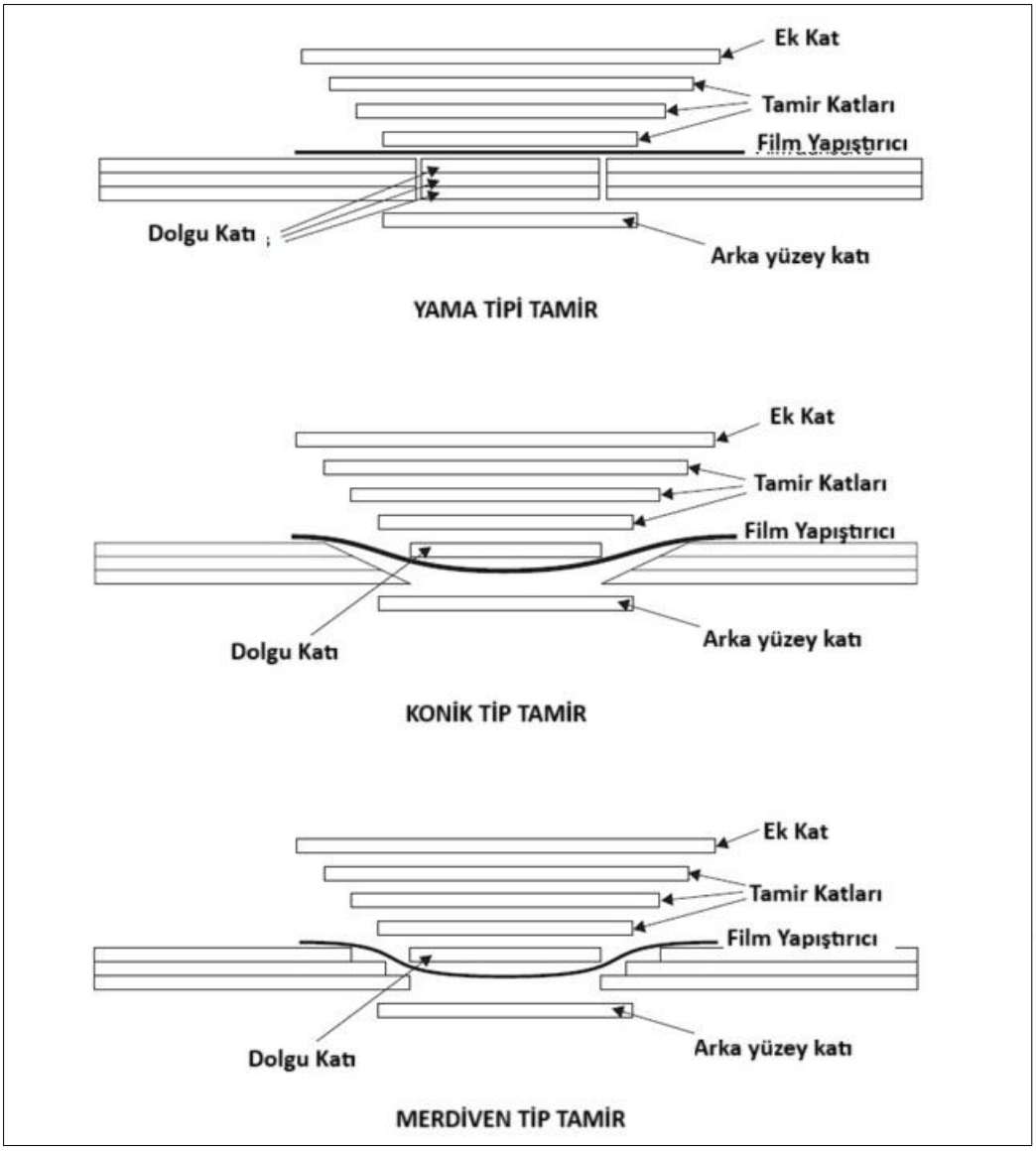
Geçici tamir işlemleri, kompozit parçaların operasyon sırasında ani olarak oluşan hasarlarının kalıcı şekilde giderilmesinin mümkün olmadığı durumlarda uygulanır. Hasarın büyüklüğü veya tamir yöntemi özel ekipman ve atölye şartları gerektirdiğinde, parçanın kapsamlı onarım için atölyeye götürülmesi öncesinde geçici ve güvenli bir çözüm gerekmektedir. Bu gibi durumlarda, genellikle hasarlı bölgeye geçici yamalar sabitlenerek

parçanın güvenliği geçici olarak sağlanır ve ek destekleyici önlemlerle güvenlik seviyesi artırılır.

Kalıcı tamirlerde ise, kompozit lamine ya da sandviç yapıların onarımına ilişkin olarak standartlara uygunluğu onaylanmış genel prosedürler izlenir. Bu onarım süreçlerinin, kalite ve dayanıklılığın garanti edilmesi açısından ortam koşullarının kontrol edilebildiği atölyelerde gerçekleştirilmesi büyük önem taşır. Başarılı bir tamir uygulaması için çalışma ortamının temiz ve düzenli tutulması, onarım süreçlerindeki teknik detaylara ve yöntemlere titizlikle uyulması gereklidir. Ayrıca, bu tip tamirlerin kalıcı performans sağlaması için üretim standartlarına ve tasarım kriterlerine uygunluğu sağlanmalıdır [17].

Yapısal tamir, kompozit malzemelerde lif kırılması, delaminasyon ya da tabakalar arası yapışma kaybı gibi hasarların yapının taşıma kapasitesini düşürdüğü durumlarda devreye girer. Bu tür hasarlar, özellikle sandviç yapıların hem çekirdek malzemesini hem de takviye liflerini etkilediğinde, orijinal mekanik performansın yeniden sağlanabilmesi için hasarlı bölgelerin uygun malzemelerle değiştirilmesi gerekir. Tamir işlemi, orijinal laminat yapının sürekliliğini bozduğundan, bu bölge bir gerilme yığılması noktasına dönüşebilir. Bu nedenle yapısal tamirlerde, tamir alanına ek takviye tabakalarının uygulanması yaygın bir yaklaşımdır.

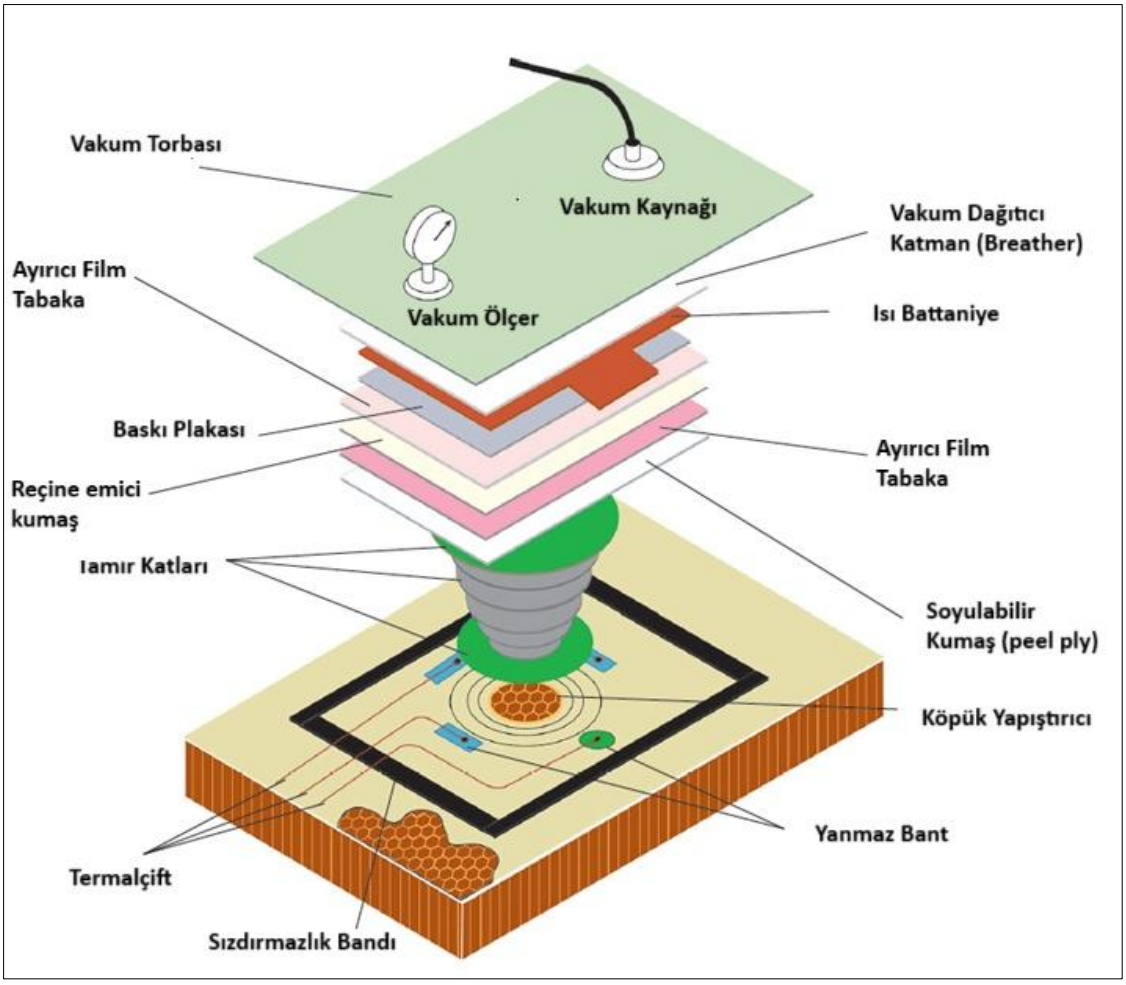
Bununla birlikte, hasarlı alan oldukça küçükse, geniş çaplı bir yapısal onarımın uygulanması yerine yalnızca yüzeysel (kozmetik) bir müdahale ile ilerlenip ilerlenmemesi değerlendirilmelidir. Yapısal onarımın esas hedefi, yüklerin güvenli bir şekilde taşınmasını sağlamak ve onarım bölgesinden uygulanan gerilmelerin kesintisiz olarak aktarılabilmesini mümkün kılmaktır. Bu hedef doğrultusunda, tamirde kullanılacak malzemelerin orijinal laminatla yeterli örtüşmeye sahip olması ve sağlam bir yapışma sunması büyük önem taşır. Bu kapsamda en çok tercih edilen üç temel yapısal tamir yöntemi Şekil 2.3'de görülebileceği üzere; yüzey üzerine uygulanan yama (patch) tamiri, eğimli geçiş sağlayan konik zımpara (scarf) yöntemi ve kademeli yüzey hazırlığına dayanan basamaklı zımpara (step sanded) tekniğidir [18].



Şekil 2.3. Yapısal tamir tipleri [19]

Vakum torbalama ve otoklav uygulamaları, kompozit yapılarda en yaygın kullanılan yapısal tamir yöntemleri arasında yer almaktadır. Vakum torbalama yönteminde, tamirin kürlenmesi için gerekli sıcaklık, ısı battaniyeleri aracılığıyla sağlanmakta; aynı zamanda malzeme, belirlenen kürleme çevriminde uygun vakum altında işlem görmektedir. Otoklav yöntemiyle gerçekleştirilen tamirlerde ise sıcaklık ve basınç koşulları otoklav cihazı tarafından kontrol edilmekte, bu sayede tamir amacıyla eklenen katmanlar arasında daha homojen bir birleşim elde edilmektedir. Otoklav yöntemi, genellikle daha yüksek kalite ve yapısal bütünlük sunmasına rağmen, her durumda uygulanabilir değildir. Özellikle hava araçlarının operasyonel sahada hasar alması durumunda, ilgili parçaların sökülmeden otoklavda tamiri mümkün olamamaktadır. Bu tür durumlar için vakum torbalama yöntemi, daha taşınabilir

ve düşük maliyetli bir alternatif sunmakta olup, alt yapı gereksinimleri açısından da avantaj sağlamaktadır. Tamir gören alanlar kürleme işlemine hazırlanabilmesi için bazı sarf malzemeler ihtiyaç duyulmaktadır. Vakum torbalama sürecinde kullanılan sarf malzemeleri, kürleme kalitesini ve yüzey bütünlüğünü doğrudan etkileyen önemli unsurlardır. İsteğe bağlı olarak kullanılan soyulabilir kumaş (peel ply), kürleme esnasında uçucu maddelerin ve fazla reçinenin serbestçe geçişine olanak tanır; kür sonrası kolayca sökülebilmekte ve yüzeyde yapışma veya boyama gibi işlemler için uygun bir yüzey kalitesi oluşturmaktadır. Ayırıcı film (release film), reçinenin daha fazla akışını önlemek amacıyla kullanılır ve genellikle küçük deliklerle hafif gözenekli hale getirilerek yalnızca gazların ve uçucuların üstteki vakum dağıtıcı (breather) katmanına geçmesine izin verir. Vakum dağıtıcı kumaş, vakum uygulamasını mümkün kılarak tüm katmandan hava ve uçucuların uzaklaştırılmasını sağlar; özellikle yüksek otoklav basınçlarında daha kalın vakum dağıtıcı katmanlar tercih edilir. Son olarak, vakum torbası ve sızdırmazlık bandı, tüm yapının hava geçirmez biçimde kapatılmasını sağlayarak etkin bir vakum ortamı oluşturur ve kürleme işleminin başarıyla tamamlanmasına katkı sunar. Bu üretim katmanlarını gösteren detaylı gösterim Şekil 2.4’te sunulmuştur.



Şekil 2.4. Final torbalama ve ısı battaniye ile kürleme [20]

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Radom Yapıları

Havacılık endüstrisi, yüksek teknolojiye dayalı sistemlerin entegre edildiği, mühendislik açısından son derece hassas ve karmaşık bir alandır. Bu sistemlerin büyük bir kısmı haberleşme, radar ve yön bulma sistemleriyle ilgilidir. Bu sistemlerin dış ortama karşı korunması amacıyla kullanılan özel yapılardan biri de "radom" olarak adlandırılır. Radomlar, hava araçlarında yer alan radar sistemlerini korumakla kalmaz, aynı zamanda bu sistemlerin işlevselliğini engellemeden dış çevreyle etkileşimini sürdürmelerine olanak tanır. Genellikle radar antenlerini kapsayan, radyo frekanslarını geçirgen ancak dış etkilere karşı dayanıklı bir yapı olarak tanımlanabilir. Radomlar uçakların burun kısmında, kanat uçlarında, kuyruklarında veya gövde üzerinde yer alabilir. Modern hava araçlarında kullanılan çok çeşitli radar sistemlerinin dış etkenlerden korunması, sinyal kaybının minimize edilmesi ve aerodinamik yapı bütünlüğünün korunması açısından radomlar kritik öneme sahiptir [21].

3.2. Radom Tasarım Kriterleri

Radom tasarımı disiplinler arası bir süreçtir ve birçok farklı parametrenin optimize edilmesini gerektirir. Bu parametreler elektromanyetik (EM) performans, mekanik yapısal özellikler ve çevresel dayanıklılıktır. Elektromanyetik performans radomun radar sinyallerine karşı olan geçirgenliği, tasarımın en kritik parametresidir. Bu performansı etkileyen başlıca faktörler [22-24].

- Dielektrik Sabiti (ε_r): Malzemenin elektromanyetik dalgaları geçirme kapasitesini belirler. Düşük ve sabit bir dielektrik sabiti tercih edilir.
- Kayıp Tanjantı (tan δ): Malzemenin EM dalgaları absorbe etme miktarını belirler. Ne kadar düşükse o kadar iyidir.
- Kalınlık: Radomun duvar kalınlığı, sinyalin faz kaymasına ve yansımasına neden olabilir. Bu nedenle optimum kalınlık, radarın frekansına göre belirlenir.
- Çok Katmanlı Yapılar: Bazen farklı özelliklerdeki malzemeler bir araya getirilerek çok katmanlı yapılar oluşturulur. Bu yapılar, belirli bir frekans aralığında yansıma ve kırılmaları minimize etmek için tasarlanır.

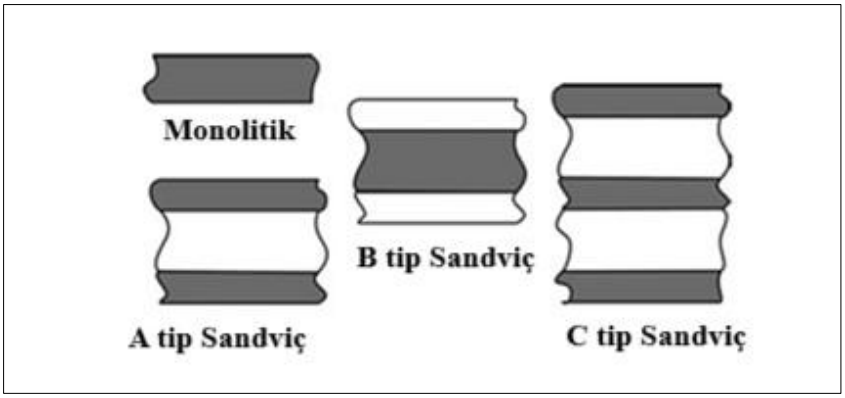
- Frekans Uyumu: Radomlar, kullanılan radar sisteminin frekans bandına göre optimize edilmelidir. Örneğin X-band radar ile kullanılan radom, Ka-band radar için uygun olmayabilir.

Radom sadece bir EM geçirgen bir yapı değildir, aynı zamanda yapısal bir parçadır. Bu nedenle aşağıdaki mekanik özellikleri sağlamalıdır. Kuş çarpması gibi ani darbelere karşı dayanıklı olmalıdır. Uçuş sırasında oluşan aerodinamik yükleri taşıyabilmeli, sınır tabaka ayrılmasına neden olmamalıdır. Uçak motorları ve hava akımı kaynaklı titreşimlere karşı dayanıklı olmalıdır. Hafif olması, uçağın genel performansı açısından önemlidir. Bu yüzden genellikle karbon fiber, cam fiber gibi kompozit malzemeler tercih edilir.

Radomlar, modern hava araçlarının hem sivil hem de askeri görevlerde güvenilir şekilde çalışmasını sağlayan hayati bileşenlerdir. Elektromanyetik geçirgenlik ile mekanik dayanım arasında hassas bir denge kurulması gereken bu yapılar, ileri seviye malzeme bilimi, aerodinamik, elektromanyetik teori ve yapısal mühendisliği bir araya getirir. Doğru tasarlanmış bir radom, radar sisteminin menzilini ve doğruluğunu artırırken, aracın genel performansına da olumlu katkılar sunar.

Radomlar, radar antenlerini çevresel etmenlerden koruyan ve elektromanyetik dalgaların iletimine izin veren yapısal bileşenlerdir. Tasarım süreçlerinde hem mekanik dayanıklılık hem de elektromanyetik performansın optimize edilmesi hedeflenir. Bu bağlamda, sandviç yapılar sıklıkla tercih edilir ve Şekil 3.1'de sunulduğu üzere genellikle A, B ve C tipi olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır.

A tipi sandviç yapılar, üst ve alt yüzeylerinde balpeteği yapıya göre daha yüksek dielektrik sabitine sahip taşıyıcı tabakalar ile bu katmanların arasında konumlandırılan, düşük yoğunluk ve düşük dielektrik özellikli bir balpeteği malzemeden oluşur. Bu yapı hem mekanik dayanım sağlamakta hem de elektromanyetik geçirgenlik açısından verimli bir çözüm sunmaktadır. B tipi yapılar ise, genellikle daha karmaşık birçok katmanlı düzenleme içerir; bu yapı içinde geçiş katmanları veya işlevsel malzemeler kullanılarak elektromanyetik özelliklerin daha hassas biçimde kontrol edilmesi hedeflenir. C tipi sandviç yapılar, gelişmiş tasarım gerekliliklerine uygun olarak, frekans seçici yüzeyler gibi ileri teknolojilerle birleştirilir. Bu üç yapı tipi, belirli frekans aralıkları, mekanik gereksinimler ve uygulama senaryolarına göre tercih edilmektedir [25].



Şekil 3.1. Radom duvar yapıları [26]

Sandviç tipi radomların tasarımında, yüzey tabakalarının (facesheet) kalınlıkları kritik bir öneme sahiptir. Bu kalınlıklar, antenin çalışma frekansına bağlı olarak belirlenir ve elektromanyetik dalgaların iletimini maksimize etmek için optimize edilir. Ancak, yüzey tabakalarının ince olması, radomları darbe (impact) hasarlarına karşı daha hassas hale getirir. Kuş çarpması, dolu yağışı veya bakım sırasında oluşabilecek darbeler, yüzey tabakalarında çatlaklar, delaminasyonlar veya balpeteği malzemede ezilmelere neden olabilir. Bu tür hasarlar, radomun mekanik bütünlüğünü ve elektromanyetik performansını olumsuz etkiler. Bu nedenle, radomların düzenli olarak denetlenmesi ve hasar tespit edildiğinde uygun tamir yöntemlerinin uygulanması büyük önem taşır. Tamir işlemleri sırasında, orijinal tasarım kriterlerine uygun malzemeler ve teknikler kullanılmalıdır. Yanlış veya yetersiz tamirler, radomun performansını daha da düşürebilir ve radar sisteminin etkinliğini azaltabilir. Bu bağlamda, tamir süreçlerinde uzman personelin görev alması ve gerekli testlerin yapılması esastır [6].

3.3. Radom Tamir Performansı

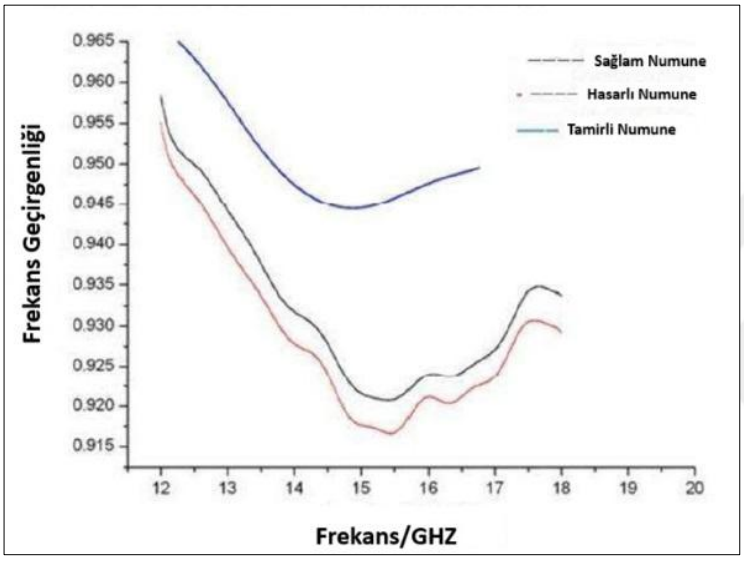
Kompozit sandviç yapılarında kullanılan lamine yüzeylerin kalınlığı, elektromanyetik dalga iletim performansı ve yapısal mukavemet açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle radom uygulamalarında, yüzey kalınlığının artması, rezonans frekansının düşmesine ve maksimum iletim oranının azalmasına yol açmaktadır. Kim ve arkadaşları, E-cam/epoksi prepreg kumaş tabanlı lamine kompozitlerin yüzey kalınlığının artırılması durumunda, dielektrik kayıplarının yükseldiğini ve bu durumun elektromanyetik dalgaların maksimum iletim oranını olumsuz etkilediğini belirtmektedir. Aynı çalışmada, fonksiyonel gereklilikleri sağlayan ideal kompozit yüzey kalınlığının yaklaşık olarak 1,0 mm olduğu

deneysel ve sayısal analizler sonucunda ortaya konmuştur. Bu kalınlıkta, maksimum iletim oranının %81 civarında olduğu ve rezonans frekansının 8,284 GHz olduğu ifade edilmektedir. Dolayısıyla, kompozit sandviç yapılarının elektromanyetik ve mekanik performansını optimize etmek amacıyla yüzey laminelerinin kalınlığının belirlenmesi, tasarım sürecinin önemli bir aşamasını oluşturmaktadır [27].

Bendemra ve arkadaşları çalışmalarında, havacılıkta kompozit yapıların onarımı için yaygın olarak kullanılan konik ve merdiven tipi tamir türlerinin yapısal performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilen parametrik analizlerde, katman kalınlığı, yapıştırıcı kalınlığı, koniklik açısı, laminat dizilimi ve ekstra katmanların varlığı gibi tasarım parametrelerinin, yapıştırıcı tabakada oluşan maksimum kayma ve soyulma gerilimleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Sonuçlara göre, her iki birleştirme tipinde de katman kalınlığı arttıkça yapıştırıcı tabakasındaki maksimum gerilimlerin belirgin şekilde azaldığı, ancak konik birleştirmelerin katman kalınlığı ve yapıştırıcı kalınlığı değişimlerine daha duyarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, koniklik açısının büyümesiyle gerilim konsantrasyonlarının her iki birleştirme tipinde de arttığı ve 0° fiber açılarına sahip katmanların konumunun gerilim dağılımını doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. Ekstra katmanların kullanımı ise birleşme uçlarında sertlik sağlayarak maksimum gerilimleri azaltmakta, bu durumda ideal bindirme uzunluğunun yaklaşık 5 mm olduğu belirlenmiştir. Üç boyutlu modellerle gerçekleştirilen doğrulama analizleri, iki boyutlu analiz sonuçlarını desteklemiş olup, tasarım parametrelerinin dikkatli seçilmesiyle basamaklı birleştirmelerin, konik birleştirmeler karşısında rekabet edebilecek seviyede optimize edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır [28].

Radar anten örtülerinde sıklıkla kullanılan sandviç kompozit yapılarda, düşük hızlı darbe hasarlarının mekanik özellikler ve elektromanyetik performans üzerindeki etkileri ile bu hasarların hızlı tamir yöntemleri üzerine çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Wang ve arkadaşları, PMI köpük sandviç yapılı, kuvars fiber/epoksi matrisli sandviç kompozit paneller üzerinde düşük hızlı darbe hasarlarını çekiç düşürme testiyle simüle etmiş, oluşan hasarları ultrasonik faz dizili tarama tekniğiyle belirleyip, kazıma ve yama uygulamasıyla tamir etmişlerdir. Kullanılan malzemeler arasında %99,98 SiO_2 içeren kuvars fiber kumaş, LTS089A epoksi reçine ve LT5089B-6 sertleştirici bulunmakta, sandviç yapı malzemesi olarak ise 0,0893 g/cm³ yoğunluğa sahip PMI köpük tercih edilmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda, yamalı tamir uygulaması ile eğilme mukavemetinin hasarsız numuneye

göre %112,7'ye, yan basma mukavemetinin ise %85,1'e geri kazandırılabildiği görülmüştür. Bu onarım yönteminin tamir verimliliği eğilme testlerinde %135, basma testlerinde ise %50,7 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.2'de verilen RF ölçümleri, tamir sonrası yapıların elektromanyetik dalga geçirgenlik özelliklerinin belirgin biçimde iyileştiğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, bu kazıma ve yamalı tamir yönteminin, düşük hızlı darbe hasarlarını gidermede mekanik ve elektromanyetik özellikler açısından etkin olduğu ve saha şartlarında da hızlı ve uygulanabilir olduğu belirtilmiştir [29].



Şekil 3.2. Tamirli kompozit RF geçirgenliği grafiği [28]

Kompozit yapıların hasar tamirinde kullanılan tamir yaması şekillerinin seçimi, tamir edilen yapının nihai mukavemetini doğrudan etkilemektedir. Xing ve arkadaşlarının çalışmasında, kompozit malzemelerde farklı şekillerdeki tamir yamalarının, özellikle nihai mukavemet üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Uçak yapılarına uygulanan eğimli veya kademeli taşlama yöntemleriyle açılan hasar bölgelerine, genellikle yuvarlak veya köşeleri yuvarlatılmış kare yamalar tercih edilmektedir. Çalışmada, Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) yöntemi ile yamaların tutunma kalitesi ve deformasyon davranışları detaylı şekilde incelenmiş, bu yöntemle tamir edilen levhaların deformasyon dağılımları ve nihai hasar bölgeleri görsel olarak belirlenmiştir. Kullanılan malzeme olarak, T300 lamine kompozit ile E51 epoksi reçine seçilmiş ve tamir teknikleri arasında ıslak serim yöntemi benimsenmiştir. Ayrıca Tsai-Hill hasar kriteri kullanılarak, yamaların geometrik şekillerinin tamir bölgesindeki gerilim dağılımına ve nihai mukavemete etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, Şekil 3.3'de verilmiş ve kare şekilli yamaların, daha fazla malzeme çıkarılması

gerektiğinden yuvarlak yamalara göre daha düşük nihai mukavemet sunduğunu göstermiştir [30].

	Elastik Modülüs (MPA)	Kopma Dayanımı (MPA)
Dairesel Tamir Numuneleri	12,034	404.311
Dikdörtgen Tamir Numuneleri	11,779	338.239

Şekil 3.3. Tamir katmanlarının şekline dayalı dayanımları [29]

Choi ve arkadaşları, düşük görünürlüklü radomların elektromanyetik (EM) dalga iletim özelliklerine, kompozit yüzeylerde oluşan hasarların etkisini incelemiştir. Çalışmada, E-cam/epoksi ve aramid/epoksi kompozit yüzeylerden oluşan sandviç yapıdaki radom numunelerine, ASTM D7136 standardına göre farklı enerji seviyelerinde (20 J ile 120 J arası) düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Hasar oluşturulduktan sonra numunelerin EM dalga iletim karakteristikleri serbest uzay ölçüm yöntemiyle değerlendirilmiştir. Testler sonucunda, 2 mm kalınlığındaki E-cam/epoksi kompozit yüzeylerin 100 J enerji seviyesinde ani bir kritik deformasyon gösterdiği, buna karşılık aynı kalınlıktaki aramid/epoksi kompozitlerin ise daha kararlı ve kademeli deformasyon sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, artan deformasyon ve hasar alanı ile birlikte EM dalga iletim oranının da belirgin şekilde düştüğü gözlenmiştir. En yüksek hasar toleransı ve en düşük EM iletim kaybı, 3 mm kalınlığındaki aramid/epoksi kompozit yüzeylerde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, radom tasarımlarında kompozit malzeme ve kalınlık seçimlerinin, darbe dayanımı ve elektromanyetik performans açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır [31].

Liu ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, birincil yük taşıyıcı kompozit yapılarda scarf tamir yönteminin mekanik performansı deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Gerçek bir tamir uygulaması yerine, scarf tamirini temsil eden scarf eklem numuneleri üzerinde çekme testleri gerçekleştirilmiş ve bu numunelerde T700/LT03A tek yönlü karbon/epoksi prepreg ile FM73M yapıştırıcı kullanılmıştır. Deneyler ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, hasarın büyük oranda yapışkan içi kırılma şeklinde gerçekleştiğini, ayrıca 90° ve ±45° yönlü katmanlarda matris çatlakları gözlendiğini ortaya koymuştur [32].

Xu ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, değişken kalınlığa sahip kompozit radomlar ile inhomojen yapıdaki radomların elektromanyetik performansları

kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Tüm yapı örneklerinde cam fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılmış; A-tipi sandviç radom örneğinde ise iç ve dış yüzeyler yine cam fiber takviyeli kompozitten, sandviç yapı ise düşük dielektrik sabitine ($\varepsilon r \approx 1.1$) ve düşük kayıp faktörüne ($\tan\delta \approx 0.003$) sahip köpük malzemeden oluşturulmuştur. Çalışmanın temel amacı, özellikle iletim kaybı ve nişan alma hatası gibi kritik elektromanyetik performans parametrelerini dikkate alarak, kalınlık değişiminin bu performansa olan etkilerini değerlendirmektir. Bu doğrultuda, değişken kalınlıklı radom tasarımları için iki farklı optimizasyon modeli geliştirilmiş ve bant genişliği performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Radom kalınlığındaki değişimin elektromanyetik performans üzerinde doğrudan etkili olduğu, değişken kalınlığa sahip radomların sınırlı bant genişliği ve hassasiyet gereksinimi nedeniyle üretim toleranslarına karşı duyarlı olduğu, buna karşın inhomojen yapılı radomların hem geniş bant aralıklarında kararlı performans sunduğu hem de üretimden kaynaklanan varyasyonlara karşı daha toleranslı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [33].

Ahmed ve arkadaşları, havacılık uygulamaları için geliştirilen hibrit sandviç yapılı burun radomlarının elektromanyetik ve mekanik performanslarını deneysel ve sayısal yöntemlerle kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada, Kevlar 49 ve S-Glass takviyeli yüzey katmanları ile PMI köpük sandviç yapı malzemesi kullanılmıştır Üretim sürecinde elle yerleştirme ve vakum torbalama teknikleri kullanılmış ve toplam 6 mm kalınlığa sahip sandviç yapı elde edilmiştir. Mekanik karakterizasyon çekme, eğilme ve ara katman kesme gerilimi (ILSS) testleriyle yapılmış; Kevlar iç katmanlar darbe ve yorulma dayanımı açısından avantaj sağlarken, S-Glass dış katmanlar nem ve UV koruması sunmuştur. Yapısal analizler ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen gerilmelerin Tsai-Wu sınır değerlerinin oldukça altında olduğu, dolayısıyla yapının yeterli emniyet katsayısına sahip olduğu gösterilmiştir. Elektromanyetik performans değerlendirmesi kapsamında yapılan testlerde 30°'lik eğim açısının, anten performansına en az etki eden konfigürasyon olduğu belirlenmiştir [34].

Yang ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, karbon fiber ve kuvars fiber takviyeli kompozitlerin yapışma bölgesinde oluşan kürleme kaynaklı kusurların mekanik performansa etkisi sistematik olarak araştırılmıştır. Yapışma işlemi için epoksi esaslı J-116B yapıştırıcı film kullanılmış, karbon fiber ve kuvars fiber prepregler tercih edilmiştir. Kürleme parametrelerinden kaynaklanan boşluk (void) benzeri kusurları temsil etmek amacıyla yapıştırıcı film içerisine farklı şekillerde ve konumlarda PTFE parçalar yerleştirilerek

kontrollü şekilde yapay hatalar oluşturulmuştur. Çalışmada hem penetre eden hem de yarı kalınlıkta hataların etkisi değerlendirilmiş; kusur alan oranı %1, %5 ve %10 olacak şekilde çeşitlendirilmiştir. Mekanik testler sonucunda, hata boyutu, şekli ve yerleşiminin bağlantı dayanımı üzerinde belirgin etkileri olduğu ortaya konmuştur. Özellikle üçgen ve kenara yakın yerleştirilmiş hatalar, %40'a varan dayanım kaybına neden olmuştur. Bunun yanında, hata sayısının artması da çatlak ilerlemesini kolaylaştırarak bağ dayanımını daha da düşürmüştür [35].

Park ve Kong, tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, hava araçlarının kompozit yapılarında düşük hızlı darbe hasarlarının değerlendirilmesi ve onarımı üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Çalışmada, karbon/epoksi tek yönlü (UD) laminat ve kumaş takviyeli yüzeylere sahip sandviç yapılar üzerinde düşük hızlı darbe testleri uygulanarak hasar oluşumu simüle edilmiştir. Hasarlı bölgeler, yapısal olarak katmanlı onarım yöntemiyle iyileştirilmiştir. Bu yöntemde, darbe ile hasarlanmış bölge kesilerek çıkarılmış ve yerine aynı malzeme sisteminden oluşan prepreg yama, yapıştırıcı ile uygulanarak otoklavda kürleme yoluyla tamir gerçekleştirilmiştir. Onarımın etkinliği, darbe öncesi, darbe sonrası ve tamir sonrası numunelerin basma dayanımı karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. UD laminat numunelerde, 6 J darbe sonrası %31 dayanım kaybı gözlenmiş, onarım sonrası bu kaybın %90'ı telafi edilmiştir. Benzer şekilde, sandviç yapılar 3 J darbe enerjisi ile %41 dayanım kaybına uğramış, tamir sonrası dayanımın %88'i geri kazanılmıştır. Bu sonuçlar, dış yama yönteminin hem oda sıcaklığı kuru (RTD) hem de yüksek sıcaklık nemli (ETW) koşullarda etkili bir onarım stratejisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler de deneysel sonuçlarla yüksek uyum göstermiş ve bu onarım yaklaşımının tasarım aşamasında da öngörülebilirliğini ortaya koymuştur [36].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Malzeme Seçimi

Malzeme seçimi, yüksek mekanik ve dielektrik performans kriterleri göz önünde bulundurularak yapılmış olup, tercih edilen malzemeler Quartz fiber takviyeli prepreg, film yapıştırıcı, köpük yapıştırıcı ve balpeteği malzemeden oluşmaktadır. Balpeteği yapı simetri ekseni olmak üzere serim yönü $(0/45/90/-45)s$ şeklinde gerçekleştirilmiştir. Köpük yapıştırıcı tamir edilen balpeteği yapılı senaryolarda yeni balpeteği eklenen bölgelere uygulanarak yapısal dayanım sağlanmıştır.

4.2. Kupon Üretimleri

İlgili tez çalışması kapsamında, radoma uygulanacak tamir işlemleri kupon seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Balpeteği sandviç yapılı tamirleri incelemek adına testlerde kullanılmak üzere A-tipi sandviç yapıya sahip bir tasarım tercih edilmiştir.

Radom yapısına uygulanacak tamir işlemlerine yönelik olarak, quartz fiber takviyeli prepreg kompozit malzeme kullanılarak kupon üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim yöntemi olarak elle serim tekniği tercih edilmiştir. Serim yönü olarak prepregler kuponda $(0/45/90/-45)s$ şeklinde serilmiştir.

Kupon boyutları, radyo frekans (RF) testleri ve mekanik test gereksinimler dikkate alınarak 300 mm × 300 mm olarak belirlenmiştir. Yapıştırma sürecinde, mekanik ve yapısal bütünlüğü optimize etmek amacıyla birlikte yapıştırma (co-bond) tekniği uygulanmıştır.

Üretim süreci iki ana aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, ply boyutlarına karar verilmiştir. Prepreg ile kompozit üretimi yapılırken kenarlardaki kalınlık değişimlerinden ötürü parçaya 25mm üretim fazlalığı verilmiştir. Quartz prepreg katmanları Resim 4.1'de sunulan GERBER marka bilgisayar kontrollü prepreg kesim cihazı kullanılarak belirlenen ölçülerde kesilmiştir. Kupon üretimleri plaka şeklinde olacağı için, düz bir kalıp üretimde kullanılacaktır. Kalıbın yüzeyinde bir önceki üretimden kalan parçanın yüzeyini etkileyecek bir kalıntı olmadığı kontrol edilip temizlenmiştir. Üretime başlamadan önce bu kalıplardan parçanın sağlıklı bir şekilde ayrılmasını sağlamak amacıyla, kalıplara Frekote 700 NC ayırıcı

uygulanmıştır. Ayrıcı uygulanırken kalıp yüzeyinde herhangi bir kalıntı iplik bırakmayan bezler kullanılmıştır.

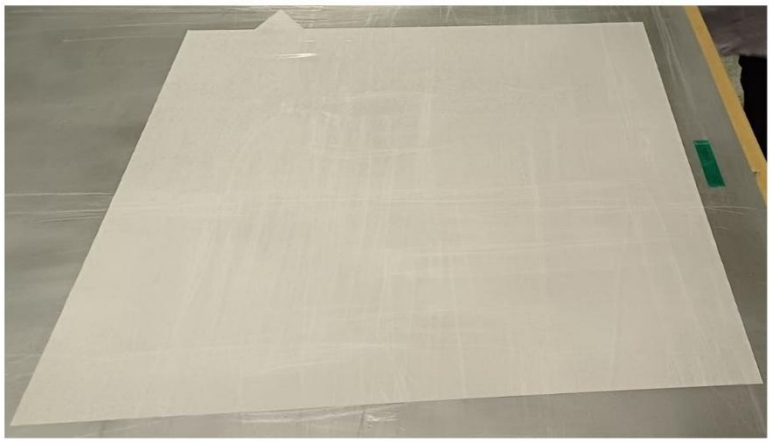


Resim 4.1. GERBER marka prepreg kesim cihazı

Serim işlemleri Resim 4.2'de sunulan temiz oda şartlarında gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada kullanılacak olan (0/45/90/−45) katman yönelimleri tasarım gerekliliklerine uygun şekilde elle serim yöntemiyle yerleştirilmiştir. İlk kat serildikten sonra Resim 4.3'te görülebilecek olan malzeme ara vakum işlemi uygulanarak, katmanın tool ile hava boşluğu kalmayacak şekilde yapışması sağlanmıştır. Bu işlem son kat atılmadan da uygulanarak katmanlar arası hava boşlukları alınmıştır. Serim işlemi tamamlandıktan sonra, yapışma yüzeyi hazırlamak amacıyla peel ply uygulanarak serim işlemi sonlandırılmıştır.



Resim 4.2. Temiz oda



Resim 4.3. Serim işlemleri

Ardından nihai vakum torbalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem Şekil 4.4'te gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak ayırıcı bir film tabakası ile prepreg katmanlar üzerine gelecek diğer katlardan ayrılmıştır. Daha sonra vakumu eşit dağıtmak amacıyla uygulanan hava alma keçesi (breather) uygulanmıştır. Bu katmanların üzerine ısıya dayanıklı final torba malzemesi kaplanmış ve vakum yapılabilmesi için vakum bağlantı noktaları yerleştirilmiştir. Parçadan ve kalıptan sıcaklık okumak adına iki adet termalçift de final torbasına yerleştirilmiştir. Yine ısıya dayanıklı sızdırmazlık bantı ile serim alanı tamamen kapatılmış ve bu katmanların hava kaçırması engellenmiştir.



Resim 4.4. Final Torbalama

Hazırlanan final torbası kürleme işlemleri için otoklava yerleştirilmiştir. Parça, ilgili quartz prepreg için belirlenen sıcaklık, basınç ve zaman parametrelerine göre otoklavda kürleme sürecine tabi tutulmuştur. Otoklav uygulaması için Resim 4.5'te sunulan ASC marka otoklav kullanılmıştır. İlgili kür parametreleri çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Otoklav kürleme çevirimi

Vakum torba basıncı	980mbar
Otoklav basıncı	6.2 bar
Isınma eğrisi	1, 2°C / dakika
Kürlenme sıcaklığı	135°C
Kürlenme Süresi	120-180 dakika

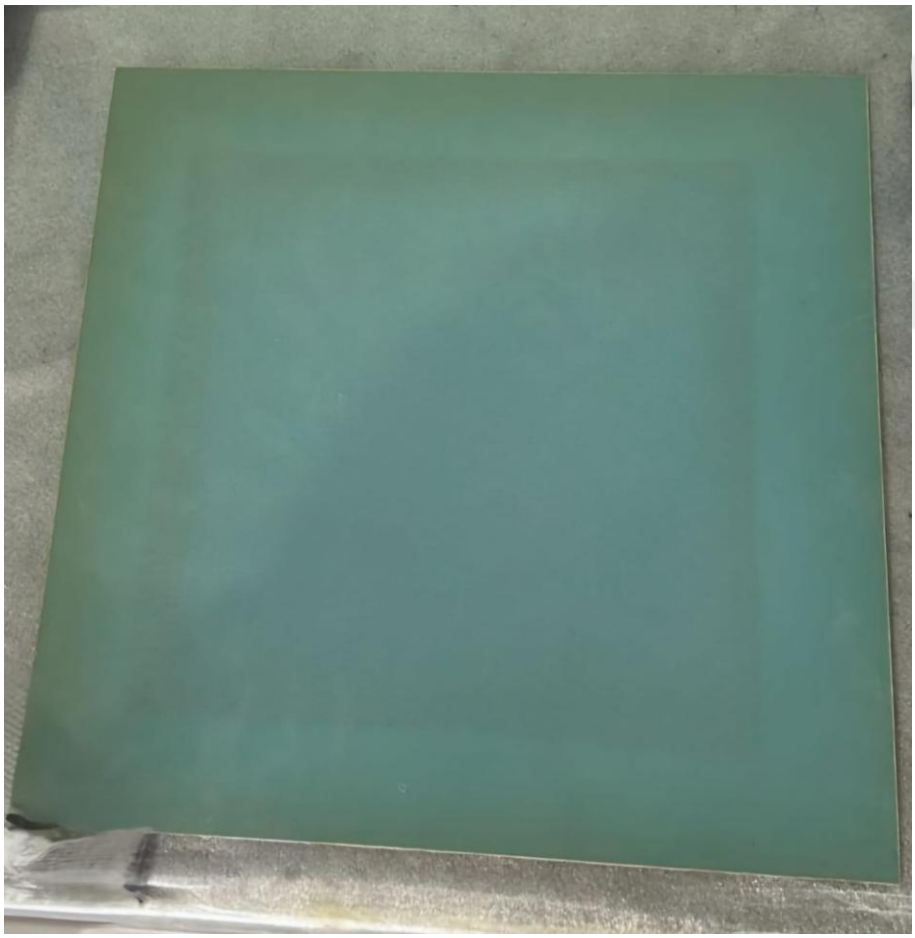


Resim 4.5. ASC marka otoklav

Parça birinci aşama işlemleri tamamlandıktan sonra tekrar temiz odaya alınmıştır. İkinci aşama yapışma işlemleri için, kürleme sonrası yüzey hazırlığı gerçekleştirilmiştir. Peel ply tabakası sökülerek yapışma yüzeyi oluşturulmuştur. Peel ply söküldükten sonra parça yüzeyinde kalan kalıntılar süpürge ile temizlenmiş ve yapışma yüzeyinin kontaminasyondan

arındırıldığına emin olunmuştur. Yapıştırma işlemi için film adhesive uygulanmış ve ara vakuma alınmıştır. Ardından sandviç yapıyı oluşturan, daha önceden ölçülerine kesilmiş core malzemesi yerleştirilmiştir. Sonrasında, Quartz prepreg katmanları (-45/90/45/0) yönleri ile serilmiş ve tekrar otoklav kürleme döngüsüne alınmıştır. Bir önceki kürleme işleminden farklı olarak basınç balpeteği core malzemesinde göçmeleri engellemek amacı ile 3 bar olarak uygulanmıştır.

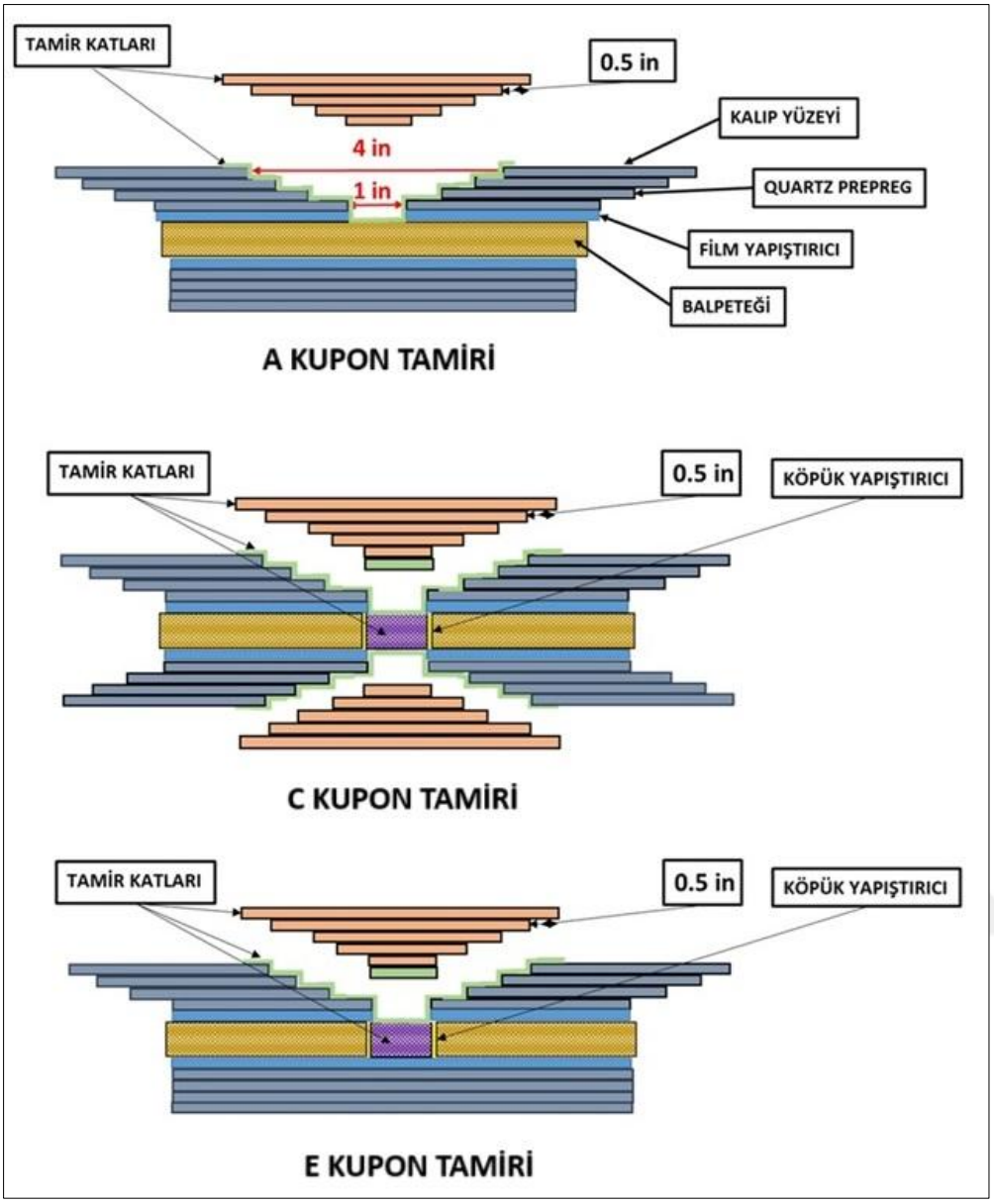
Kürleme tamamlandıktan sonra, parçanın fazla malzemeleri kesim işlemiyle alınmış ve nihai ölçülerine (300 mm × 300 mm) Resim 4.6'da görüldüğü gibi getirilmiştir.



Resim 4.6. Üretilen kuponlar

4.3. Tamir Uygulamaları

Bu çalışmada, kuponlardaki hata simülasyonu için 1 inç (25,4 mm) boyutunda bir hata oluşturulduğu kabul edilmiştir. Bu hata boyutunun seçilme nedeni, ilgili kupon boyutlarına göre yapılabilecek en geniş tamir alanını kullanmaktır. Aynı zamanda, radyo frekans (RF) ve mekanik testlerde izin verilebilecek hata limitlerinin değerlendirilmesine olanak tanıyacak uygun bir boyut olarak belirlenmiştir. Tamir katlarının her katmanda 0.5 in genişletilerek açılmıştır. Çalışma kapsamında farklı parametrelerin etkisini değerlendirebilmek amacıyla altı farklı tamir senaryosu uygulanmıştır. Tek taraf laminenin hasar gördüğü durumlar, tek taraf lamine ve balpeteği hasar gördüğü durumlar ve çift taraf lamine ve balpeteği hasar gördüğü durumlar değerlendirilerek sandviç bölgesinde bir radomda oluşabilecek tüm hasar senaryolarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu senaryolar A, B, C, D, E ve F olarak isimlendirilmiş ve detayları Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. A, C, E kupon tamiri

Farklı tamir senaryolarının belirlenmesindeki temel amaç, radyo frekans (RF) performansı üzerindeki etkileri incelemek ve aynı zamanda mekanik özellikleri değerlendirmektir. Yapısal tamir çözümlerinde, genellikle ek katman (patch) uygulanarak tamir bölgesinin mekanik dayanımının artırılması hedeflenmektedir. Ek kat yönü 0^0 olarak belirlenmiştir. Ancak, radom yapıları söz konusu olduğunda, ek katmanların RF performansına olan etkilerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. B tamiri A kuponun ek katsız hali, D kupon tamiri C kupon tamirinin ek katsız hali ve F tamiri E tamirinin ek katsız hali olarak belirlenmiştir.

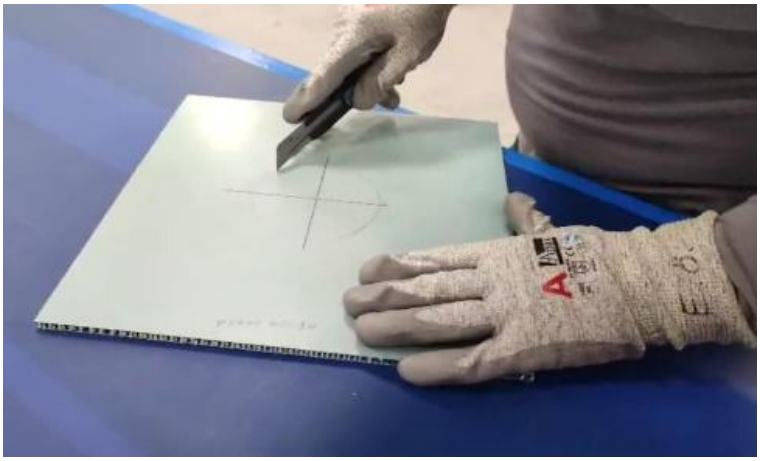
4.3.1. Hata açma

Doğru hata açma yöntemlerinin belirlenmesi ve uygun tamir imalat tekniklerinin değerlendirilmesi amacıyla, literatür taraması doğrultusunda incelenen tamir yöntemleri arasından ilk test kuponları üzerine "merdiven tipi" (step) ve "konik zımpara" (scarf) tamir metotları uygulanmıştır. Konik zımpara yöntemiyle hata açma işlemi Resim 4.7'de sunulduğu üzere, yüzeyde düzgün bir eğim oluşturmak amacıyla ince tip zımpara ve uygun el aletleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



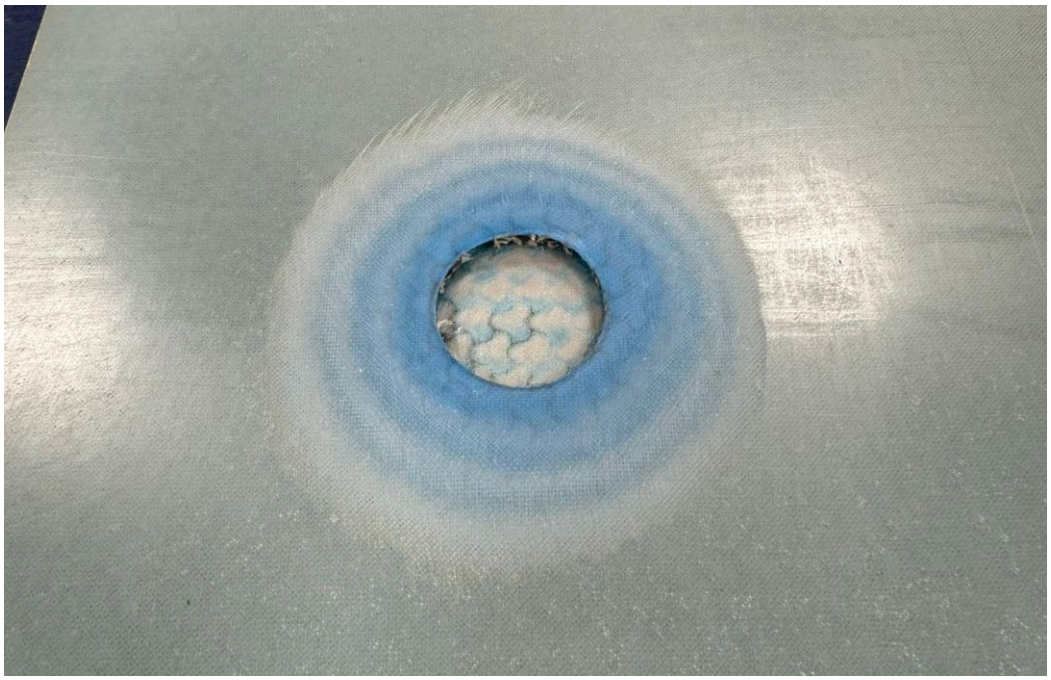
Resim 4.7. Bindirme (scarf) yöntemi hata açma

Merdiven tipi tamir yöntemi için ise, önceden işaretlenmiş dairesel hata bölgeleri dikkate alınarak, maket bıçağı ile katman katman kesim işlemi yapılmış ve prepreg malzeme sırasıyla kaldırılmıştır. Hata açma işlemi ile ilgili görsel Resim 4.8'de sunulmuştur.

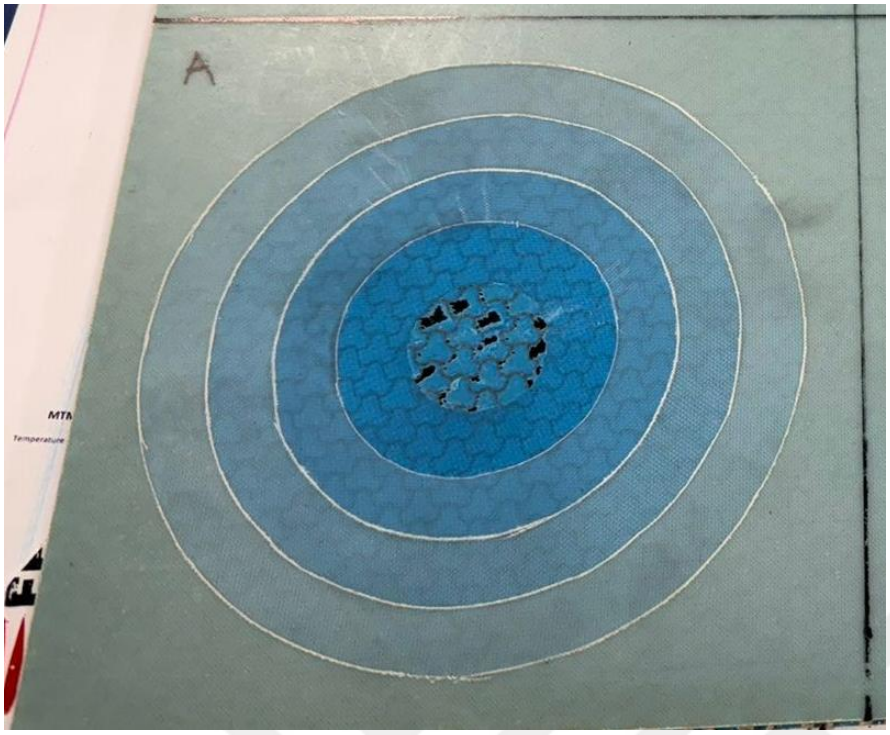


Resim 4.8. Merdiven (step) metodu hata açma

Tamir alanının dışında kalan bölgeler için maskeleme işlemi de ayrıca uygulanmıştır. Kesim işlemleri esnasında bir alttaki tabakanın katmanlarının kesilmemesi yapısal bütünlüğün korunması açısından önem arz etmektedir. Bindirme tipi hata açılırken ilk katman kalktıktan sonra değişen fiber yönleri gözlemlenerek ikinci katmanın hata açma işlemine geçilmiştir. Oluşan hata açma işlemlerinin sonuçları konik tip için Resim 4.9, merdiven hata içinse Resim 4.10'da verilmiştir.



Resim 4.9. Konik (scarf) hata



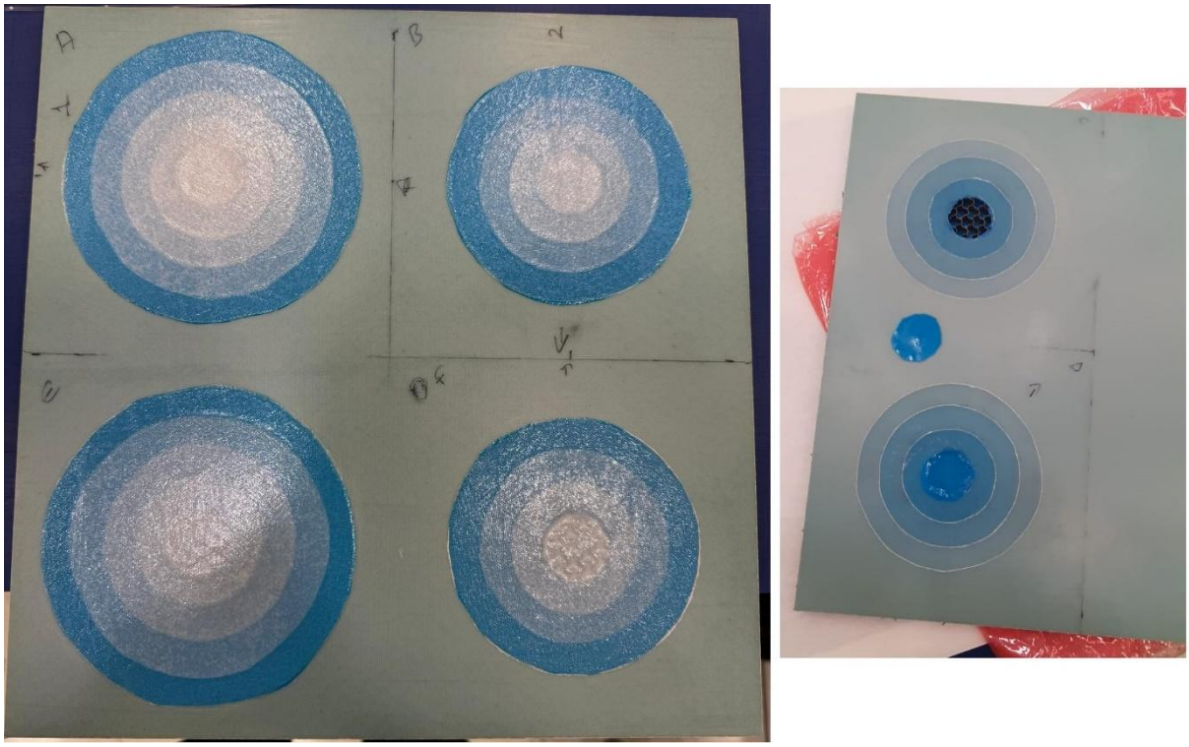
Resim 4.10. Merdiven (step) hata

Kupon kalınlığı ve belirlenen hata boyutu göz önüne alındığında tamir işlemlerine devam etmek adına en uygun yöntem olarak merdiven tipi (step) tamir metodu seçilmiştir. Alternatif olarak, konik zımpara (scarf) yöntemi de hata açma aşamalarında değerlendirilmiş ancak merdiven tipi tamir, daha kontrollü bir yüzey oluşturması nedeniyle tercih edilmiştir.

4.3.2. RF kupon tamirleri

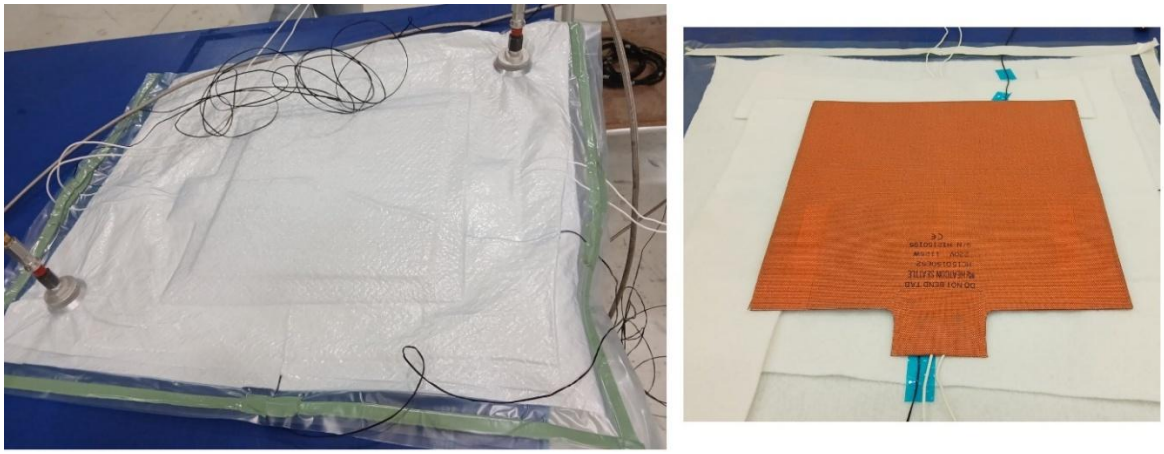
Şekil 4.1'de gösterilen hata tiplerine yönelik tamir işlemleri, her plakadan 4 adet, 150×150 mm kupon elde edilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. İşlemlere başlamadan önce, belirtilen ölçüler doğrultusunda merdiven tipi hatalar açılmıştır. C, D, E ve F hata tiplerin de merkezdeki 1 inç'lik kısımdan balpeteği çıkarma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, katman geçişlerinin kontrollü bir şekilde sağlanmasına ve tamir bölgesinin dışında kalan alanların yapısal bütünlüğünün korunmasına özen gösterilmiştir. Tamir işlemleri sırasında yerleştirilecek balpeteği malzemesi önce kurutma işlemine tabi tutulmuş ve nem almayacak şekilde vakumlu ambalaj içinde muhafaza edilmiştir. Ek katman içeren tamir bölgelerinde, tamir boyutları 0,5 inç daha geniş olduğu için, son kat yüzeye zımpara işlemi uygulanmış ve solvent bazlı temizleyici ile yüzey hazırlığı yapılmıştır. Balpeteği tamiri uygulanacak kuponlarda, önceden kurutulmuş core malzemesinden 1 inç çapında parçalar kesilmiş ve

tamir bölgesine uygun şekilde yerleştirilmiştir. Balpeteği tamiri sırasında, köpük yapıştırıcı (foam adhesive) kullanılarak yeni balpeteğinin yapısal bütünlük sağlayacak şekilde sabitlenmesi sağlanmıştır.



Resim 4.11. RF kuponlar tamir görselleri

Tamirde kullanılacak film adhesive ve quartz prepreg katmanları, belirlenen ölçülerde rulodan kesilerek hazırlanmıştır. İlk olarak, prepreg ile tamir bölgesi arasındaki yapışmayı sağlamak amacıyla film adhesive katmanı uygulanmış ve kuponlar ara vakum işlemine tabi tutulmuştur. Bu vakum işlemi, film adhesive tabakasının alt yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamak ve olası boşlukları önlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Film adhesive katmanının ardından, ilgili serim yönlerinde kesilmiş quartz prepreg katmanları tamir bölgesine yerleştirilmiş ve tekrar ara vakum işlemine alınmıştır. Böylece, tamir bölgesinde homojen bir laminasyon sağlanarak katman bütünlüğü korunmuştur. Resim 4.11'de tamir işlemlerinin bu aşamaları verilmiştir.



Resim 4.12. Final torba ve ısı battaniye

Serim işlemi tamamlandıktan sonra, kürleme aşamasına geçilmiş ve Resim 4.12'de sunulan nihai vakum torbalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kürleme işlemi, servis koşulları da dikkate alınarak, havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan kürleme battaniyesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için HEATCON marka ısı battaniye kullanılmıştır. İşlem, sıcaklık ve vakum altında uygulanmış olup, otoklav basıncı bulunmadığından vakum baskısının daha homojen dağılmasını sağlamak amacıyla son katman üzerine metal bir baskı plakası yerleştirilmiştir. Isı kontrolünü sağlamak amacıyla plakalara iki adet termal çift yerleştirilmiş ve Çizelge 4.2'de belirtilen kürleme çevrimine uygunluk sağlanmıştır. Kürleme işlemleri tamamlandıktan sonra, tamir alanları 150×150 mm boyutlarında kesilerek RF ölçüm kuponları elde edilmiştir. RF testlerinde referans almak amacı ile tamir yapılmamış referans kuponlarda ihtiyaç duyulduğu için yine aynı ölçülerde bu kuponlarda kesim işlemi esnasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Isı battaniye kürleme çevirimi

Vakum torba basıncı	(-150) - (-250) mmHg
Isınma eğrisi	0,5 – 3,5 °C / dakika
Soğuma Eğrisi	0,5-5,0 °C / dakika
Kürlenme sıcaklığı	135°C
Kürlenme Süresi	120-180 dakika

.

4.3.3. Otoklav kupon tamirleri

RF kupon sonuçları, tahribatlı ve tahribatsız muayeneler ışığında değerlendirildikten sonra, üretim iyileştirmesi yapmak amacıyla ısıl battaniye yerine otoklav ile basınçlı kürleme tekniği kullanılarak kupon üretimleri gerçekleştirilmiştir. Test plakalarının üretimi, 4.2 kupon üretimleri başlığı altında da belirtildiği üzere, otoklavda iki aşamalı bir süreçle yapılmaktadır. Tamir için kullanılan prepreg quartz malzemesi, basınç altında kürlenebilen bir malzeme olup, bu kürleme çevirimiyle daha uyumludur. Otoklav ile tamir, servis halindeki uçaklarda genellikle uygulanabilir olmayıp, radom detay seviyesinde üretim aşamasındayken veya uçaktan sökümü sağlanabildiği takdirde, uygun altyapı şartlarında uygulanabilecek bir tamir yöntemidir. Bu sebeplerle, basınç etkisinin tamir üzerindeki sonuçlarını incelemek ve RF performansını gözlemlemek amacıyla kupon üretimleri yapılmıştır. RF kupon üretim teknikleri ile aynı yöntemler kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Kürleme çevirimi, bu kuponlar için otoklavda Çizelge 4.2'de belirtilen şartlarda uygulanmıştır. Otoklav tamir çalışması kapsamında, balpeteği çıkarılan hataların mekanik mikroyapı ve RF olarak en çok etkileneceği düşünülerek C, D, E ve F tamir senaryoları ile tamir çalışmaları yapılmıştır.

4.4. Mekanik Test Düzenekleri

Mekanik testlerin icrası için Resim 4.13'de sunulan MTS C45.105 marka cihaz kullanılmıştır. Ekipman 100 KN'luk bir çeneye sahiptir. RF kuponlar incelenmeleri tamamlandıktan sonra üç noktadan eğme testi ve sandviç yapı çekme testine tabi tutulmuştur.

Üç noktadan eğme testi, düzlemsel sandviç yapılar üzerinde gerçekleştirilen eğilme testleri, panelin eğilme rijitliğini, çekirdek malzemenin kayma dayanımını ve kayma modülünü, ayrıca yüzey tabakalarının basma ve çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla uygulanabilir. Özellikle balpeteği kayma dayanımını değerlendirmeye yönelik testler, aynı zamanda balpeteği ile yüzey tabakaları arasındaki bağın kalitesinin değerlendirilmesinde de kullanılabilir.

ASTM_C393 sandviç panellerde, yüzey tabakaları ile balpeteği malzeme arasındaki bağın sağlamlığı, yüzey tabakasının stabilitesini korumak ve yük aktarımının sağlıklı şekilde gerçekleşmesi göstermek açısından kritik öneme sahiptir. Sandviç yapı çekme testi, lamine-balpeteği bağ kalitesini ve dayanımını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.



Resim 4.13. MTS marka test ekipmanı

4.5. TTU Ölçüm Cihazı

Tahribatsız muayene işlemleri kapsamında, porozite ve iç yapı süreksizliklerinin belirlenmesi amacıyla Resim 4.14'de sunulan Tecnatom markasına ait TTU (Through Transmission Ultrasound) cihazı kullanılmıştır.



Resim 4.14. TTU cihazı

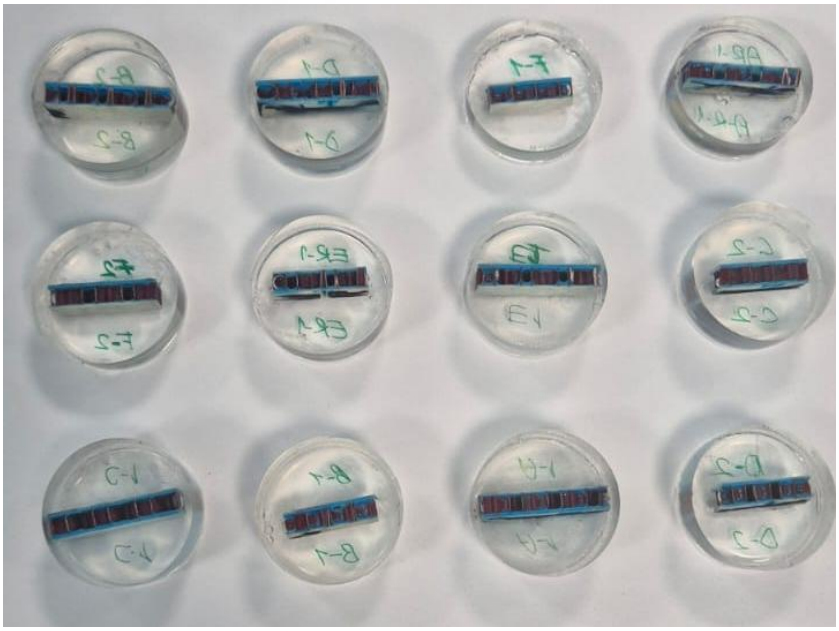
4.6. Mikro Yapı analizi

Mikro yapı analizi için RF kuponların belirli bölgelerinden kesitler alınmıştır. Resim 4.16'da sunulan bu kesitler bakalit ile kaplandıktan sonra mikroskop altında incelemeye tabi tutulmuştur. Bu incelemelerde Resim 4.15'de sunulan Nikon ECLIPSE MA200 marka cihaz kullanılmıştır.



Resim 4.15. Nikon ECLIPSE MA200 cihaz

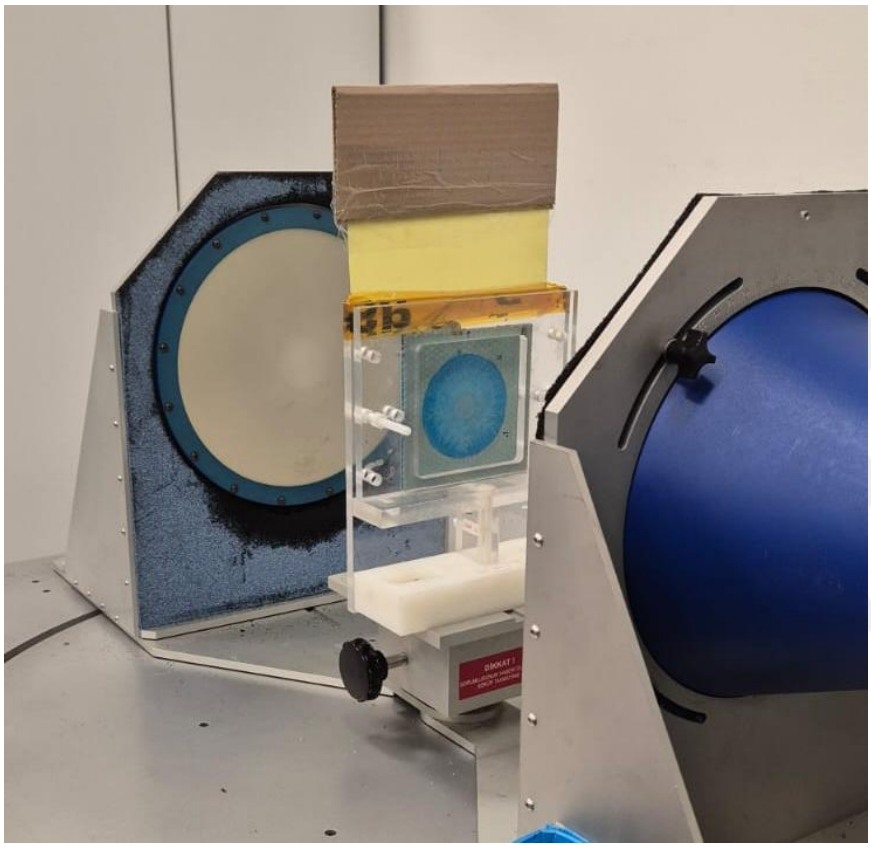
Bu incelemelerde tespit edilmek istenen tamirin ve katmanların yapışma performansını mikro seviyede gözlemlemektir. Kompozit parça üretimindeki en önemli hata kodlarından biri olan boşluklu (porosity) yapılar ya da yapıştırıcı çatlakları bu çalışma sayesinde gözlemlenebilir hale gelmiştir.



Resim 4.16. Bakalite alınmış numuneler

4.7. Elektromanyetik Ölçüm Test Düzeneği

Radom tamir senaryolarının performanslarını belirlemek amacıyla RF testleri icra edilmiştir. Bu kapsamda Resim 4.17'de görülebilecek bir test düzeneğinde RF kuponları ve aynı ölçülerdeki referans kuponların testleri icra edilmiştir.



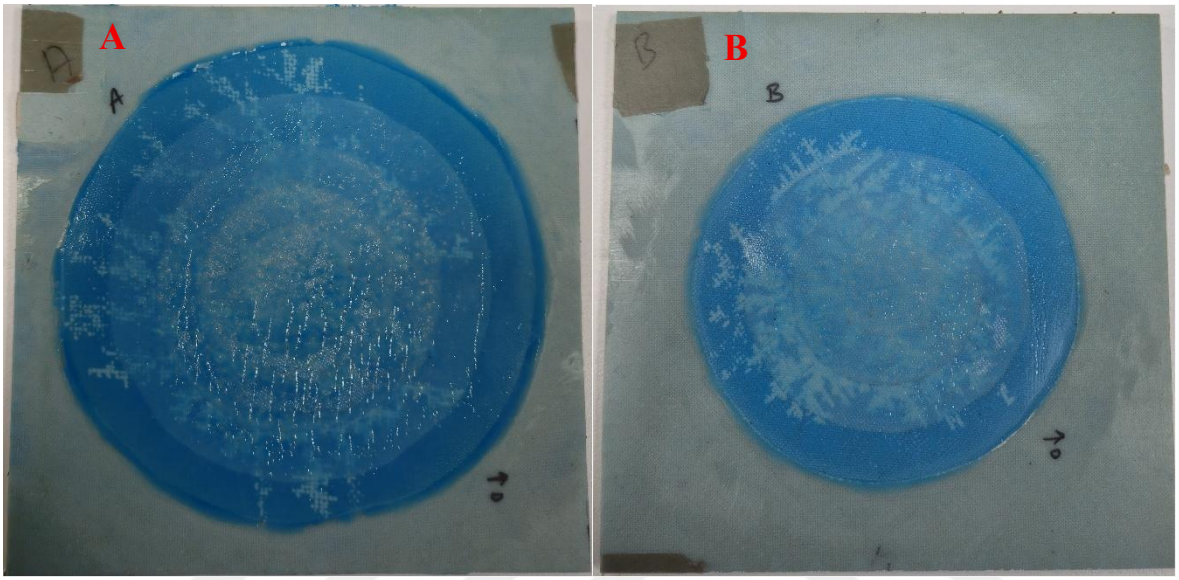
Resim 4.17. RF ölçüm cihazı

Test kurulumun ortasında kuponları yerleştirmek için 150x150mm'ye uygun bir fikstür hazırlanmıştır. Alıcı ve verici arasında belirli frekans aralıklarında gönderilen sinyaller fikstür boşken sıfır kayıpla ölçülüp daha sonra araya bir metal plaka koyularak tekrar ölçüm yapılıp kalibrasyonu sağlanmıştır. Sonrasında altı farklı senaryo ile hazırlanan tamir kuponları ve iki referans kuponu teste tabi tutulmuştur. Test kurulumun ortasında kuponları yerleştirmek için 150x150mm'ye uygun bir fikstür hazırlanmıştır. Alıcı ve verici arasında belirli frekans aralıklarında gönderilen sinyaller fikstür boşken sıfır kayıpla ölçülüp daha sonra araya bir metal plaka koyularak tekrar ölçüm yapılıp kalibrasyonu sağlanmıştır. Sonrasında altı farklı senaryo ile hazırlanan tamir kuponları ve iki referans kuponu teste tabi tutulmuştur. Tamir kuponlarının RF performansları, S-parametreleri incelenerek

değerlendirilmiştir. S11 ve S21 parametreleri, bir RF sisteminde elektromanyetik sinyallerin yansıma ve iletim davranışlarını tanımlayan temel büyüklüklerdir. Bu tür sistemlerde "port" terimi, genellikle sinyalin giriş yaptığı veya çıkış aldığı bağlantı noktalarını ifade eder; bu bağlamda birinci port verici (giriş), ikinci port ise alıcı (çıkış) olarak düşünülebilir. S11, verici porttan gönderilen sinyalin aynı port üzerinden geri yansıyan kısmını temsil eder; bu değerin dB cinsinden ne kadar negatif olduğu, yansımanın o kadar düşük ve sistemin o kadar iyi uyumlu olduğunu gösterir. S21 ise vericiden gönderilen sinyalin alıcı porttan ne kadar iletildiğini gösterir ve bu değer sıfıra ne kadar yakınsa, sinyalin o kadar az kayıpla geçtiği anlamına gelir. Bu nedenle, ideal bir RF yapıda düşük S11 ve yüksek (yani sıfıra yakın) S21 değerleri tercih edilir.

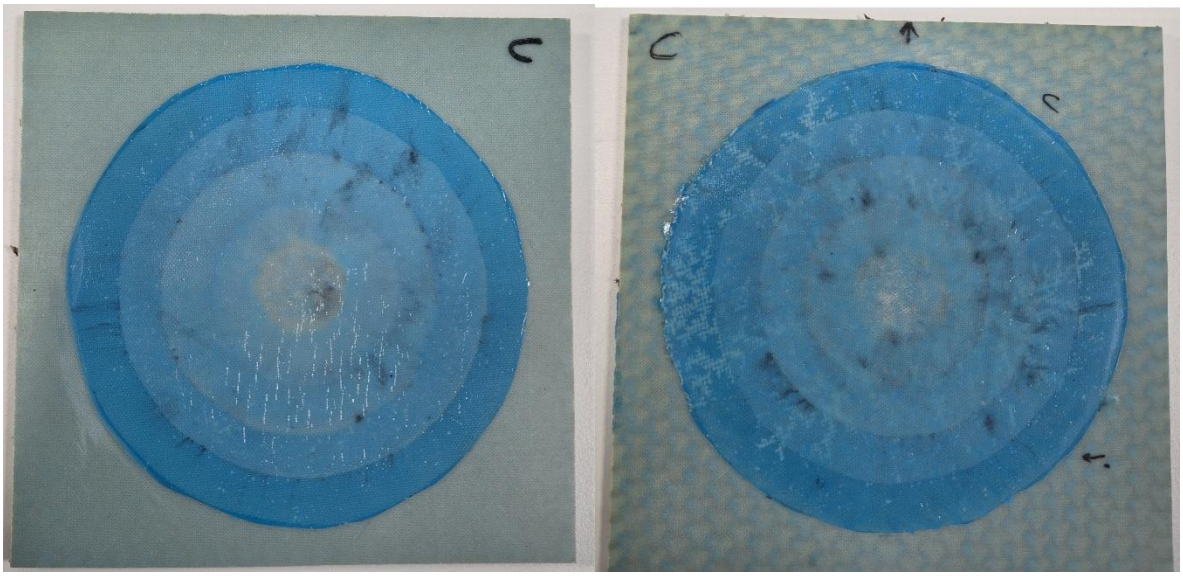
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

RF testleri için hazırlanan kuponların üretimi tamamlandıktan sonra kuponlar görsel muayeneye tabi tutulmuştur. Üretilen kuponların görselleri A ve B kuponu için Resim 5.1'de verilmiştir.



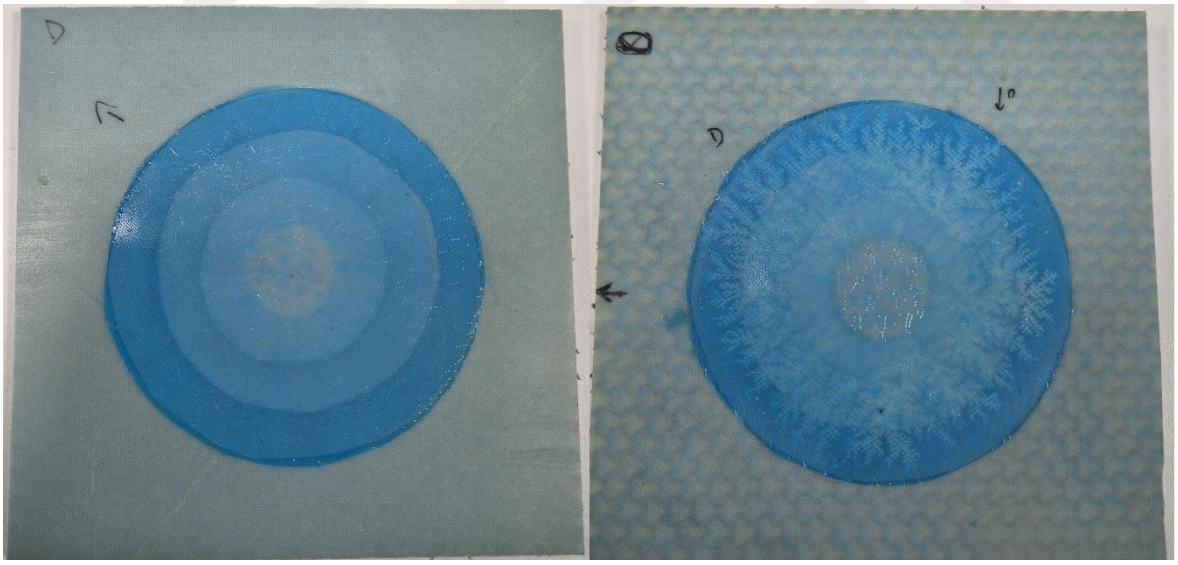
Resim 5.1. A ve B RF kupon görüntüsü

A kuponunda yüzeyde reçine kurulukları tespit edilmiştir. A ve B kuponunda katlar arası porosite olduğunu düşündüren kar tanesi benzeri alanlar oluşmuştur.



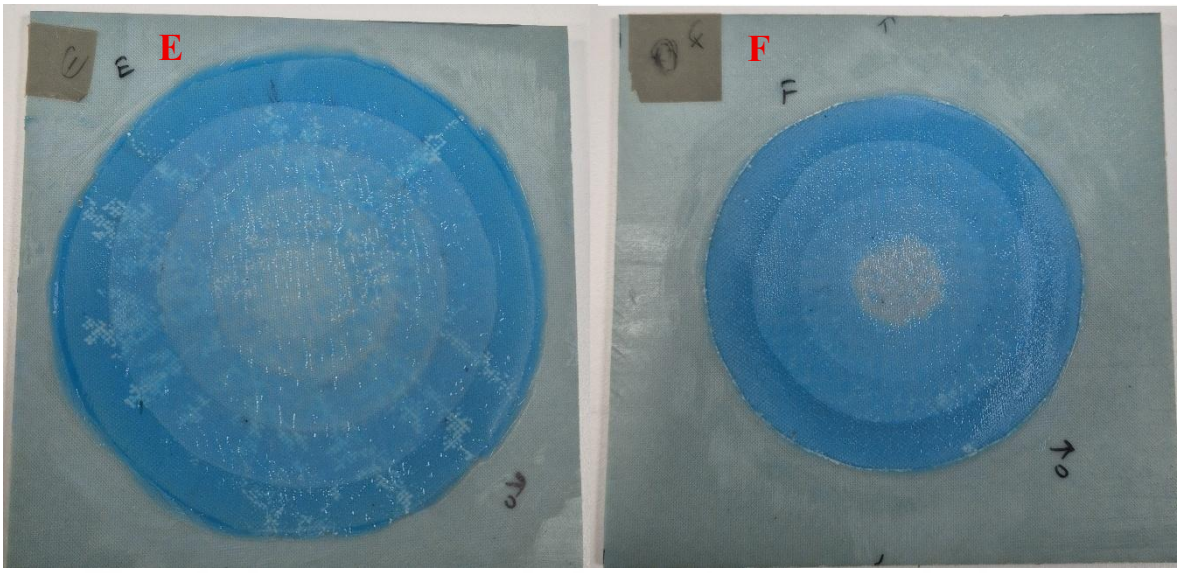
Resim 5.2. C RF kuponu ön ve arka görüntüsü

Resim 5.2'de sunulan C kuponu incelendiğinde, serim tool yüzeyinde herhangi bir görsel durum tespit edilmezken, torba tarafında yine kar tanesi benzeri görüntüler oluştuğu tespit edilmiştir.



Resim 5.3. D RF kuponu ön ve arka görüntüsü

Resim 5.3'de görsel sonuçları sunulan D kuponunun, serim tool yüzeyinde herhangi bir görsel durum tespit edilmezken, torba tarafında yine kar tanesi benzeri görüntüler oluştuğu tespit edilmiştir.



Resim 5.4. E ve F RF kupon görüntüsü

Resim 5.4'te sunulan E ve F kuponuna ait görsellerde, E kuponunda kuponunda katlar arası porosite olduğunu düşündüren kar tanesi benzeri görüntü oluşmuştur. F kuponunda görsel herhangi bir bulguya rastlanmamıştır.

Oluşan bu bulguların sebebi prepreg tamiri yaparken otoklavdaki basınçlı ortam yerine tam vakum altında kürleme battaniyesi uygulanması sonucu yeterli baskının tamir alanının üzerinde oluşmamasıdır. Her ne kadar vakumla birlikte baskı plakası kullanılsa da prepreg kürlenirken ortaya çıkan hava kabarcıklarının dışarıya atılabilmesi için basınçlı bir ortama ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır. Tespit edilen görsel bulgular oluşması sebebiyle kuponlar, tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Aynı zamanda bu bulguların mekanik ve EM performans açısından bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır.

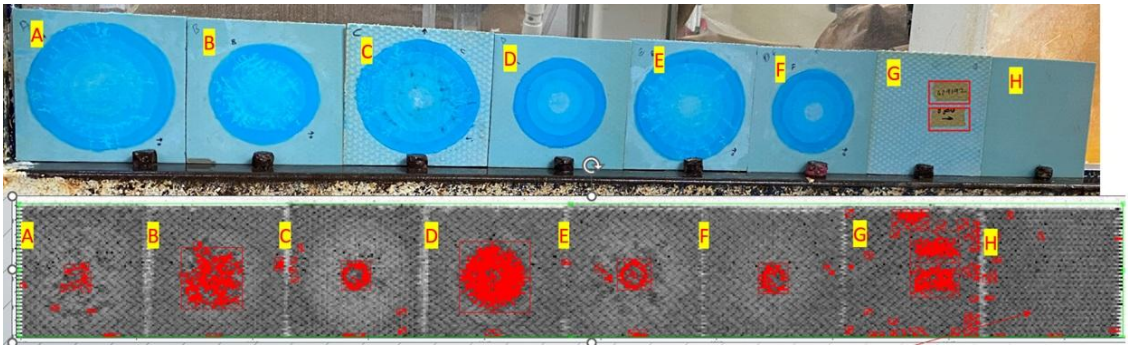
5.1. Ultrasonik Muayene Bulguları

Ultrasonik muayene için Through-Transmission Ultrasound (TTU) cihazı kullanılmıştır. Kuponlar, Resim 5.5 görselindeki gibi cihaza yerleştirilmiştir.

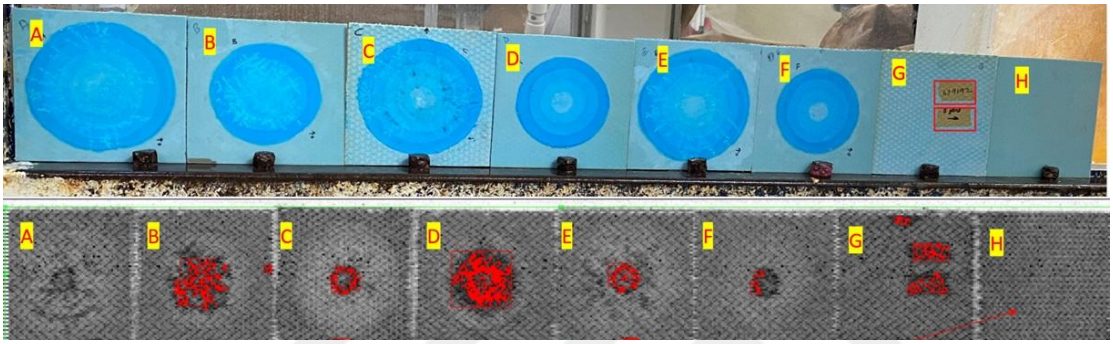


Resim 5.5. TTU Test Düzeneği

RF testi için referans olarak üretilen kuponlar, bu testte hatasız olduklarından dolayı şahit numune olarak kullanılmıştır. Resim 5.6 ve 5.7 görselinde, tezgâh tarama sonuçları görülebilmektedir. -6 dB'lik kayıpta, C ve F kuponları başarılı sonuçlar verirken, A ve E kuponlarında ufak hatalar gözlemlenmiş, B ve D kuponlarında ise kar tanesi görüntüsü tamamen görsele yansımıştır. -12 dB'lik kayıpta, B ve C kuponları haricinde diğer kuponlarda hata gözlemlenmemiş ve testten başarıyla geçmiştir. -6 dB'lik kayıp, oldukça konservatif bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir; ancak ilk denemelerde hassas ölçüm yapılabilmesi amacıyla bu değerde gözlemler yapılmıştır. C, D, E ve F kuponlarının merkezinde, halka şeklinde görülen kırmızı bölgeler, köpük yapıştırıcı kaynaklı olup, hata olarak değerlendirilmemiştir.



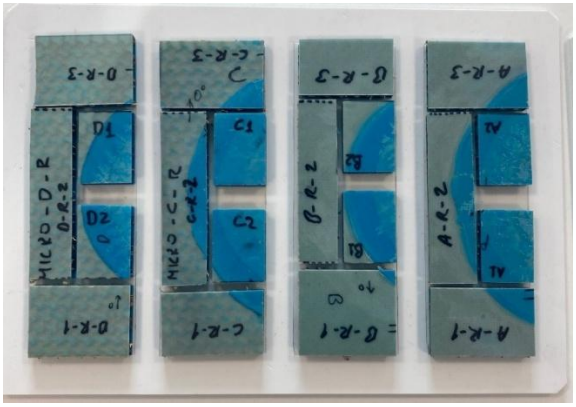
Resim 5.6. RF test kuponları -6dB kayıp görüntüsü

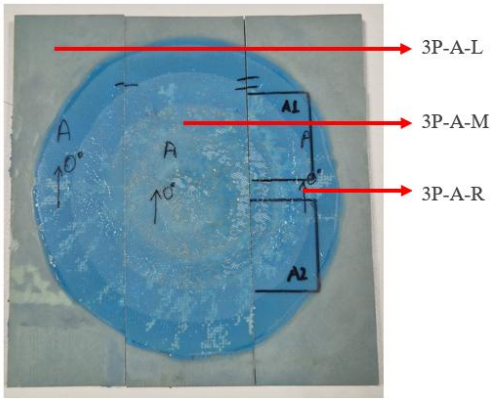


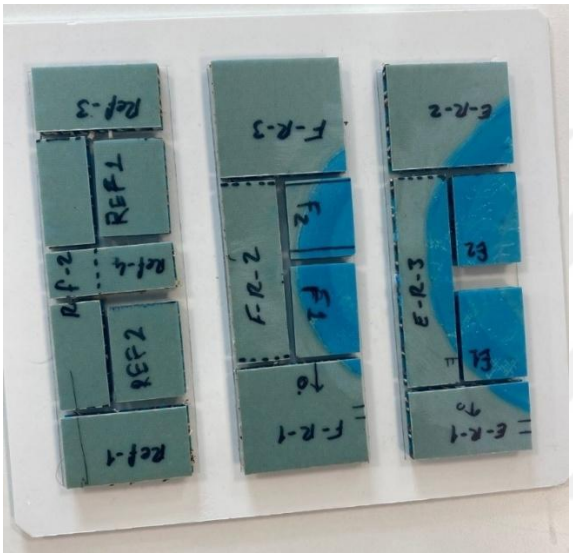
Resim 5.7. RF Test kuponları -12DB kayıp görüntüsü

5.2. Mikro Yapı Analizi

Tahribatsız muayeneler ve RF testlerinden sonra, mekanik testler ve mikroskop incelemeleri yapılabilmesi adına kuponlar eşit üç parçaya ayrılmıştır. Örnek marklama resim 5.8 görselinde verilmiştir. Tamir alanı ve balpeteği korunarak ayrılan ortadaki kesitlere üç noktadan eğme ve sandviç yapıya çekme testi yapılırken, kuponların sağ kısmında kalan kısımlar ise mikroskop altında incelenmiştir. B ve D kuponlarının NDI sonuçları diğer kuponlara göre -12dB kayıpta kusurlu sonuçlar sunduğu için, daha detaylı değerlendirebilmesi adına mikroskop altında incelemeler yapılmıştır. Bu amaçla RF testlerinden sonra parçalar Resim 5.8 görselinde sunulduğu şekilde inceleme yapabilmek adına kuponlar kesitlere ayrılmış ve markalanmıştır.

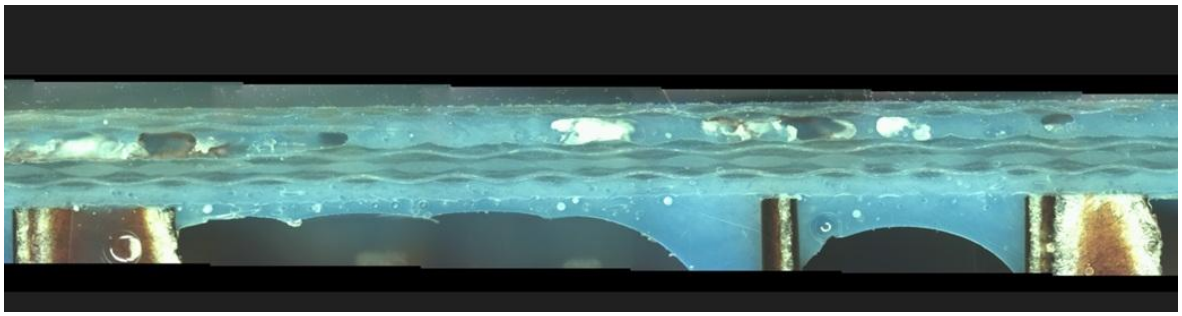






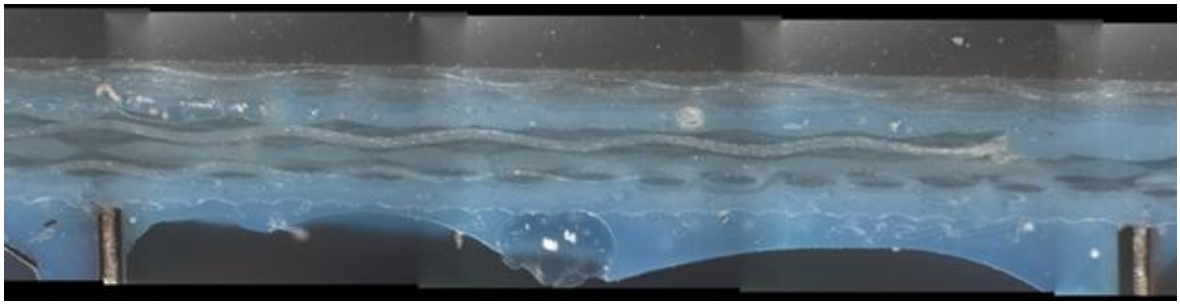
Resim 5.8. Mikroskop numuneleri

Boşluk analizi yapılırken cihazın tespit ettiği boşlukların toplam kesit alanına oranını hesaplanır. Bu yaklaşımlar sonucu Resim 5.9'da paylaşılan B kuponu yapılan analiz sonucunda toplam alanın %3,7'sinde kalacak şekilde poroziteye sahip olduğu tespit edilmiştir.



Resim 5.9. B numunesi mikroskop görüntüsü

D kuponu Resim 5.10’da görüntüsü verilen kesite yapılan analiz sonucunda toplam alanın %0,6’sında kalacak şekilde poroziteye sahip olduğu tespit edilmiştir.

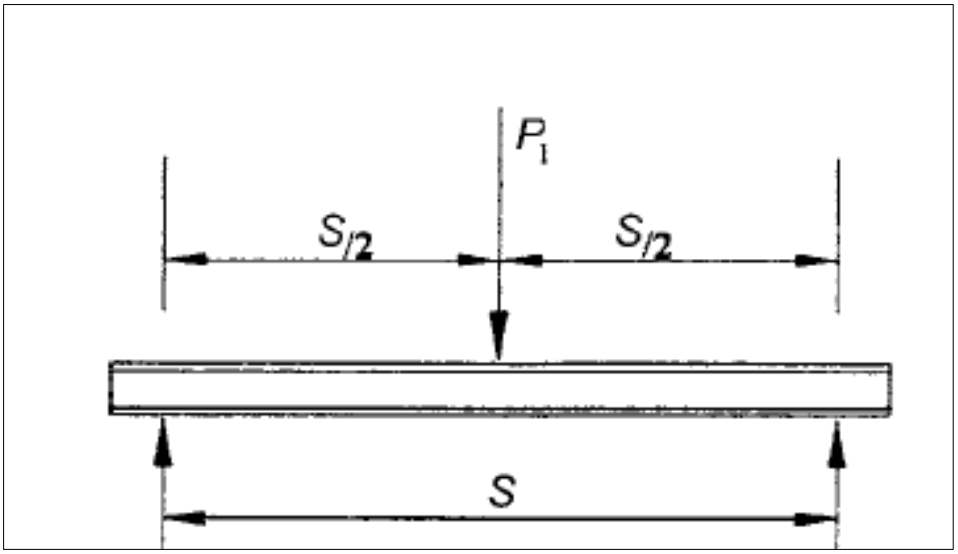


Resim 5.10. D numunesi mikroskop görüntüsü

Kompozit uygulamaların pek çoğunda boşluk oranı oldukça kritik bir parametredir; örneğin, gelişmiş dinamik havacılık kompozit yapılarında yaklaşık %1'in üzerindeki boşluk oranları genellikle kabul edilemez bulunur. Buna karşılık, kritiklik seviyesi daha az ve ikincil yapı uygulamalarında %5 veya daha yüksek boşluk seviyeleri tolere edilebilir [37, 38]. Kompozit yapıların boşluk oranları arttıkça mekanik performansları olumsuz etkilenmektedir [39]. Bu doğrultuda mekanik testler icra edilmiştir.

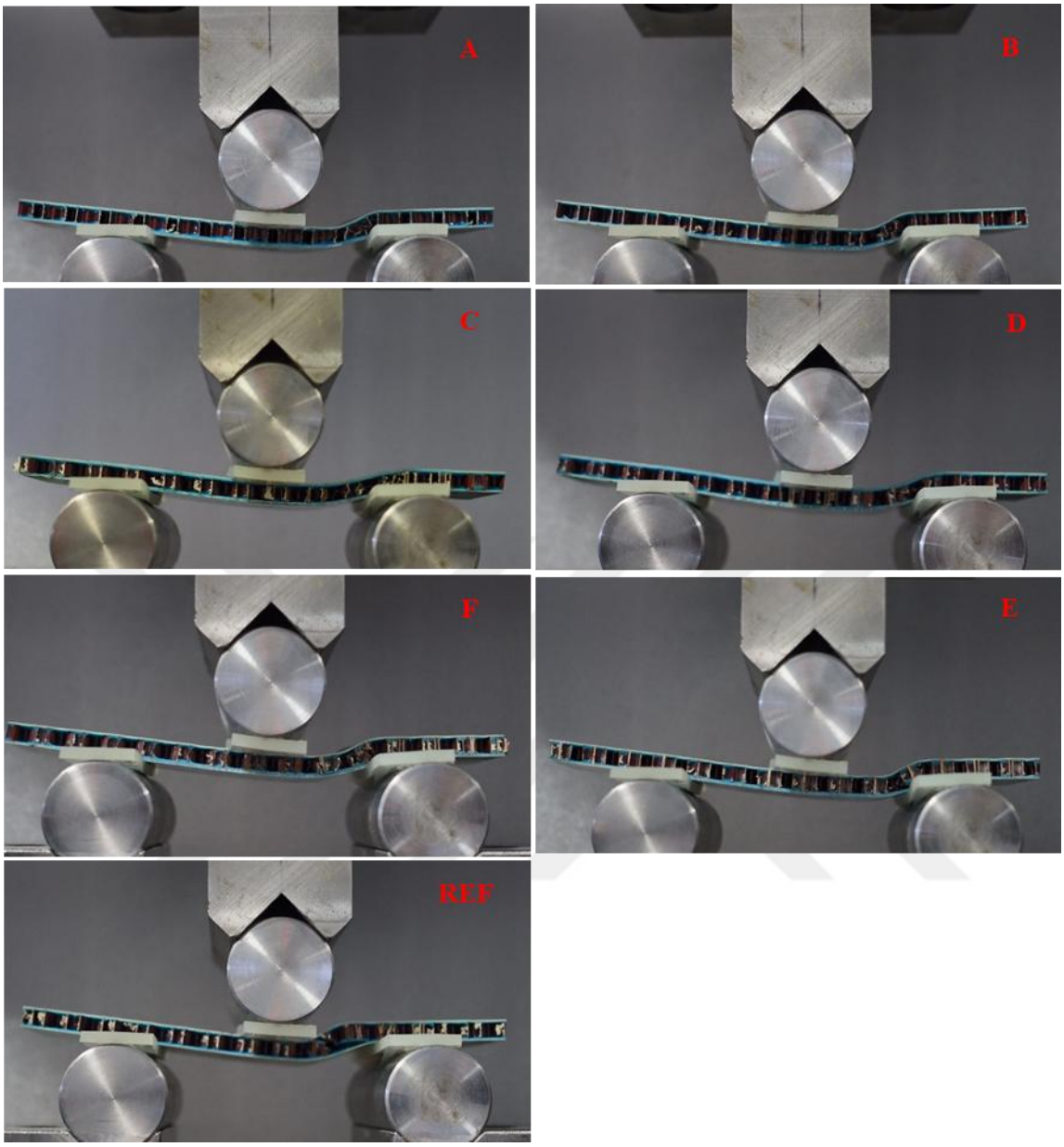
5.3. Üç Nokta Eğme Testi

RF test kuponlarının mekanik olarak değerlendirilebilmesi adına üç nokta eğme testi kuponların orta bölgesine icra edilmiştir. Testler için ASTM C393 (Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by BeamFlexure) standartı kullanılmıştır [40]. Test düzeneği şematik gösterimi Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1. ASTM C393 test konfigürasyonu

Test standartına göre kabul edilebilir hata kriteri test numunelerinin balpeteğinin kesme gerilimine dayanamadan kırıma uğramasıdır. Bu doğrultuda A, B, C, D, E, F ve tamir yapılmamış referans kuponlarının orta kesitleri teste tabi tutulmuştur. Resim 5.11'de sonuçları verilen testlerde; boşluk oranı en çok tespit edilen B numunesi dahil olmak üzere tüm kuponlar test standardına göre uygun şekilde kırıma uğramış, lamine bölgesi yapısal bütünlüğünü korumuştur.



Resim 5.11. Üç nokta eğme testi kırım görselleri

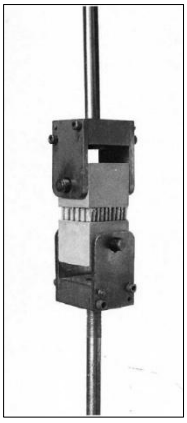
Çizelge 5.1'de üç noktadan eğme testinin sayılar verileri sunulmuştur. Tüm testlerde kabul edilen hata modu oluşmasının yanı sıra test sonuçları verileri de referans yanı tamir edilmemiş kuponlarla paralellik göstererek tamir uygulamasının balpeteği lamine arası yapışmasının başarılı olduğunu kanıtlamaktadır.

Çizelge 5.1. Üç nokta eğme testi sonuçları

Numune No	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Baskı Çapı (mm)	Aralık (mm)	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Yük (MPa)
3PB-A-M	50,05	150	30	90	1775	2,84
3PB-B-M	49,94	150	30	90	1835	2,9
3PB-C-M	49,93	150	30	90	2018	3,16
3PB-D-M	49,97	150	30	90	1969	2,96
3PB-E-M	48,01	150	30	90	1645	2,75
3PB-F-M	50,00	150	30	90	1777	2,92
3PB-REF-M	49,87	150	30	90	1715	2,91

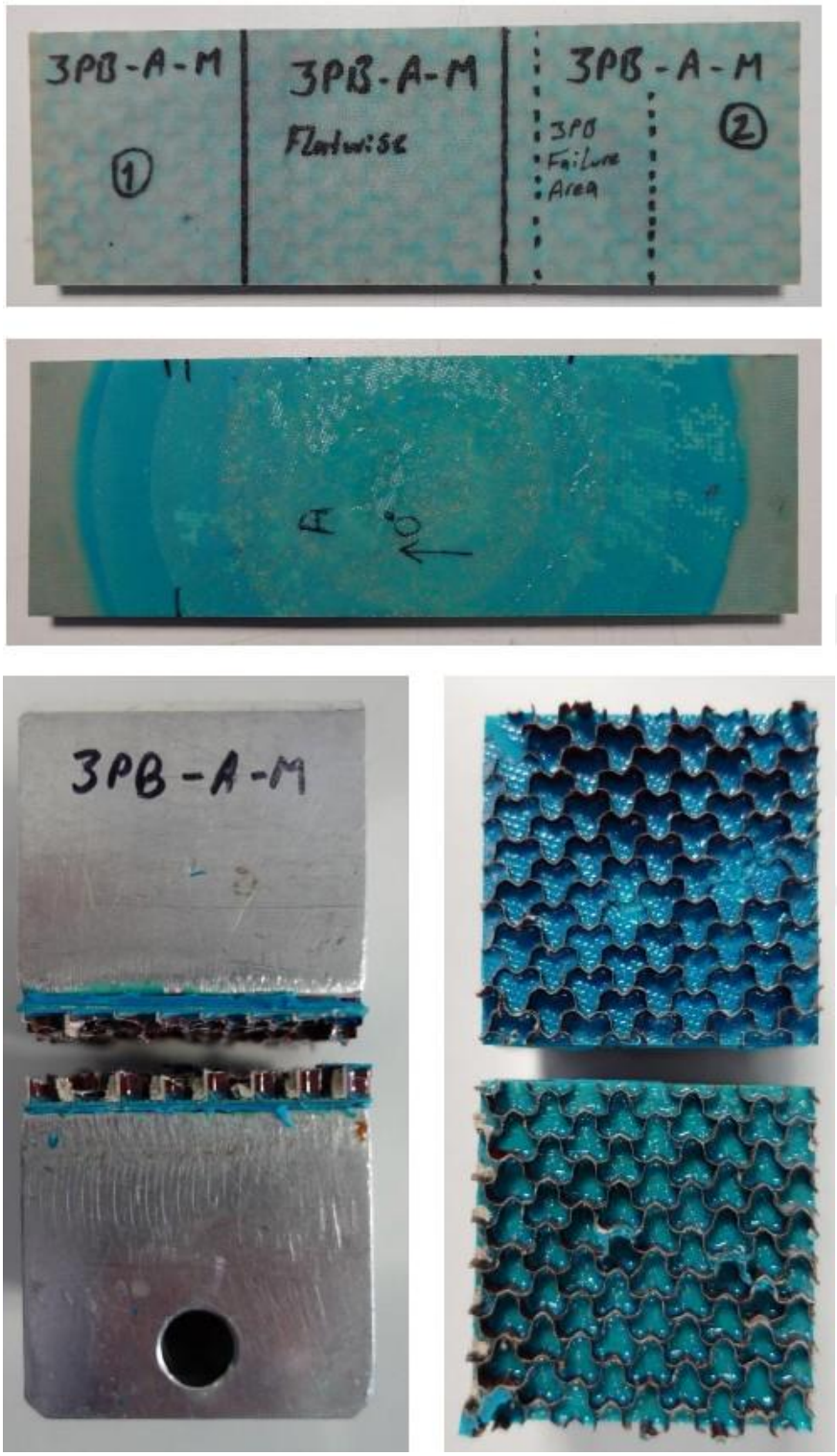
5.4. Sandviç Yapı Çekme Testi

Üç nokta eğme test yapılan kuponların balpeteğinden kırıma uğramayan kesitlerinden sandviç yapı çekme testi (Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions) icra edilmiştir. Testler için ASTM C297 (Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions) standartı kullanılmıştır [41].

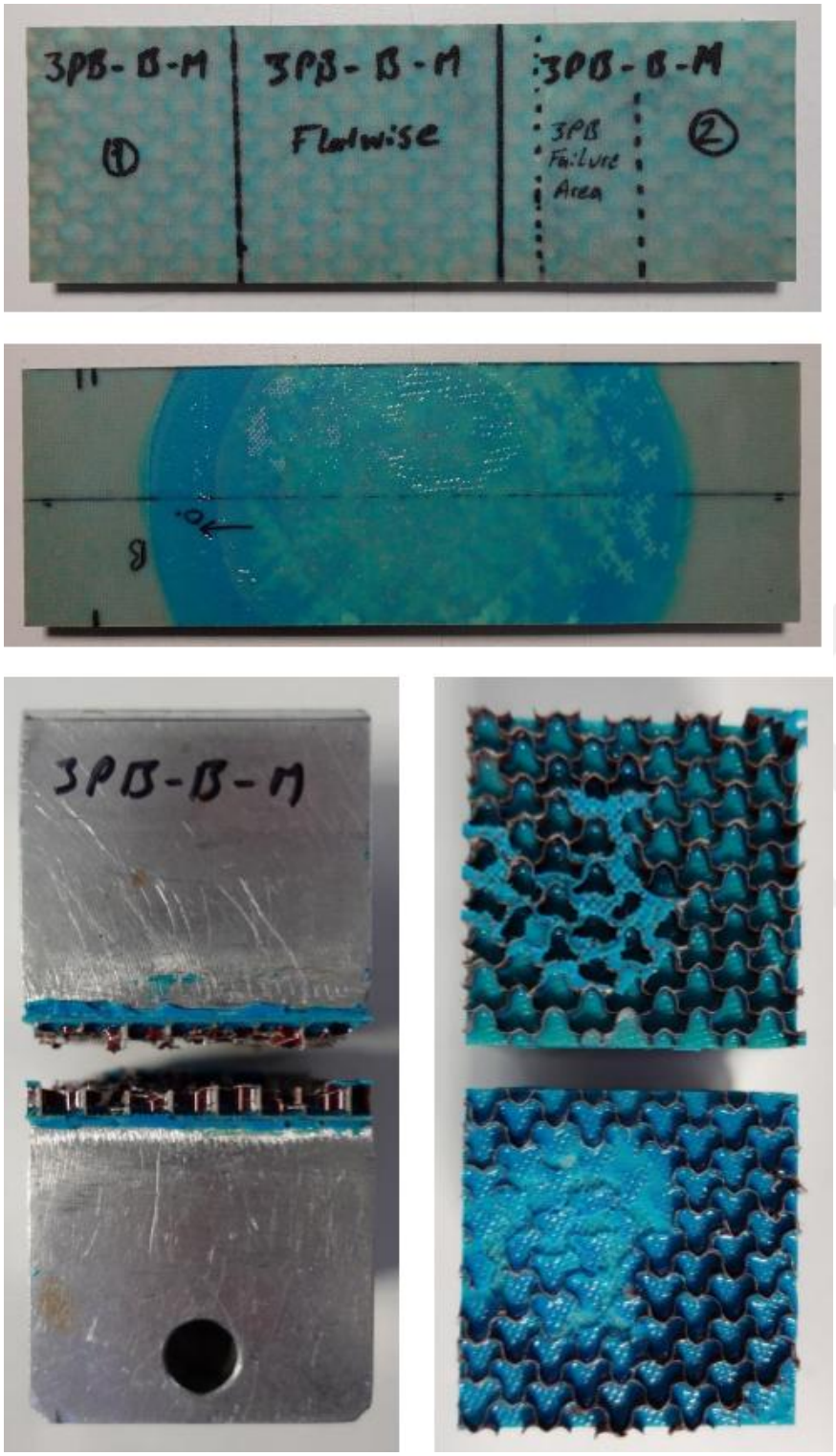


Şekil 5.2. ASTM C297 test konfigürasyonu [40]

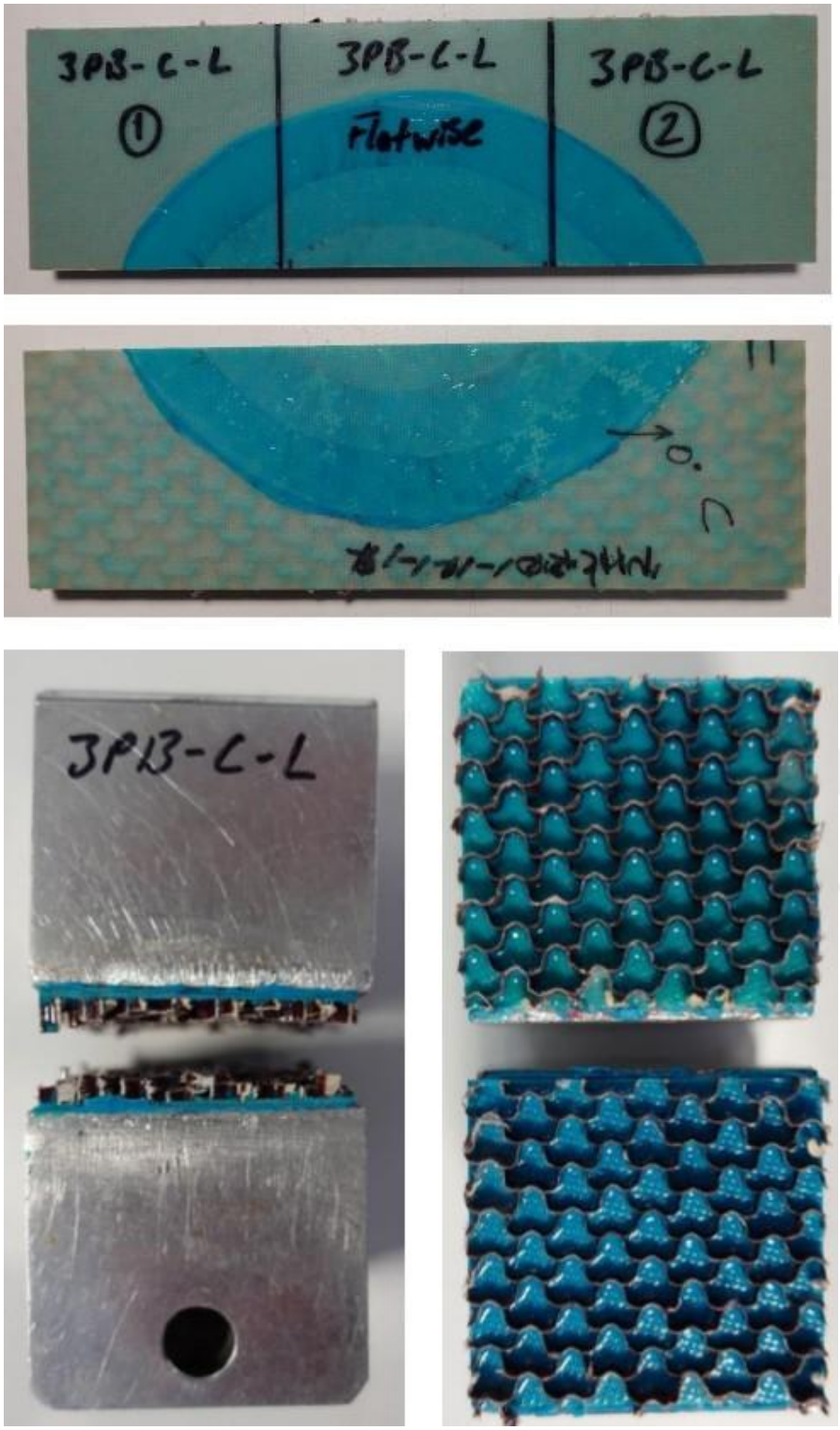
Test düzeneği şematik gösterimi Şekil 5.2'de sunulmuştur. Test standardına göre tek kabul edilebilir hata modu, sandviç yapının kendi iç yapısı içerisinde gerçekleşen hasarlardır. Yükleme bloğu ile sandviç yapı arasındaki yapışma bölgesinde meydana gelen bir hasar ise kabul edilebilir bir hata modu olarak değerlendirilmez. Resim 5.12'de A kuponun, Resim 5.13'te B kuponunun, Resim 5.14'te C kuponunun sol kesitinin, Resim 5.15'te C kuponunun orta kesitinin, Resim 5.16'da D kuponunun, Resim 5.17'de E kuponunun, Resim 5.18'de F kuponunun ve Resim 5.19'da referans kuponun balpeteği yapı çekme testinin görselleri sunulmuştur. Bu görseller kapsamında hata modunun sandviç yapının hangi bölgelerde kendi iç yapısından hasara uğramadığı, hangi bölgelerdeyse balpeteğinin iç yapısından hasarlanarak üst ve alt tutucuda da balpeteği hücrelerinin kaldığı görülebilmektedir. Burada ilgili kesit alanda yüzdesel olarak ne kadar doğru hata modu oluştuğu hesaplanmaktadır.



Resim 5.12. A kuponu sandviç yapı çekme testi



Resim 5.13. B kuponu sandviç yapı çekme testi



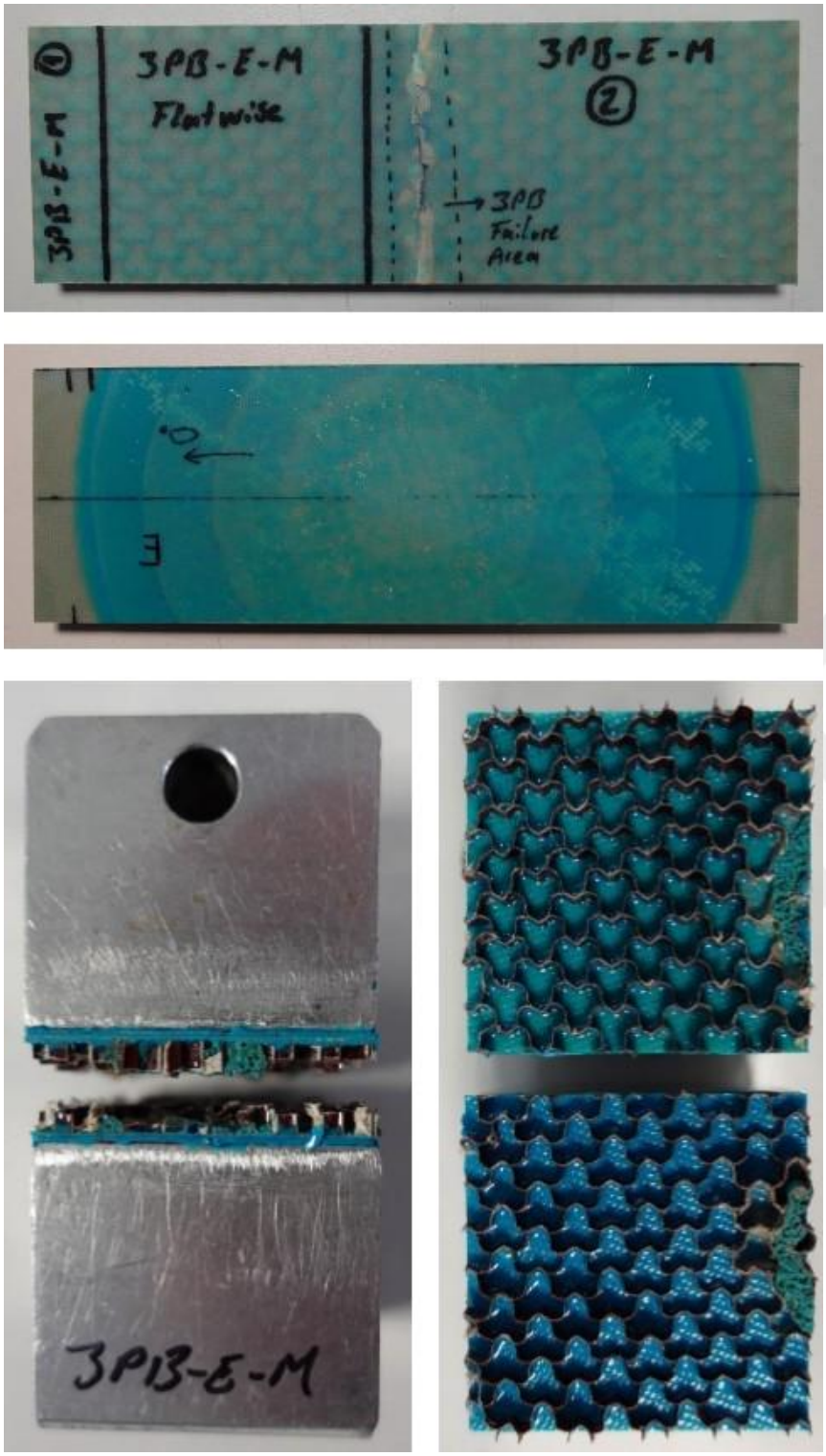
Resim 5.14. C kuponu sol parça sandviç yapı çekme testi



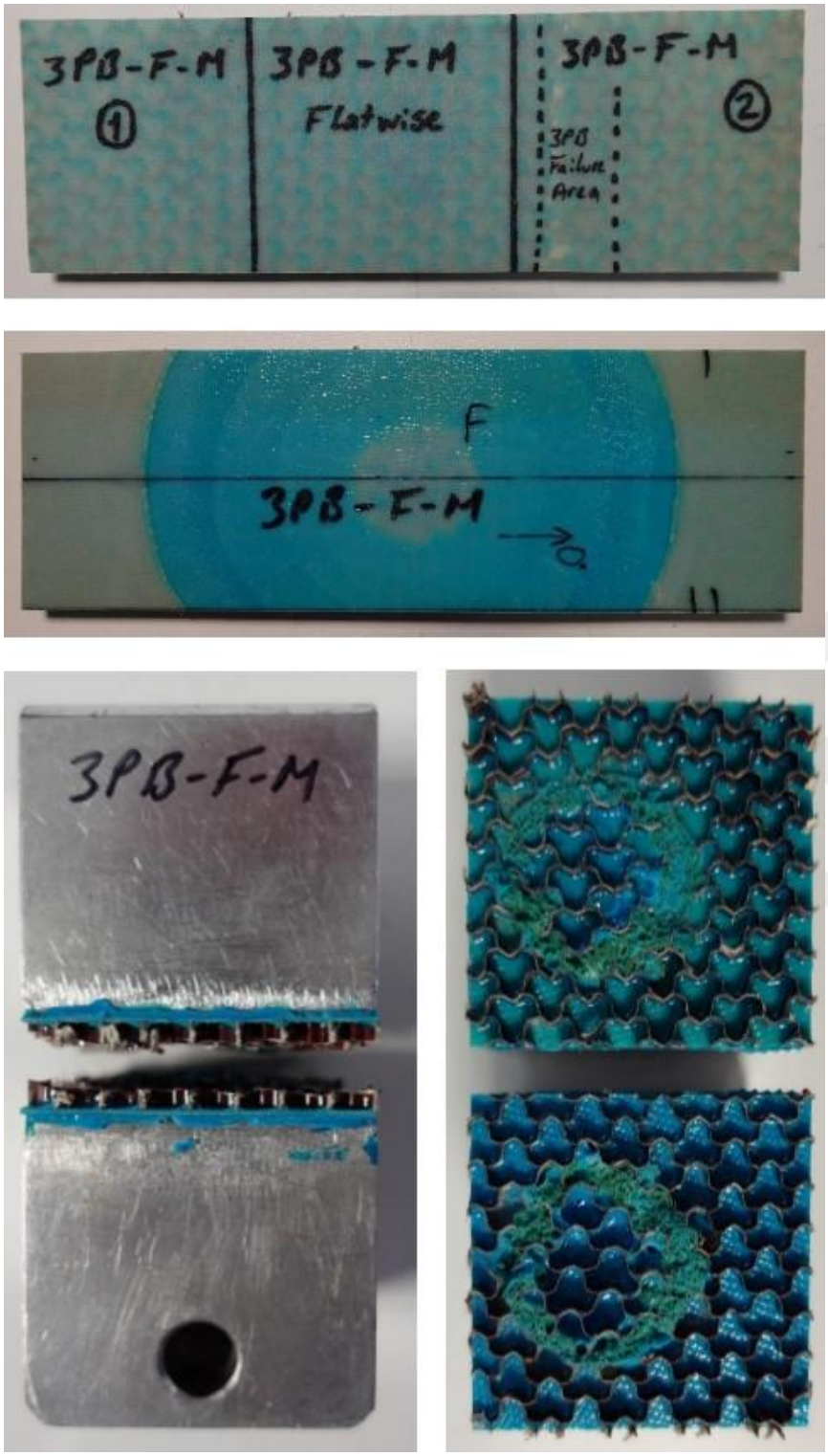
Resim 5.15. C kuponu orta parça sandviç yapı çekme testi



Resim 5.16. D kuponu sandviç yapı çekme testi



Resim 5.17. E kuponu sandviç yapı çekme testi



Resim 5.18. F kuponu sandviç yapı çekme testi



Resim 5.19. Referans kupon sandviç yapı çekme testi

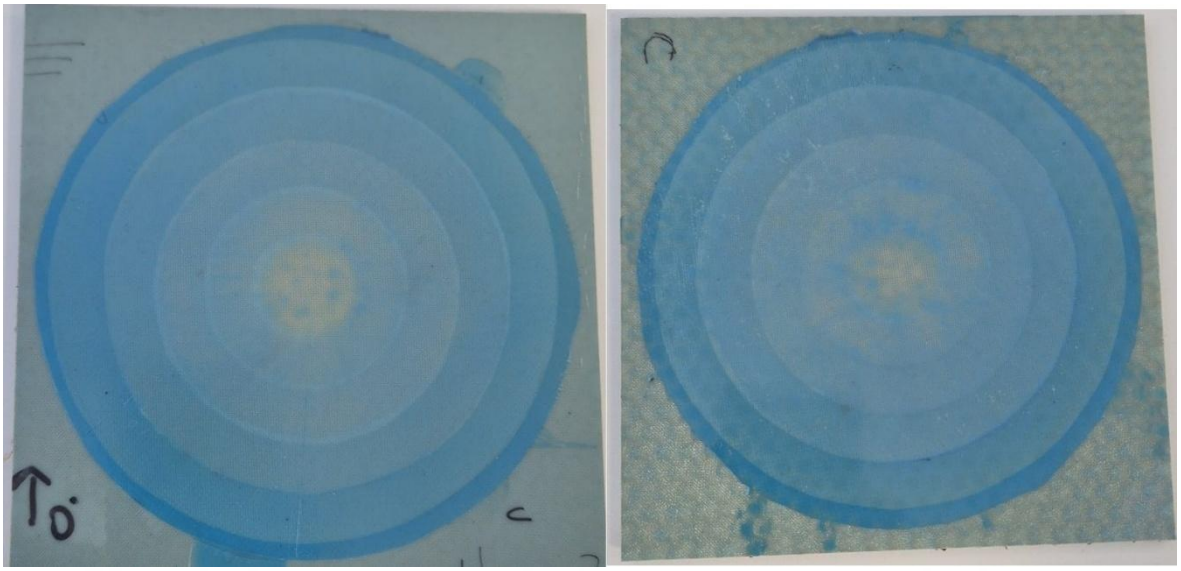
Çizelge 5.2. Sandviç yapı çekme testi sonuçları

Numune No	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Yük (MPa)	Hata Modu
3PB-A-M_FLW	50,10	50,09	8671	3,50	%95 Balpeteği %5 Filmyapıştıcı
3PB-B-M_FLW	50,05	49,96	8024	3,20	%70 Balpeteği, %30 Film yapıştıcı
3PB-C-L_FLW	49,97	46,28	7217	3,10	%100 Balpeteği
3PB-C-M_FLW	50.13	49.95	9038	3,60	%100 Balpeteği
3PB-D-M_FLW	50.05	50.04	8139	3,20	%80 Balpeteği, %20 Film yapıştıcı
3PB-E-M_FLW	50.04	50.00	9376	3,70	%100 Balpeteği
3PB-F-M_FLW	50.06	50.04	10845	4.30	%100 Balpeteği
3PB-G-L_FLW	50.10	50.00	8972	3.60	%100 Balpeteği

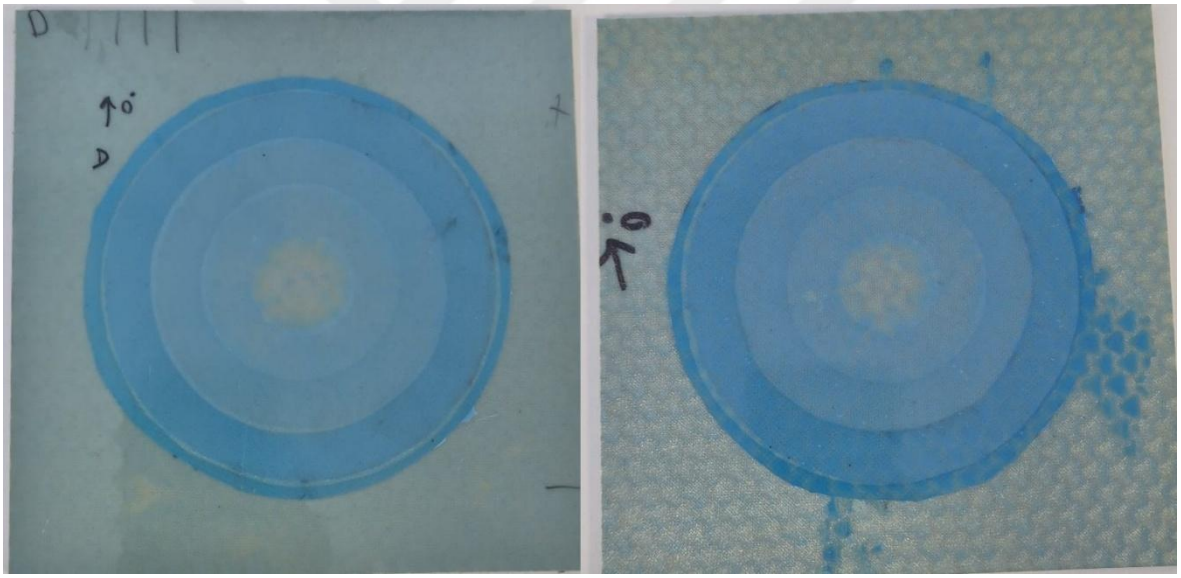
Çizelge 5.2'de test sonuçları sunulmuştur. Sonuçlarda NDI bulgularında poroz yapı tespit edilen B ve D kuponlarında istenilen hata modu sırasıyla %30 ve %20 oranında istenilen sonuçları veremediği gözlemlenmiştir.

5.5. Otoklav Kuponları

C, D, E ve F tamirleri otoklavda basınç altında üretilmiştir. Isı battaniye ile üretimde görsel muayene ile saptanan olumsuz sonuçlar ortadan kaldırılmıştır. Bu durumu teyit etmek ve iç yapıyı doğrulamak adına parçalar NDI işlemine tabi tutulmuştur.

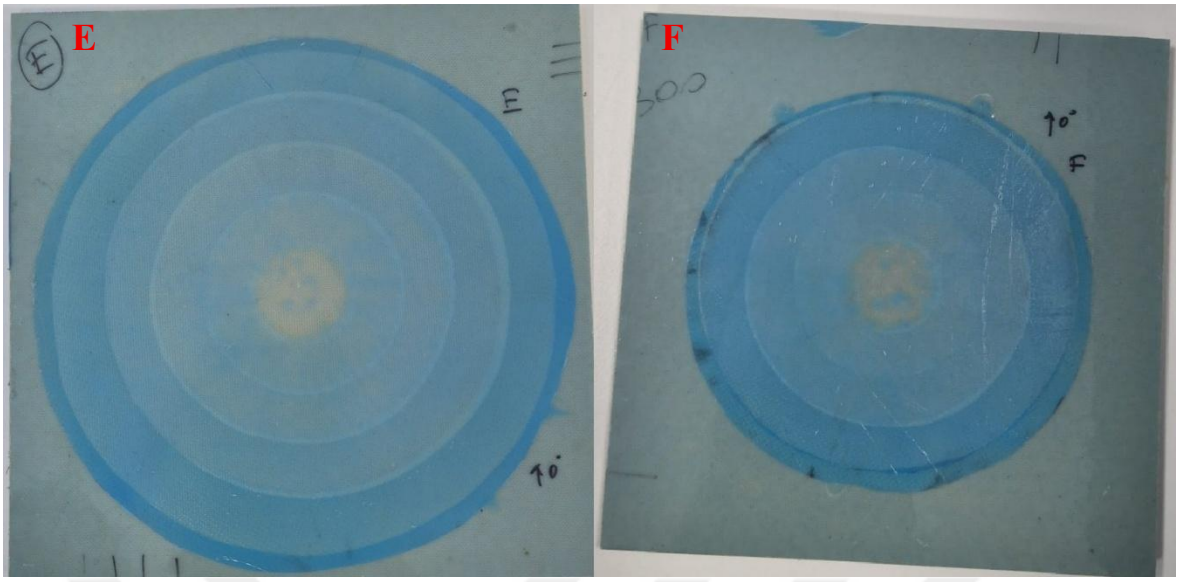


Resim 5.20. C kuponu otoklav tamir ön ve arka görüntüsü



Resim 5.21. D kuponu otoklav tamir ön ve arka görüntüsü

Resim 5.20’de C kuponunun ön ve arka görüntüsü, Resim 5.21’de D kuponunun ön ve arka görüntüsü, Resim 5.22’de de E ve kuponunun görüntüsü sunulmuştur.

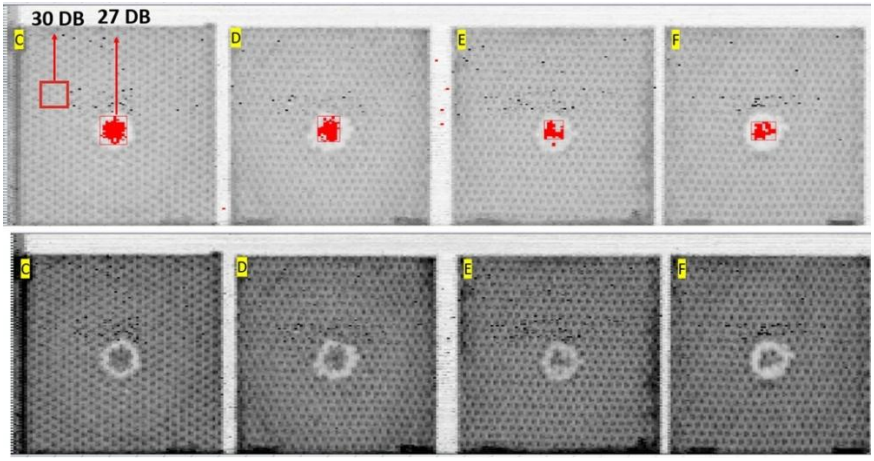


Resim 5.22. E ve F otoklav tamiri kuponları görüntüsü

RF kuponlarında daha önce gözlemlenen kar tanesi şeklindeki görüntü, bu çalışmada gerçekleştirilen dört farklı tamir senaryosuna ait kuponların hiçbirinde oluşmamıştır. Bunun yanı sıra, üretilen bu dört kuponun yüzey kalitesinin önceki kuponlara kıyasla belirgin şekilde iyileştiği gözlenmiştir. RF kuponlarından özellikle A kuponunda tespit edilen yüzey kuruluğu sorununun, söz konusu dört kuponda ortadan kalktığı belirlenmiştir.,

5.6. Ultrasonik Muayene Bulguları

Ultrasonik muayene sonucunda, RF kuponlarının aksine otoklav yöntemiyle üretilen C, D, E ve F tamir senaryolarına ait kuponlarda herhangi bir ultrasonik bulguya rastlanmamıştır. Ultrasonik test sonuçları, Şekil 5.23'te verilmiştir.

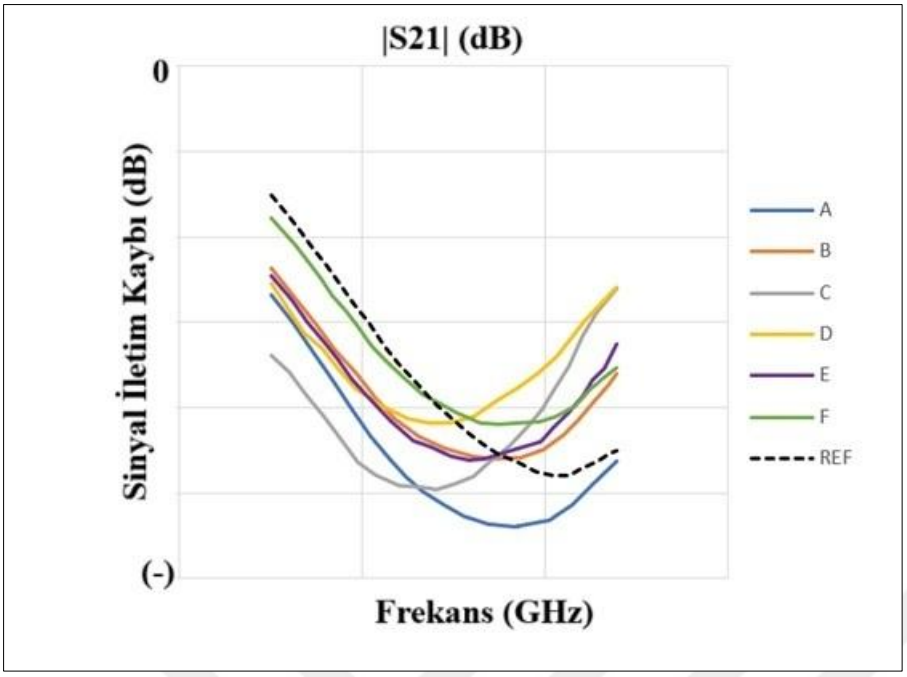


Resim 5.23. Otoklav tamiri tahribatsız muayene sonuçları

Test kuponlarının sağlam bölgesinde ölçüm alındığında 30 DB, hata beklenen bölgede ise ölçüm 27 DB gelmektedir. Bu sonuç ısı battaniye ile kürleme ile oluşan porositelerin otoklav tamirinde ortadan kaldırdığını göstermektedir.

5.7. RF Test Sonuçları

Kompozit radom kuponlarına uygulanan tamir işlemlerinin elektromanyetik performans üzerindeki etkileri, gerçekleştirilen RF testleri aracılığıyla değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, S11 ve S21 parametreleri temel alınarak kuponların yansıma ve iletim karakteristikleri incelenmiştir. Testler, Materyal ve Yöntem bölümünde belirtilen elektromanyetik ölçüm düzeneğinde gerçekleştirilmiş olup, her bir tamir senaryosuna ait kuponlar, aynı ölçülerdeki referans kuponlarla karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Ölçümler belirli bir frekans aralığında yapılmıştır. Elde edilen S-Parametre verileri, tamirli bölgelerin elektromanyetik geçirgenlik özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla karşılaştırmalı grafiksel olarak sunulmuş, frekans bağımlı davranışlar değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, farklı tamir senaryolarının RF performansları kıyaslanarak, özellikle ek katman kullanımı ve kürleme yöntemi gibi değişkenlerin etkisi irdelenmiştir.



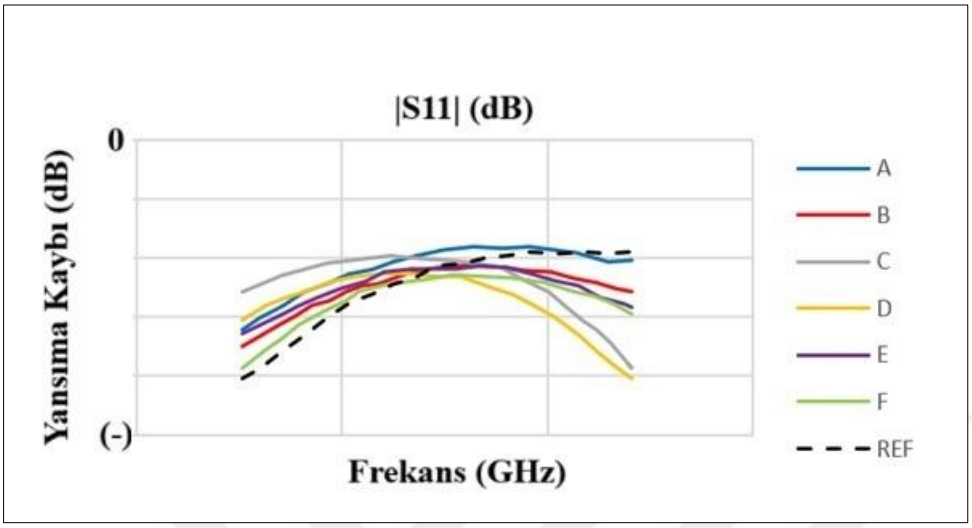
Şekil 5.3. RF kuponlar |S21| sonuçları

Yapılan RF testleri sonucunda elde edilen ve Şekil 5.3'te sunulan, S21 parametresi değerleri, referans (tamirsiz) kupon ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İlgili frekans bandı içerisinde en yüksek iletim kaybı A kuponunda gözlemlenmiştir. Bu durumun, yalnızca A kuponunda tespit edilen yüzey kuruluğu ve yüzey düzensizliklerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Diğer kuponlarda benzer görsel kusurlar bulunmamakla birlikte, A kuponunda kürleme koşullarının yetersizliği nedeniyle RF geçirgenliğini olumsuz etkileyen fiziksel kusurlar oluşmuştur.

C kuponu ise, RF performansı bakımından referans kupona nispeten yakın sonuçlar vermiş olsa da, belirgin düzeyde sinyal kaybı içermektedir. Bu farkın, C kuponuna uygulanan tamir işleminin karmaşıklığından ve ek katman ilavesinin hem kalıp yüzeyinde hem de torba yüzeyinde gerçekleştirilmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, C kuponunun eşleniği olan D kuponu ile kıyaslandığında daha zayıf bir performans sergilemesi, çok katmanlı tamir yapısının elektromanyetik geçirgenlik üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Ayrıca, B kuponunun A kuponuna, D kuponunun C kuponuna ve F kuponunun da E kuponuna kıyasla daha iyi performans göstermesi; ek katman ilavesinin iletim kaybı açısından olumsuz bir durum oluşturduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar,

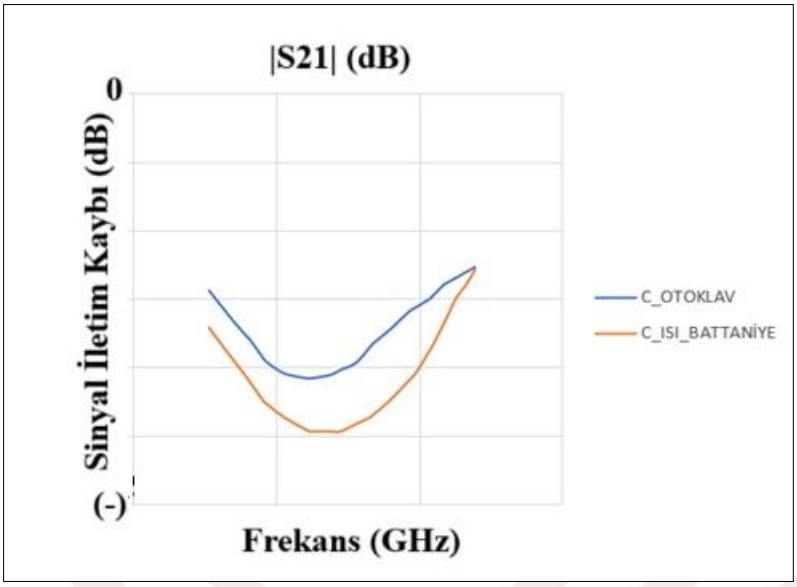
tamir bölgelerine uygulanan ek katların, elektromanyetik geçirgenliği sınırlayıcı bir etki yarattığını ve EM performansını düşürdüğünü kanıtlar niteliktedir.



Şekil 5.4. RF kuponlar |S11| sonuçları

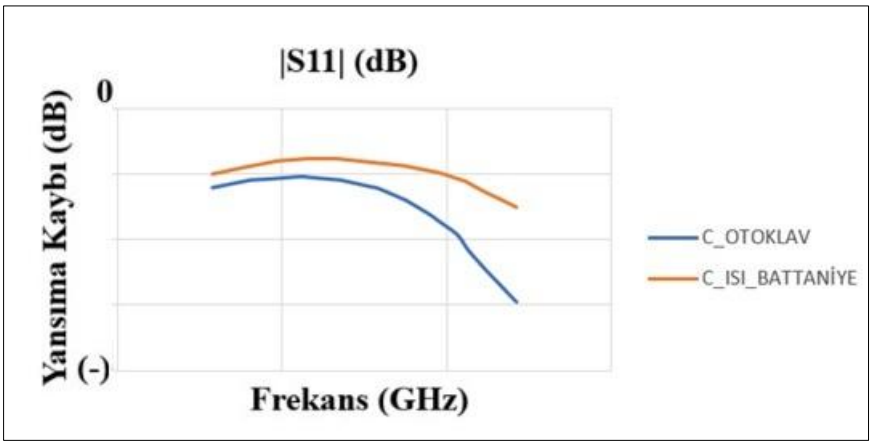
Şekil 5.4'te sunulan S11 parametresi açısından değerlendirildiğinde ise, elde edilen sonuçlar incelenen frekans bandı boyunca tüm kuponlar arasında anlamlı bir farklılık olmadığını göstermektedir. Ölçümler incelendiğinde, tüm kuponların yansıma kaybı değerleri birbirine oldukça yakın seyretmiş ve referans kuponla benzer bir eğilim göstermiştir. Bu durum, uygulanan farklı tamir senaryolarının ve yapısal varyasyonların, incelenen frekans aralığında elektromanyetik geri yansıma üzerinde belirgin bir etkiye neden olmadığını ortaya koymaktadır.

Otoklav tamiri yapılan kuponlar (C, D, E ve F), aynı tamir senaryolarına sahip vakum altında ısı battaniyesi ile kürlenmiş RF kuponlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırma ile, otoklav yöntemiyle elde edilen mikroyapısal bütünlüğün ve yüzey kalitesindeki iyileşmenin, elektromanyetik performansa nasıl yansıdığı incelenmiştir.



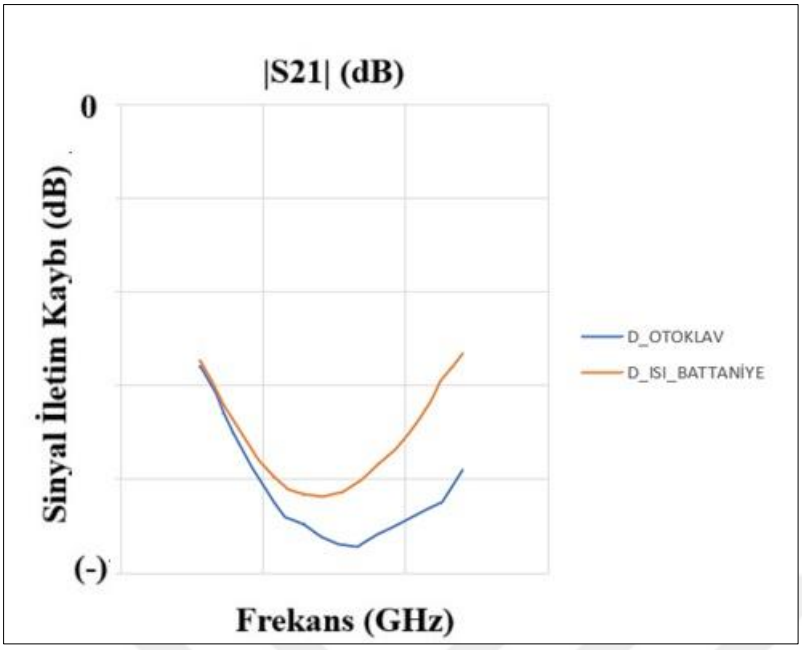
Şekil 5.5. C kuponu |S21| sonuçları

C kuponu özelinde değerlendirildiğinde, Şekil 5.5'te sunulan S21 parametresi açısından otoklav ile tamir edilmiş numunede, ilgili frekans aralığında anlamlı bir iyileşme gözlemlenmiştir. Isı battaniyesiyle kürlenen kupon ile karşılaştırıldığında, otoklav ortamında sağlanan kontrollü sıcaklık ve basınç koşullarının daha homojen bir kürleme sağladığı ve bu sayede iletim kaybını azalttığı anlaşılmaktadır.



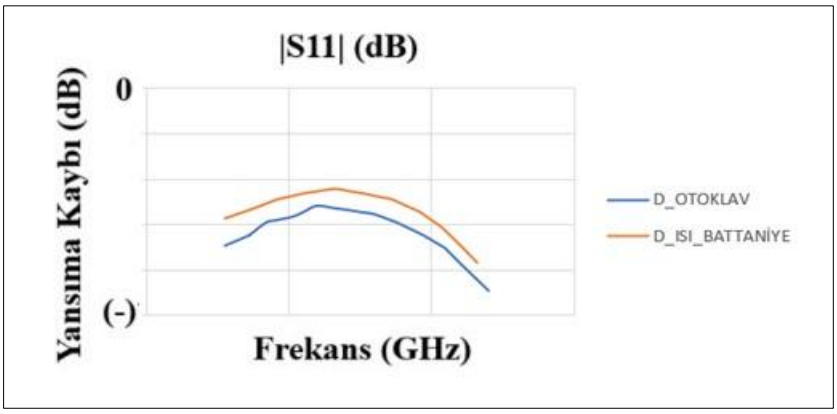
Şekil 5.6. C kuponu |S11| sonuçları

Şekil 5.6'da sonuçları verilen S11 parametresi açısından değerlendirildiğinde, otoklav ile tamir edilen C kuponu, ısı battaniyesiyle kürlenen eşdeğerine kıyasla daha düşük yansıma kaybı (daha negatif S11) sergilemiştir.



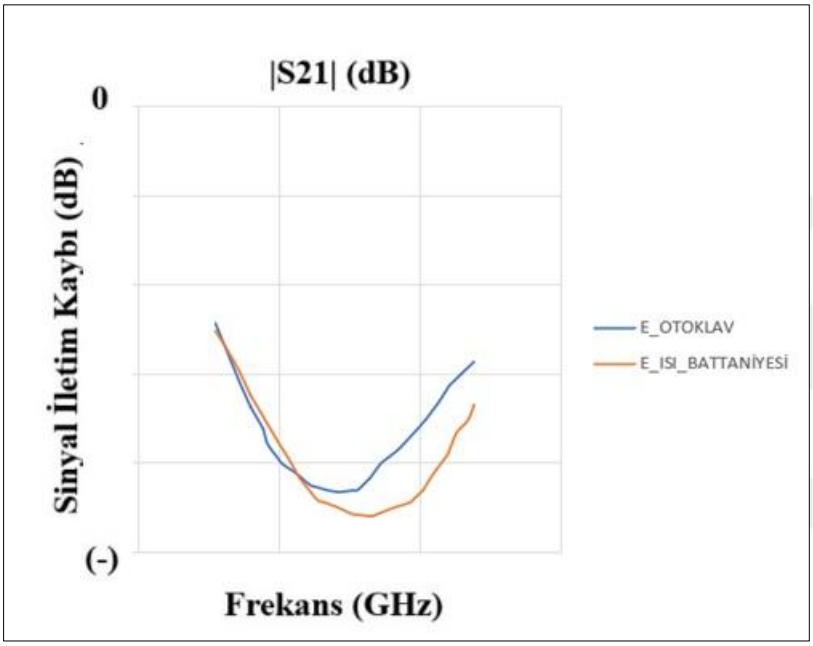
Şekil 5.7. D kuponu |S21| sonuçları

D kuponu özelinde yapılan ve sonuçları Şekil 5.7'de sunulan S21 değerlendirmelerinde, C kuponunun aksine, ısı battaniyesiyle kürlenen numunenin otoklavla tamir edilmiş numuneye göre daha iyi bir sinyal iletim performansı sergilediği gözlemlenmiştir. Frekans aralığı boyunca turuncu eğri ile gösterilen ısı battaniye ile tamir edilmiş kupon, daha düşük iletim kaybı değerleri sunarak elektromanyetik geçirgenlik açısından üstün bir performans ortaya koymuştur. Bu durumun, NDI bulgularında tespit edilen poroziteli yapı ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Özellikle ısı battaniyesiyle kürleme sırasında oluşan mikro düzeydeki hava boşluklarının, sinyal iletimi açısından lokal geçirgenlik yaratabileceği ve bu durumun ölçümlere olumlu yansımış olabileceği değerlendirilmektedir.



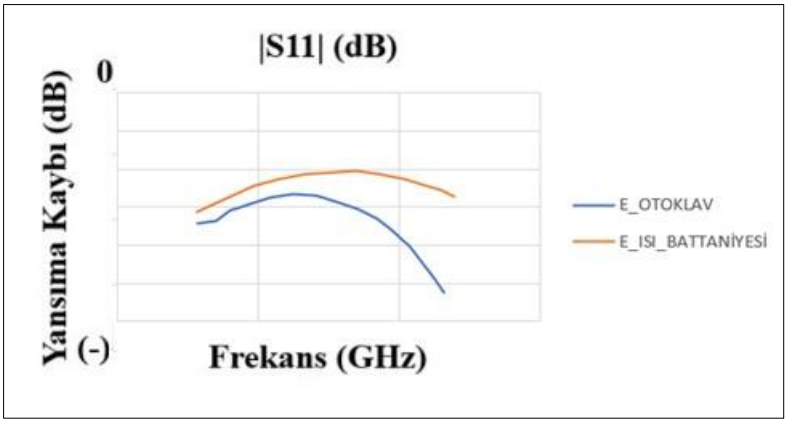
Şekil 5.8. D kuponu |S11| sonuçları

Şekil 5.8’de sonuçları verilen S11 parametresi açısından ise otoklav ile tamir edilen numune, frekans aralığı boyunca daha düşük geri yansıma değerleri göstermiştir. Ancak iki yöntemle elde edilen kuponlar arasındaki fark oldukça sınırlı olup, genel yansıma performansı benzer seviyelerde kalmıştır. D kuponu özelinde, S21 performansı açısından ısı battaniyesi daha iyi sonuç verirken, S11 açısından her iki yöntem de kabul edilebilir ve benzer performans ortaya koymuştur.



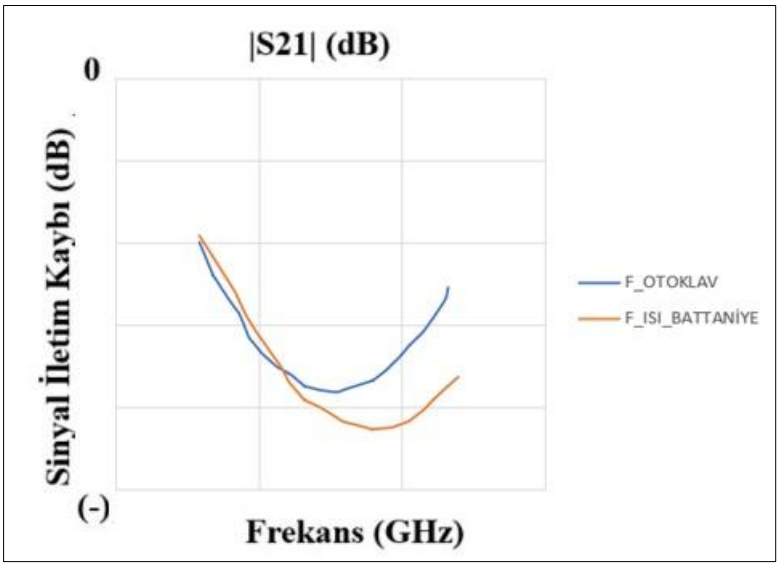
Şekil 5.9. E kuponu |S21| sonuçları

E kuponu değerlendirildiğinde, Şekil 5.9’da sonuçları sunulan S21 parametresi açısından otoklavla tamir edilen numunenin, ısı battaniyesiyle kürlenen eşdeğerine göre anlamlı düzeyde daha düşük sinyal iletim kaybı sergilediği gözlemlenmiştir. Frekans aralığı boyunca mavi eğriyle gösterilen otoklav kuponu, elektromanyetik iletim bakımından daha başarılı bir performans ortaya koymuştur. Bu bulgu, benzer yapıda olan C kuponuna ilişkin elde edilen sonuçları destekler niteliktedir. Her iki kuponda da otoklav yöntemiyle gerçekleştirilen kürleme işleminin, sinyal iletimine katkı sağlayan daha kararlı ve düzgün bir mikroyapı oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. Otoklav ortamında sağlanan kontrollü kürleme koşullarının, katmanlar arası yapısal uyumu artırarak elektromanyetik geçirgenliğe olumlu katkı sunduğu değerlendirilmektedir. Elde edilen RF verileri doğrultusunda, otoklav tamirinin bu bağlamda E kuponu üzerinde de performans avantajı sağladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.10. E kuponu |S11| sonuçları

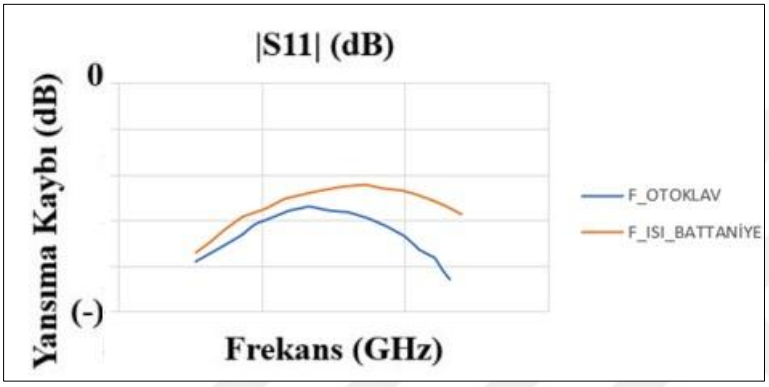
Sonuçları Şekil 5.10'da paylaşılan S11 parametresi açısından yapılan değerlendirmede, E kuponunda otoklavla tamir edilmiş numune, ısı battaniyesiyle kürlenen eşdeğerine kıyasla daha düşük geri yansıma seviyeleri sergilemiştir. Bu sonuç, C kuponunda elde edilen benzer gözlemlerle tutarlı olup, otoklav yönteminin yalnızca sinyal iletiminde değil, aynı zamanda sinyal yansımasının azaltılmasında da avantaj sağladığını ortaya koymaktadır. Her iki kuponda da otoklav ortamında elde edilen kontrollü kürleme koşullarının, elektromanyetik davranış üzerinde olumlu etkiler yarattığı ve RF performansını artırdığı değerlendirilmektedir.



Şekil 5.11. E kuponu |S21| sonuçları

Şekil 5.11'de sonuçları verilen F kuponuna ait S21 parametresi değerlendirildiğinde, otoklavla tamir edilen numunenin, ısı battaniyesiyle kürlenen eşdeğerine göre daha düşük

sinyal iletim kaybı sergilediği gözlemlenmiştir. Frekans aralığı boyunca mavi eğri ile gösterilen otoklav kuponu, daha yüksek elektromanyetik geçirgenlik performansı sunmuş ve sinyalin iletiminde daha az zayıflama göstermiştir. Bu durum, C ve E kuponlarında elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermekte olup, otoklav ortamında gerçekleştirilen kürleme işleminin RF iletim performansı üzerindeki pozitif etkisini bir kez daha doğrulamaktadır. Kontrollü sıcaklık ve basınç altında yapılan kürleme işleminin, kompozit yapıdaki katmanlar arası bütünlüğü artırarak sinyal iletimine katkı sağladığı ve iletim kaybını azalttığı değerlendirilmektedir.



Şekil 5.12. E kuponu |S11| sonuçları

Şekil 5.12'de sonuçları sunulan S11 parametresi açısından değerlendirildiğinde, F kuponunda otoklavla tamir edilen numune, ısı battaniyesiyle kürlenen eşdeğerine kıyasla frekans aralığı boyunca daha düşük geri yansıma değerleri sergilemiştir. Elde edilen bu sonuç, C ve E kuponlarında gözlemlenen eğilimle benzerlik göstermekte olup, otoklavla gerçekleştirilen tamirlerin yalnızca iletim kaybı açısından değil, geri yansıma performansı açısından da avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır. Frekans bandı boyunca daha negatif S11 değerleri, sinyalin girişten daha az yansıyarak sistem içinde daha verimli ilerlediğini göstermekte ve otoklav yöntemiyle elde edilen yapısal bütünlüğün elektromanyetik uyum üzerindeki olumlu etkisini desteklemektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kompozit radomlar, yapısal bütünlüğün yanı sıra radar sinyallerinin kesintisiz iletimi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, uygulanan tamirlerin yalnızca mekanik değil, elektromanyetik performansa etkileri de dikkatle değerlendirilmelidir. Bu çalışmada, kompozit radom panellerine uygulanan farklı tamir senaryolarının elektromanyetik performans üzerindeki etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirme kapsamında, tamir uygulamalarının elektromanyetik performansa etkileri kupon boyutlarında incelenmiştir. Kuponlar, quartz fiber takviyeli prepreg ve balpeteği malzeme kullanılarak, elle serim yöntemiyle hazırlanmış ve otoklavda kürlenerek elde edilmiştir. Belirlenen altı farklı hasar senaryosu, merdiven tipi hata açma metodu kullanılarak oluşturulmuş; ardından bu bölgeler, farklı kürleme yöntemleri olan ısı battaniyesi ve otoklav ile tamir edilmiştir. Hazırlanan tamirli kuponlar, mikroyapı incelemeleri, tahribatsız muayene yöntemleri ile değerlendirilmiş; ayrıca çeşitli mekanik ve elektromanyetik testlere tabi tutularak performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Isı battaniyesi ile tamir edilen kuponlarda, tahribatsız muayene yöntemleriyle çeşitli yapısal kusurlar tespit edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda kıyaslama yapılabilmesi amacıyla aynı tamir senaryoları otoklav ortamında da uygulanmış ve üretimler gerçekleştirilmiştir. Otoklavla yapılan tamirlerde, NDI sonuçlarında yüzey kalitesi ve iç yapı bütünlüğü açısından anlamlı iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Isı battaniyesi ile tamir edilen kuponlar, RF testlerinin ardından mikroyapısal incelemelere tabi tutulmuştur. Bu incelemelerde boşluk oluşumuna yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Tüm kuponlar incelenmiş olmakla birlikte, özellikle B ve D kuponlarında belirgin boşluk oluşumları tespit edilmiş ve bu bulgular NDI sonuçlarıyla doğrudan örtüşmüştür. İlgili kesitlerden elde edilen boşluk oranları, B kuponu için %3,7 ve D kuponu için %0,6 olarak ölçülmüştür. Bu değerler, literatürde ikincil yapılar için kabul edilebilir aralıkta yer alsa da yapısal bütünlük açısından olası etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla mekanik testlerle desteklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Mekanik testler kapsamında, ASTM C393 standardına uygun olarak üç nokta eğme testleri uygulanmıştır. Tamir uygulanmamış referans kuponlar da dâhil olmak üzere tüm kuponlar,

test sonucunda balpeteği yapıda kırıma uğramıştır. Bu hasar modu, ilgili standarda göre tek kabul edilebilir kırım şekli olarak tanımlandığından, gerçekleştirilen testler başarılı kabul edilmiştir. Bu bağlamda, uygulanan tamir işlemlerinin kuponların yapısal bütünlüğünü koruduğu sonucuna varılmıştır.

İkincil mekanik değerlendirme olarak, kuponlar ASTM C297 standardına uygun şekilde bal peteği çekme testine tabi tutulmuştur. Bu testte kabul edilen hasar modu, balpeteği yapının iç kısmından kaynaklanan kırılmalar olup, yapışma yüzeylerinde herhangi bir ayrılma veya yapışkan kaynaklı hasar bulunmaması gerekmektedir. Elde edilen test sonuçları, NDI ve mikroyapı analizlerini destekler nitelikte olup, özellikle ısı battaniyesi ile tamir edilmiş B ve D kuponlarında istenmeyen hasar modlarının gözlendiği belirlenmiştir. Bu kuponlarda sırasıyla %70 ve %80 oranında balpeteğinden kırılma gerçekleşmiş; kalan %30 ve %20'lik kısımlarda ise yapışma yüzeylerinde hasar tespit edilmiştir. Bu durum, söz konusu kuponlarda daha önce gözlemlenen yüzey kuruluğu ve kar tanesi benzeri porozite oluşumlarının yapısal dayanımı zayıflatabileceğini göstermektedir. Elde edilen bu bulgular, servis ortamlarında TTU gibi hassas tahribatsız muayene yöntemlerinin uygulanamaması durumunda, A-scan, tap test ve görsel muayene gibi saha uygulamalarının tercih edilerek yapısal kontrol sağlanabileceğini ve bu tip tamir bölgeleri için periyodik kontrollerin önerilmesinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

A, C, E ve F kuponları hem üç nokta eğme testinden hem de balpeteği çekme testinden standarda uygun şekilde başarıyla geçmişlerdir. Bu kuponlarda gözlemlenen kabul edilebilir hasar modları ve başarılı mekanik performans, çalışmada uygulanan tamir yöntemlerinin sahada kullanım açısından da geçerli bir yöntem olduğunu desteklemektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen RF testleri sonucunda, elektromanyetik performans açısından tamir senaryolarının etkileri anlamlı şekilde ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, özellikle tamir bölgesine uygulanan ek katmanların sinyal iletim kaybını artırarak elektromanyetik performansı olumsuz etkilediğini göstermektedir. A kuponunda, referans kupon ve diğer tamirli kuponlarla kıyaslandığında, yüzeyde gözlemlenen kurulukların S21 parametresi üzerinde belirgin düzeyde performans düşüklüğüne yol açtığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde hem kalıp hem de torba yüzeyine ek katman uygulanarak en fazla işlem gören C kuponu da diğer kuponlara kıyasla daha düşük elektromanyetik performans sergilemiş; bu

durum, ek kat kullanımının iletim kaybı üzerindeki olumsuz etkisini doğrular nitelikte olmuştur.

Çalışmada incelenen C, D, E ve F kuponları değerlendirildiğinde, ısı battaniyesi yerine otoklavla yapılan tamirlerin elektromanyetik performans açısından daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle C, E ve F kuponlarında, otoklavla tamir edilen numuneler daha düşük iletim kaybı (S21) sergileyerek sinyal geçirgenliği bakımından üstün bir performans ortaya koymuştur. Ancak D kuponunda, ısı battaniyesi ile tamir edilen numunenin belirli frekans aralığında daha iyi iletim sağladığı görülmüştür. Bu durumun, NDI bulgularında da tespit edilen tamir bölgesindeki poroziteli yapıyla ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Bu gözlem, porozitenin bazı durumlarda lokal geçirgenlik sağlayarak elektromanyetik iletimi olumlu etkileyebileceğini, ancak bu etkinin dikkatli şekilde yorumlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ancak bu gözlemin, yalnızca elektromanyetik iletim bağlamında sınırlı bir avantaj sağladığı unutulmamalıdır. Zira poroziteli yapıların kompozit malzemelerde istenmeyen bir durum olduğu ve yapısal bütünlüğü olumsuz etkilediği bilinmektedir. Mekanik performans açısından değerlendirildiğinde, bu tür boşluk oluşumları hem balpeteği yapı ile yüzeyler arasındaki yapışmayı zayıflatmakta hem de yerel dayanım kayıplarına yol açabilmektedir.

İleride gerçekleştirilecek benzer araştırmalar için dikkate alınabilecek öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Gerçek radom geometrisine uygun, kavisli yüzeylerde uygulanacak tamir senaryolarının üretimi ve RF performans testlerinin gerçekleştirilmesi.
- Wet lay-up yöntemiyle yapılan tamir uygulamalarının yapısal ve elektromanyetik performans üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi.
- Quartz fiber esaslı yapıların üzerine cam fiber gibi alternatif/hibrid takviye katmanları ile yapılan tamirlerin RF ve mekanik performansa etkilerinin karşılaştırılması.
- Scarf tipi tamir geometrisinin, özellikle farklı açılar ve katman dizilimleriyle, RF geçirgenlik ve yansıma davranışı üzerindeki etkilerinin detaylı olarak incelenmesi.
- Farklı tamir yöntemlerinin (patch, step, scarf vb.) karşılaştırmalı olarak mekanik dayanım performanslarının geniş bir test matrisi üzerinden analiz edilmesi.

KAYNAKLAR

1. Di Sante, R. (2015). Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications. *Sensors*, 15(8), 18666-18713.

2. Rafi, H.A. (2024). Impact of composıte materials on aircraft weight reduction, fuel efficiency, and performance in commercial aviation. *International Journal of Mechanical Engineering*, 4(01), 21-35.

3. Gholizadeh, S. (2019). A review of impact behaviour in composite materials. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 7(3), 2320-2092.

4. Pei, Y., Zeng, S.M., Zhou, L.C., Zhang, R.B., and Xu, K.X. (2012). Electromagnetic optimal design for dual-band radome wall with alternating layers of staggered composite and kagome lattice structure. *Progress In Electromagnetics Research*, 122, 437-452.

5. Zhou, L., Wang, P., Pei, Y., Zeng, A., Tang, L., Liu, Z., Liu, Y., Jiang, Z., and Fang, D. (2017). Design and characterization for dual-band and multi-band A-sandwich composite radome walls. *Composites Science and Technology*, 149, 28-33.

6. Soumya, V.M., Navaneetha, S., Reddy, A.N., and Kumar, J.J. (2017). Design considerations of radomes: a review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8(3), 42-48.

7. İnternet: *EverythingRF*. URL: https://www.everythingrf.com/, Son Erişim Tarihi: 15.06.2025.

8. Campbell, F.C. (2010). *Structural composite materials* (First Edition). USA: ASM International, 50-60.

9. Wu, Z., Li, N., Han, J., Wang, C., Yuan, K., Zeng, Q., Wang, J., and Jian, X., (2018). Low-viscosity and soluble phthalonitrile resin with improved thermostability for organic wave-transparent composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(13), 45976.

10. Zu, Y., Hang, F., Chen, D., Zang, L., Wang, J., and Jian, X., (2020). Wave-transparent composites based on phthalonitrile resins with commendable thermal properties and dielectric performance. *Polymer*, 198, 122490.

11. Bunsell, A.R. (2009). *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres* (First Edition). UK: Woodhead Publishing, 42-57.

12. Hejna, A., Barczewski, M., Kosmela, P., Mysiukiewicz, O., and Saeb, M.R. (2024). Soil burial degradation of chemically compatibilized poly (butylene adipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch/poly (ε-caprolactone)/cellulose biocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282, 136801.

13. Gholizadeh, S., and S. Gholizadeh. (2022). Impact behaviours and non-destructive testing (NDT) methods in carbon fiber composites in aerospace industry: a review. *Authorea Preprints*, 1-33.

14. Heslehurst, R.B. (2014). *Defects and damage in composite materials and structures* (First Edition). USA: CRC press, 19.

15. Polimeno, U., and Meo, M. (2009). Detecting barely visible impact damage detection on aircraft composites structures. *Composite Structures*, 91(4), 398-402.

16. Domingo, R. (2018). *Aviation Maintenance Technician Handbook—Airframe.* USA: Department of Transportation, 10-15.

17. Muda, M.K.H., and Mustapha, F. (2018). Composite patch repair using natural fiber for aerospace applications, sustainable composites for aerospace applications, *Sustainable Composites For Aerospace Applications*, 171-209.

18. Jefferson, A.J., Arumugam, V., and Dhakal, H.N., (2018). *Repair of polymer composites: methodology, techniques, and challenges* (First Edition). UK: Woodhead Publishing, 25-37.

19. Mallett, K. (1999). *Composite repair.* USA: Hexcel Composites Publication, 20-41.

20. İnternet: *Heatcon Composite System Catalog*. URL: https://www.heatcon.com, Son Erişim Tarihi: 11.06.2025.

21. Sathe, R., and Pandhare, R. (2024). *Investigation into Different Materials for Designing a Radome Wall for Airborne Applications*. in IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), 9-13 December, Hyderabad, India.

22. Satria, D., Christiyono, Y., and Zahra, A.A. Radome Analysis Techniques, J*urusan Teknik Elektro Fakultas Teknik*, 12-25.

23. Ahmed, Z.M., Nasir, M.A., Iqbal, Z., and Aamir, M.T. (2023). *Electro-Mechanical Behavior of Hybrid Composite Sandwich Radome: A-Type Radome*. in 20th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), 22-25 August, Bhurban, Pakistan.

24. Nair, R.U., and Jha, R.M. (2014). Electromagnetic design and performance analysis of airborne radomes: Trends and perspectives [antenna applications corner]. *Antennas and Propagation Magazine*, 56(4), 276-298.

25. Shangji, L., Huiyuan, Z., Chang, D., and Lizhong, S. (2016). *Electrical properties analysis of conical radome*. in IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB), 16-19 October, Nanjing, China.

26. Russo, O., Colasante, A., Bellaveglia, G., Maggio, F., Marcellini, L., Scialino, L., Rolo, L., Angevain, J.C., and Midthassel, R. (2012). *State-of-the-art materials for KU and KA band mobile satellite antenna radomes.* in Telecommunications Ground Segments Workshop, 3-5 October, Noordwijk, Netherlands.

27. Kim, P.C., Seo, I.S., and Kim, G.H. (2008). Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surfaces. *Composites Science and Technology*, 68(9), 2163-2170.

28. Bendemra, H., Compston, P., and Crothers, P.J. (2015). Optimisation study of tapered scarf and stepped-lap joints in composite repair patches. *Composite Structures*, 130, 1-8.

29. Changyue, W., Hongrui, Z., and Su, J. (2017). Experimental Study on Rapid Repair of Foam Sandwich Composites for Radome with Low-velocity Impact Damage. *Science Discovery*, 5(4), 251-256.

30. Xing, R., Wang, F., Yang, Y., and Li, G. (2024). Optimization of Composite Material Repair Patch Shape Based on Strength Analysis. *Applied Sciences*, 14(11), 4397.

31. Choi, I., Kim, J.G., and Seo, I.S. (2011). Effects of a damaged composite face to the electromagnetic wave transmission characteristics of low-observable radomes. *Composite structures*, 93(11), 2740-2747.

32. Liu, B., Feng, W., Yan, R., and Xie, W. (2016). Experiment and design methods of composite scarf repair for primary-load bearing structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88, 27-38.

33. Xu, W., Duan, B.Y., Li, P., and Qiu, Y. (2017). Study on the electromagnetic performance of inhomogeneous radomes for airborne applications—Part II: The overall comparison with variable thickness radomes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* 65(6), 3175-3183.

34. Muneer Ahmed, Z., Nasir, M.A., Iqbal, Z., and Aamir, M.T. (2024). Experimental investigation and simulation of electro-mechanical behaviour of hybrid sandwich composite radomes for aerospace applications. *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 11(2), 401-412.

35. Yang, X., Zhang, M., Zhan, L., Ma, B., Wu, X., Liu, C., and Xiang, H. (2024). Effects of Curing Defects in Adhesive Layers on Carbon Fiber–Quartz Fiber Bonded Joint Performance. *Polymers*, 16(10), 1406.

36. Park, H. and Kong C. (2011). A study on low velocity impact damage evaluation and repair technique of small aircraft composite structure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(9), 1179-1188.

37. Liu, L., Zhang, B.M., Wang, D.F., and Wu, Z.J. (2006). Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. *Composite structures*, 73(3), 303-309.

38. İnternet: Lacovara, B. *Why out of autoclave processing is good for the composites industry.* URL: https://www.compositesworld.com/columns/why-out-of-autoclave-processing-is-good-for-the-composites-industry, Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.

39. Xueshu, L. and Fei, C. (2016). A review of void formation and its effects on the mechanical performance of carbon fiber reinforced plastic. *Engineering Transactions*, 64(1), 33–51.

40. Standard C393. (2016). *Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure.* ASTM International.

41. International, A. (2016). *ASTM C297/C297M-16: Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*. ASTM International.



Gazili olmak ayrıcalıktır