
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

MONOLİTİK KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN GERDİRİLMİŞ BAKIR FOLYO KULLANILARAK YILDIRIM ÇARPMASINA KARŞI KORUNMASI

Eren Can KİÇECİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2020

Eren Can KİÇECİ tarafından hazırlanan "MONOLİTİK KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN GERDİRİLMİŞ BAKIR FOLYO KULLANILARAK YILDIRIM ÇARPMASINA KARŞI KORUNMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Elmas SALAMCI

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Başkan: Prof. Dr. Yusuf USTA

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Üye: Doç. Dr. Şener KARABULUT

Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Tez Savunma Tarihi: 04/06/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

……..
Eren Can KİÇECİ
04/06/2020

MONOLİTİK KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN GERDİRİLMİŞ BAKIR FOLYO KULLANILARAK YILDIRIM ÇARPMASINA KARŞI KORUNMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Eren Can KİÇECİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2020

ÖZET

Kompozit malzemeler, üstün özgül modül ve özgül mukavemet özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv ve diğer taşımacılık endüstrilerinde yaygın bir uygulamaya sahiptir. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler, uçak yapıları için kullanılan geleneksel metalik malzemelerle karşılaştırıldığında çok daha düşük bir elektrik iletkenliğine sahip olduğundan, kompozitler yıldırım çarpması hasarlarına karşı daha savunmasızdır. Kompozit yapıları yıldırım çarpmalarına karşı korumak için birçok yöntem mevcuttur, ancak korunan yapıların ağırlığındaki artış nedeniyle yakıt verimliliğini olumsuz yönde etkilerler. Bu çalışmada, monolitik karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin yıldırım çarpmalarına karşı koruma yöntemlerinin ve kompozit malzeme ile ilgili parametrelerin davranışını anlamak için gerdirilmiş bakır folyo kullanılmıştır. Yapay yıldırımlar kullanılarak; kompozit kalınlığının, karbon kumaş tipinin, gerdirilmiş bakır folyo kalınlığının etkisi yıldırım hasarları ve numunelerin arka yüzey sıcaklık dağılımları karşılaştırılarak araştırılmıştır.

Bilim Kodu	:	91417
Anahtar Kelimeler	:	Yıldırımdan koruma, Monolitik karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler, Gerdirilmiş bakır folyo
Sayfa Adedi	:	115
Danışman	:	Doç. Dr. Elmas SALAMCI

LIGHTNING PROTECTION OF MONOLITHIC CARBON FIBER REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITES BY USING EXPANDED COPPER FOIL

(M. Sc. Thesis)

Eren Can KİÇECİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2020

ABSTRACT

Composite materials have an extensive application in aerospace, automotive, and other transportation industries, due to the superior specific stiffness and strength properties. Since carbon fiber reinforced polymer composites have a much lower electrical conductivity as compared to traditional metallic materials utilized for aircraft structures, composites are more vulnerable to lightning strike damages. There are many methods to protect composite structures against lightning strikes however they have negatively impact on the fuel efficiency due to increase in weight of protected parts and components. In this study, expanded copper foil is used as a protection method for monolithic carbon fiber reinforced polymer composites against lightning strikes to understand behavior of protection methods and other material related parameters. By conducting artificial lightning strikes; effect of composite thickness, type of carbon fabric, expanded copper foil thickness are investigated comparing lightning damages and back temperature distribution of specimens.

Science Code	:	91417
Key Words	:	Lightning protection, Monolithic carbon fiber reinforced polymer matrix composites, Expanded copper foil
Page Number	:	115
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Elmas SALAMCI

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında ve yüksek lisans eğitimim boyunca, değerli yardımlarını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Elmas SALAMCI'ya, tüm yüksek lisans çalışmalarım sırasında desteğini her zaman yanımda hissettiğim değerli çalışma arkadaşlarım Serkan DEHNELİLER, Nizamettin Tanay DAĞDEMİR'e ve Kazım TEKKANAT'a, sevgi ve yardımlarıyla her zaman yanımda olan, bu çalışmanın asıl sahibi sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım. Özellikle eşim Pelin USLU KİÇECİ'ye, sonsuz sevgi ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan ve bunun için imkan ve olanaklarını sunarak bana destek olan TUSAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xviii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. Yıldırımın Uçağa Çarpma Olasılığı ve Yapısal Bütünlüğe Etkileri 5

2.2. Uçakla Yıldırım Etkileşimi 7

2.3. Uçak Yapılarında Yıldırım Hasarı 12

2.4. Yıldırım Dalga Şekilleri ve Etki Bölgelerinin Belirlenmesi 14

2.5. Yıldırım Regülasyonları ve Havacılık Firmalarının İlgili Uygulamaları 20

2.6. Kompozitleri Yıldırım Çarpmasından Koruma Çalışmaları 26

3. DENEYSEL PROSEDÜR 35

3.1. Senaryoların Belirlenmesi 35

3.2. Elle Serim 40

3.3. Kürleme 44

3.4. İlave Üretim Aşamaları ve Muayene 46

3.5. Test Düzeneği ve Testin İcrası 50

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 57

Sayfa

4.1. Yıldırım Çarpması Kaynaklı Hasar Tipleri ve Mekanizmaları 57

4.1.1. Elyaf kırılması 58

4.1.2. Katman kalkması 63

4.1.3. Yüzey erozyonu 68

4.1.4. Delaminasyon 71

4.1.5. Termal izdüşüm 75

4.2. Kalınlık Etkisi 78

4.2.1. Kalınlık - delaminasyon alanı ilişkisi 78

4.2.2. Kalınlık - yüzey hasar alanı ilişkisi 82

4.2.3. Kalınlık - hasar derinliği ilişkisi 86

4.2.4. Kalınlık - arka yüzey sıcaklığı ilişkisi 89

4.3. Koruma Katmanı Etkisi 92

4.3.1. ECF - delaminasyon alanı ilişkisi 92

4.3.2. ECF – yüzey hasar alanı ilişkisi 94

4.3.3. ECF – hasar derinliği ilişkisi 96

4.3.4. ECF – arka yüzey sıcaklığı ilişkisi 98

4.4. Yıldırım Bölgesi Etkisi 100

4.4.1. Yıldırım bölgesi - delaminasyon alanı ilişkisi 101

4.4.2. Yıldırım bölgesi – yüzey hasar alanı ilişkisi 101

4.4.3. Yıldırım bölgesi - hasar derinliği ilişkisi 102

4.4.4. Yıldırım bölgesi – arka yüzey sıcaklığı ilişkisi 103

4.5. Kumaş Tipi Etkisi 104

4.5.1. Kumaş tipi - delaminasyon alanı ilişkisi 104

4.5.2. Kumaş tipi – yüzey erozyonu alanı ilişkisi 105

Sayfa

4.5.3. Kumaş tipi - hasar derinliği ilişkisi 106

4.5.4. Kumaş tipi – arka yüzey sıcaklığı ilişkisi 107

4. SONUÇ VE ÖNERİLER 109

KAYNAKLAR 111

ÖZGEÇMİŞ 115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. ABD ticari uçaklarının maruz kaldığı yıldırım çarpma olayları 5

Çizelge 2.2. Dolaylı yıldırım etkilerinin testi için kullanılan akım bileşenlerinin tanımları 18

Çizelge 2.3. Yıldırım bölgelerinin tanımları 20

Çizelge 2.4. Doğrudan yıldırım etkilerinin çalışılması için yıldırım bölgeleri ve ilgili test akımı bileşenleri 20

Çizelge 2.5. Yıldırım çarpmaları için tipik hasar tolerans kriterleri 22

Çizelge 2.6. Kompozitler için YKK yöntemleri 23

Çizelge 3.1. Karbon elyaf takviyeli polimer reçine emdirilmiş M21 kumaşlarının fiziksel özellikleri 35

Çizelge 3.2. Gerdirilmiş bakır folyoların fiziksel ve elektriksel özellikleri 36

Çizelge 3.3. Numuneler ve özellikleri 38

Çizelge 4.1. Bazı malzemelerin termal iletkenlikleri 92

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Kompozit yapıların havacılık sektöründe kullanımının yıllara göre artışı 1

Şekil 1.2. Boeing 787 kompozit ve geleneksel metallik malzeme dağılımı 2

Şekil 2.1. İrtifaya göre uçakların maruz kaldıkları yıldırım çarpması vakaları 6

Şekil 2.2. Lufthansa'nın kompozit parçalarının tecrübe ettiği hasarlar 7

Şekil 2.3. Uçak ve yüklü bölgeler arasındaki yıldırım tetikleme mekanizmaları 9

Şekil 2.4. Bir negatif yıldırım akım dalga biçiminin modeli 10

Şekil 2.5. Süpürülme kanalı bağlantı noktalarının karakteristik patikası 11

Şekil 2.6. C-160 uçağında kayıt edilen yıldırım verileri; (a) ön üst gövde elektrik alanı, (b) burunda akım verisi..... 15

Şekil 2.7. Doğrudan yıldırım testleri için A, B, C ve D dalga form bileşenleri..... 16

Şekil 2.8. Tipik büyük bir ticari taşıma uçağının yıldırım bölgeleri..... 19

Şekil 2.9. Birincil uçak yapısalları için temel tasarım kriterleri 21

Şekil 2.10. (a) Makinada dokuma ağ üretimi. (b) Dokuma ağ tasarımı (c) Dokuma metal ağın yan kesitinin görünümü (d) Metal folyoda kesik atma işlemi (e) Delik açılmış metalik ağ görünümü (f) Gerdirilmiş metal ağın yan kesitinin görünümü 24

Şekil 2.11. Hasar boyutu ve verilen enerji arasındaki değişim..... 27

Şekil 2.12. Çok eksenli kumaş şematiği (b) Çok eksenli kuru karbon elyaf kumaş fotoğrafı..... 29

Şekil 2.13. Bakır katmanın kalınlığına göre ayrışan KETPK hacmi 30

Şekil 2.14. Numune kalınlığı ve maksimum hasar derinliği ilişkisi (a), numune kalınlığı ve ortalama hasar alanlar arasında ilişki..... 31

Şekil 2.15. Boyalı KETPK yapılarda yıldırım çarpması kaynaklı hasar oluşma süreci 32

Şekil 2.16. Numune yüzeyinde ölçülen x-yönünde sıcaklık değerleri (a), yıldırım çarpması anında numune genel görünüm (b)..... 33

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.17. 400 amperlik akım süresine karşı karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin arka yüzeyinde sıcaklık değişimi 33

Şekil 3.1. Bir numune için örnek serim dizilimi 42

Şekil 3.2. Katmanlar için kullanılan serim rozeti ve yönleri 43

Şekil 3.3. Kürleme Döngüsü 46

Şekil 3.4. Net numune geometrisi ve boyasız bölgeler 47

Şekil 3.5. Numune 4 üzerine uygulanan A akım bileşeni 56

Şekil 3.6. Numune 4 üzerine uygulanan B ve C akım bileşenleri 56

Şekil 4.1. Korumasız - Bölge 3 numuneleri (3 ve 11): kalınlığa karşı delaminasyon alanı 79

Şekil 4.2. 73 $g/m2$ ECF korumalı numuneler (1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16): kalınlığa karşı delaminasyon alanı 80

Şekil 4.3. 195 $g/m2$ ECF korumalı numuneler (4, 12, ve 15): kalınlığa karşı delaminasyon alanı 80

Şekil 4.4. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21 ve 22): kalınlığa karşı delaminasyon alanı 81

Şekil 4.5. Korumasız - Bölge 3 numuneleri (3 ve 11): kalınlığa karşı yüzey hasar alanı 82

Şekil 4.6. 73 $g/m2$ ECF korumalı numuneler (1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16): kalınlığa karşı yüzey hasar alanı 83

Şekil 4.7. 195 $g/m2$ ECF korumalı numuneler (4, 12 ve 15): kalınlığa karşı yüzey hasar alanı 84

Şekil 4.8. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21 ve 22): kalınlığa karşı yüzey hasar alanı 85

Şekil 4.9. 73 $g/m2$ korumalı numuneler (1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16): kalınlığa karşı hasar derinliği 86

Şekil 4.10. 195 $g/m2$ ECF korumalı numuneler (4, 12 ve 15): kalınlığa karşı hasar derinliği 87

Şekil 4.11. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (19, 20, 21 ve 22): kalınlığa karşı hasar derinliği 88

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.12. Korumasız - bölge 3 numuneleri (3 ve 11): kalınlığa karşı arka yüzey sıcaklığı 89

Şekil 4.13. 73 $g/m2$ ECF korumalı numuneler (1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16): kalınlığa karşı arka yüzey sıcaklığı 90

Şekil 4.14. 195 $g/m2$ ECF korumalı numuneler (4, 12 ve 15): kalınlığa karşı arka yüzey sıcaklığı 90

Şekil 4.15. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21 ve 22): kalınlığa karşı arka yüzey sıcaklığı 91

Şekil 4.16. Bölge 1A numuneleri (4, 5, 6, 10, 12, 13, 15 ve 16): koruma katmanına karşı delaminasyon alanı 93

Şekil 4.17. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21, 22) koruma katmanına karşı delaminasyon alanı 94

Şekil 4.18. Bölge 1A numuneleri (4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15, 16): koruma katmanına karşı yüzey hasar alanı 95

Şekil 4.19. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21 ve 22) koruma katmanına karşı yüzey hasar alanı 96

Şekil 4.20. Bölge 1A numuneleri (4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15, 16): koruma katmanına karşı hasar derinliği 97

Şekil 4.21. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (19, 20, 21 ve 22) koruma katmanına karşı hasar derinliği 98

Şekil 4.22. Bölge 1A numuneleri (4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15 ve 16): koruma katmanına karşı arka yüzey sıcaklığı 99

Şekil 4.23. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (19, 20, 21, 22) koruma katmanına karşı arka yüzey sıcaklığı 100

Şekil 4.24. 73 $g/m2$ korumalı numuneler (7, 9, 13 ve 14): yıldırım bölgesine karşı delaminasyon alanı 101

Şekil 4.25. 73 $g/m2$ korumalı numuneler (7, 9, 13 ve 14): yıldırım bölgesine karşı yüzey hasar alanı 102

Şekil 4.26. 73 $g/m2$ korumalı numuneler (7, 9, 13 ve 14): yıldırım bölgesine karşı hasar derinliği 103

Şekil 4.27. 73 $g/m2$ korumalı numuneler (7, 9, 13 ve 14): yıldırım bölgesine karşı arka yüzey sıcaklığı 104

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.28. 195 $g/m2$ korumalı numuneler (12, 15, 17, 19 ve 23): kumaş tipinin delaminasyona etkisi 105

Şekil 4.29. 195 $g/m2$ korumalı numuneler (4, 12, 15, 17, 19, 21 ve 23): kumaş tipinin yüzey hasar alanına etkisi 106

Şekil 4.30. 195 $g/m2$ korumalı numuneler (12, 15, 17, 19 ve 23): kumaş tipinin hasar derinliğine etkisi 107

Şekil 4.31. 195 $g/m2$ korumalı numuneler (4, 12, 15, 17, 19, 21 ve 23): kumaş tipinin arka yüzey sıcaklığına etkisi 108

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Japonya'da Komatsu hava kuvvetleri üssünden kalkan uçağa yıldırım çarpma anı 9

Resim 2.2. Uçak kabuğu üzerinde yıldırım çarpması kaynaklı hasarların giriş ve çıkış noktaları etrafındaki dağılımı 12

Resim 2.3. Yıldırım çarpması sonucu hasar alan metalik uçak parçaları; yatay dengeleyici üzerinde takılmış saptırıcının yıldırım kaynaklı eğilmesi (a), korumasız cam elyaf kanat ucu parçasında yıldırım akımı arkı sonucu oluşan şok dalgasının alüminyum parçada oluşturduğu hasar (b) 13

Resim 2.4. KETPK motor kapağı kenarında meydana gelen yıldırım çarpması kaynaklı hasar 14

Resim 2.5. KETPK kanatçık üzerinde meydana gelen yıldırım çarpması kaynaklı hasar 14

Resim 2.6. Gerdirilmiş bakır folyo 25

Resim 2.7. 38kA yıldırım tepe akımı sonrası ultrasonik C-tarama sonuçlarının ve reçine piroliz bölgelerinin birleşmiş sonuçları; numune [452/02/−452/902]s (a), numune [302/02/−302/902]s 29

Resim 2.8. 38kA yıldırım çarpması sonrası hasar profilleri numune 45 (a) ve numune 30 (b) 30

Resim 3.1. Gerber Z1 Cutter 41

Resim 3.2. Serim için kesilmiş numuneye özel katmanlar 42

Resim 3.3. Katman serimi 43

Resim 3.4. Baskı uygulaması 44

Resim 3.5. Otoklav 45

Resim 3.6. Tecnatom ultrasonik tahribatsız muayene makinası 48

Resim 3.7. Kürleme sonrası numunelerin ultrasonik muayene sonuçları 49

Resim 3.8. Boyama işlemi sonrası numune 50

Resim 3.9. Karanlık hazne düzeneği 51

Resim 3.10. Tahta test düzeneği 52

Resim **Sayfa**

Resim 3.11. Yüksek voltaj düzeneği 52

Resim 3.12. DL 750 ScopeCorder 53

Resim 3.13. ISM 200 53

Resim 3.14. DLRO10HD 54

Resim 3.15. TESTO-171 54

Resim 3.16. G100 EX 55

Resim 4.1. Yıldırım testi sonrası numune 4'te oluşan dış hasar (a), ve delaminasyon alanı (b) 57

Resim 4.2. Yıldırım testi sonrası numune 4'te oluşan iç ve dış hasarlar 58

Resim 4.3. Yıldırım testi sonrası Numune 1'de iç ve dış hasarlar (a), 2A bölgesi için hasar detayı (b), elyaf kırılması (c) 60

Resim 4.4. Yıldırım testi sonrası numune 18'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), arka yüzey hasarı (b), ön yüzey hasar detayı (c), arka yüzey hasar detayı (d), elyaf kırılması (e) 62

Resim 4.5. Yıldırım testi sonrası numune 14 2A bölgesi hasarı (a), numune 14 2B bölgesi hasarı (b), numune 11 2A bölgesi hasarı (c), numune 6 1A bölgesi hasarı (d) 63

Resim 4.6. Yıldırım testi sonrası Numune 7'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), arka yüzey hasarı (b), ön yüzey hasar detayı (c), ön yüzey katman kalkması (d) 65

Resim 4.7. Yıldırım testi sonrası Numune 6'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), ön yüzey hasar detayı (b), ön yüzey katman kalkması (c) 66

Resim 4.8. Yıldırım testi sonrası Numune 3'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), arka yüzey hasarı (b), ön yüzey hasar detayı (c), ön yüzey katman kalkması (d), arka yüzey katman kalkması (e) 67

Resim 4.9. Yıldırım testi sonrası Numune 8'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), 1A bölgesi ön yüzey hasar detayı (b), ön yüzey erozyonu (c), ön yüzey erozyonu (d) 69

Resim 4.10. Yıldırım testi sonrası Numune 12'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), ön yüzey hasar detayı (b), ön yüzey erozyonu (c) 70

Resim 4.11. Yıldırım testi sonrası Numune 19'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), ön yüzey hasar detayı (b) 71

Resim **Sayfa**

Resim 4.12. Yıldırım testi sonrası Numune 10'de yüzey (sarı kesikli bölge) ve delaminasyon hasarı (kırmızı sürekli bölge)..... 72

Resim 4.13. Yıldırım testi sonrası Numune 14'de yüzey (sarı kesikli bölgeler) ve delaminasyon hasarı (kırmızı sürekli bölge)..... 73

Resim 4.14. Yıldırım testi sonrası Numune 21'de yüzey (sarı kesikli bölgeler) ve delaminasyon hasarı (kırmızı sürekli bölgeler) 74

Resim 4.15. Yıldırım testi sonrası Numune 18'de yüzey (sarı kesikli bölge) ve delaminasyon hasarı (kırmızı sürekli bölge)..... 75

Resim 4.16. Yıldırım testi sonrası Numune 1'de 2B bölgesi ön yüzey hasarı (a), test esnası 2B bölgesi arka yüzey sıcaklık dağılımı (b), test sonrası 2A bölgesi ön yüzey hasarı (c),), test esnası 2A bölgesi arka yüzey sıcaklık dağılımı (d) 77

Resim 4.17. Yıldırım testi sonrası Numune 10'de ön yüzey hasarı (a), test esnası arka yüzey sıcaklık dağılımı (b) 77

Resim 4.18. Yıldırım testi sonrası Numune 14'de ön yüzey hasarı (a), test esnası arka yüzey sıcaklık dağılımı (b) 78

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

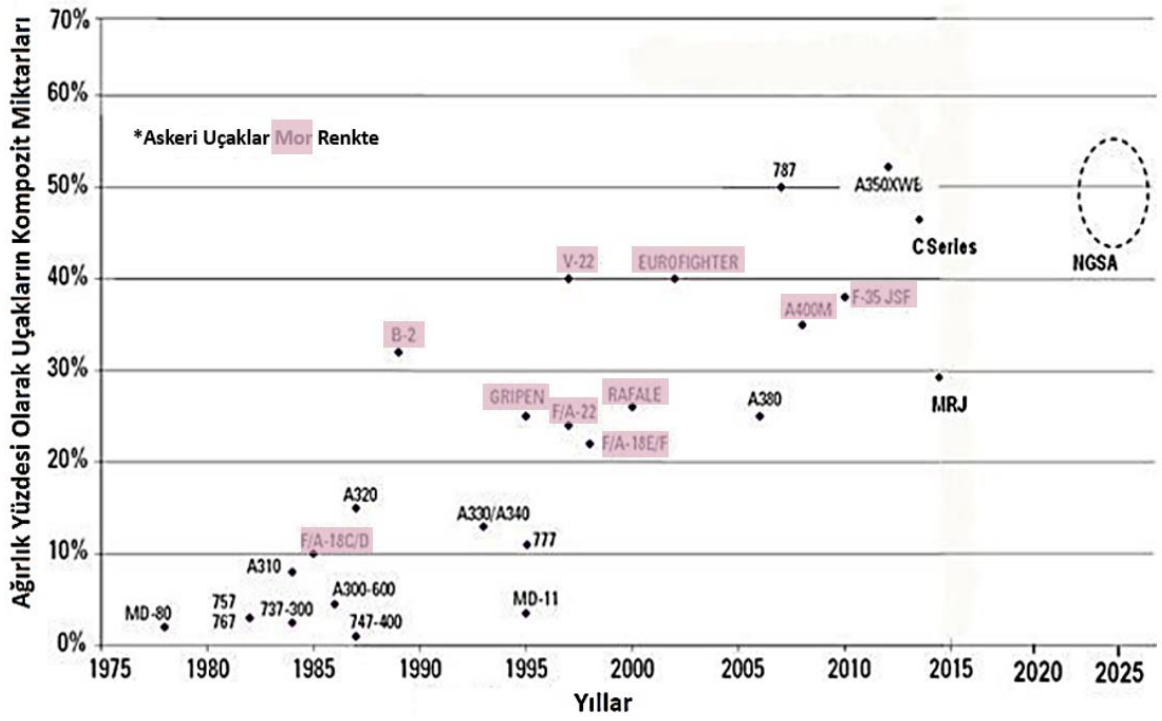
Simgeler	Açıklamalar
Ω	Direnç (ohm)
°C	Sıcaklık (santigrat)
C	Elektriksel Yük (coulomb)
Ba	Basınç (bar)
A	Akım (amper)
cm	Uzunluk (santimetre)
cm^2	Alan (santimetre kare)
cm^3	Hacim (santimetre küp)
dk	Zaman (dakika)
F	Sığalık (farad)
ft	Uzunluk (fit)
g	Kütle (gram)
J	Elektrik Akım Yoğunluğu (joule)
K	Sıcaklık (kelvin)
kA	Akım (kiloamper)
kPa	Basınç (kilopaskal)
km	Uzunluk (kilometre)
m	Uzunluk (metre)
m^2	Alan (metre kare)
m^3	Hacim (metre küp)
mm	Uzunluk (milimetre)
mm^2	Alan (milimetre kare)
mmHg	Basınç (milimetreciva)
mHz	Frekans (milihertz)
ms	Zaman (milisaniye)
Pa	Basınç (paskal)
s	Zaman (saniye)
V	Potansiyel (volt)

Simgeler	Açıklamalar
W	Güç (watt)
µs	Zaman (mikrosaniye)
µF	Sığalık (mikrofarad)

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AFP	Otomatik Fiber Yerleştirme
ARP	Havacılık Uygulama Önerileri
ATL	Otomatik Şerit Serme
CNT	Karbon Nanotüp
ECF	Gerdirilmiş Bakır Folyo
FAA	Federal Havacılık İdaresi
KEK	Kısa Elmas Köşegeni
KETPK	Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
RTM	Reçine Transfer Yöntemi
SAE	Amerikan Otomotiv Mühendisleri Derneği
SPS	Kıvılcım Plazma Sinterlemesi
UD	Tek Yönelimli
UEK	Uzun Elmas Köşegeni
VARTM	Vakum Yardımlı Reçine Transfer Yöntemi
VBO	Vakum Torbalı Üretim
YKK	Yıldırıma Karşı Koruma

1. GİRİŞ

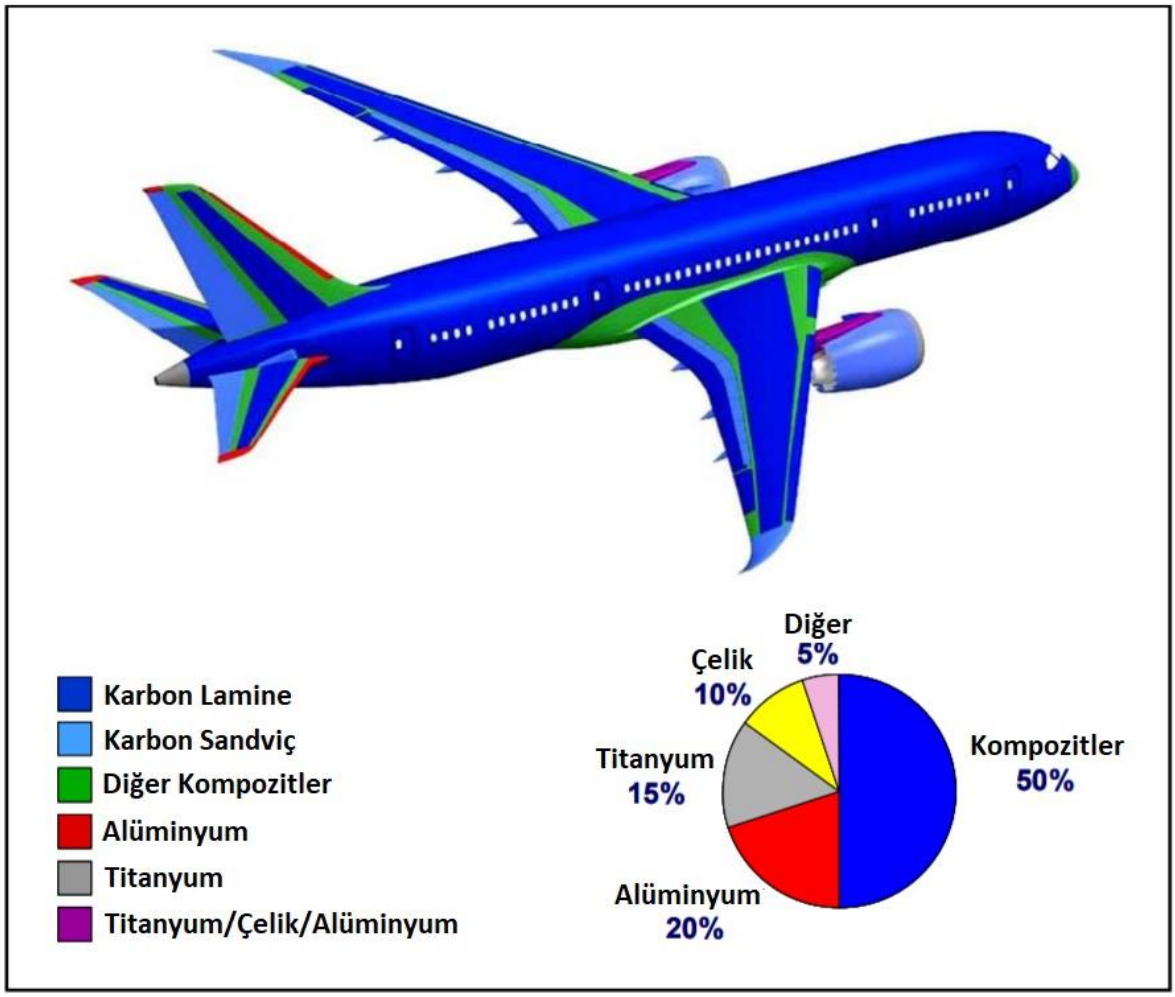
Kompozit malzemeler üstün yapısal ve ağırlık performanslarından dolayı havacılık, otomotiv ve ulaşım endüstrilerinde geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Özellikle, kompozitler, son 30 yıldaki uçak yapılarında kullanılan malzeme kompozisyonuna bakıldığında, havacılık endüstrisinde ilgi çekici bir hale geldiği Şekil 1.1.'den anlaşılmaktadır. Kompozitlerin mekanik ve diğer karakteristik özelliklerinin geliştirilmesi kabuk, radom ve hareketli yüzeyler gibi ikincil yapılara uygulanmaya başlanıldığı 1960'lı yıllardan bu yana artarak çalışılmaktadır. Günümüzde kullanılan uçaklardan olan Boeing 787 ve Airbus A350 %50 oranından fazla Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler (KETPK) kullanarak kompozitlerin tüm avantajlarından faydalanmıştırlar. Son yıllarda, otonom sistemler ve konvansiyonel olmayan kompozit malzeme biçimlerinin uçak üreticilerine KETPK'in geleneksel alüminyum yapılarına karşı en iyi fiyat-rekabet alternatifi olmasını sağlamıştır.



Şekil 1.1. Kompozit yapıların havacılık sektöründe kullanımının yıllara göre artışı [1]

Yapı tasarımındaki kompozit uygulamalarının doğrudan faydaları; statik dayanım, modülüs ve yorulma dayanımı gibi özgül mekanik özelliklerindeki daha üstün değerlerdir. Ek olarak,

yeni tasarımlar daha iyi kabin şartları, artan yakıt verimliliği ve azalan bakım-onarım masrafı gibi dolaylı avantajlara kompozit uçak yapısıyla sahip olmaktadır. KETPK kullanımı daha efektif uçak yapılarının tasarlanması potansiyeline sahiptir. Şekil 1.2.'de Boeing 787 uçak yapısının malzeme dağılımı gösterilmektedir. Şekil 1.2.'ye göre Boeing 787'nin yıldırım çarpmalarına karşı özel dikkat gerektiren tüm ıslak dış yüzeyi KETPK'den oluşmaktadır [2].



Şekil 1.2. Boeing 787 kompozit ve geleneksel metallik malzeme dağılımı [2]

KETPK'nin kullanım alanının büyümesindeki en önemli teknolojik elementlerden biri üretim teknolojilerindeki gelişmelerdir. Bu kapsamda, 2 yaklaşım vardır.

1) Geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan önceden reçine emdirilmiş kumaşlar için geliştirilmiş otonom sistemler

2) Önceden reçine emdirilmiş kumaşları ve bu kumaşlarla bağlantılı masrafları olmayan yeni geliştirilmiş KETPK teknolojileri

Boeing 787 programı, Otomatik Fiber Yerleştirme (AFP) ve Otomatik Şerit Serme (ATL) yöntemleriyle, kompozitlerin üretim maliyetini metalik malzeme üreticileriyle rekabet edecek düzeyde düşürmeyi başarmıştır. Boeing şerit döşeme alanında ABD'de lider konumdadır ve imalat teknikleri 777, B-2 ve 787 modellerinde kullanılmaktadır. Diğer yandan, geleneksel olmayan üretim teknolojileri ise oldukça cezbedicidir. Bu teknolojiler arasında önceden reçine emdirilmiş kumaşların vakum torbası kullanarak üretilmesi (VBO), reçine transfer yöntemi (RTM), vakum yardımlı reçine transfer yöntemi (VARTM) ve gelişmiş kalıp basma yöntemleri yer almaktadır.

KETPK; alüminyum, çelik ve titanyum alaşımı gibi yüksek iletkenliğe sahip geleneksel malzemelerle kıyaslandığında daha düşük elektrik iletkenliği göstermektedir. KETPK'nin elektriksel iletkenliği bileşenlerinin elektriksel özelliklerine dayandırılabilir. Karbon elyaf makul bir iletken olmasına rağmen, bakır ve alüminyuma göre üç kat daha fazla elektriksel direnç sergilemektedir. Polimer matris ise mükemmel bir dielektrik malzemedir. Epoksi polimer ideal bir dielektrik katı olarak, elektrik mühendisliği alanında yüksek bozulma direnci ve kimyasal denge özelliklerinden dolayı yoğun olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak, KETPK'nin toplam elektrik direnci, geleneksel metalik uçak yapılarına göre önemli ölçüde düşüktür. Örneğin, tipik karbon fiber ipliği $0{,}1x\ 10^{-5}\ \Omega$.m elektrik direncine sahiptir ve bu iplikler epoksi matris ile birleştirildiğinde, bütün KETPK'nin elektrik direnci yıldırım akımı şartı altında $6x10^{-5}\ \Omega$.m'ye kadar çıkmaktadır [3]. KETPK'nin bu değeri, elektrik direnci $2{,}8x10^{-8}\ \Omega$.m olan alüminyum direncinin 2000 kat daha fazlasıdır. Elektriksel iletkenliği az olan yapısal malzemeler daha fazla elektrik enerjisini Joule ısınması (direnç ısınması) formunda sönümleme kapasitesine sahiptirler. Bu nedenle, yıldırım akımı enerjisinin KETPK'ler de aynı hacimdeki alüminyuma kıyasla, daha fazla hasar vereceği görülmektedir.

Yıldırımın KETPK'nin üzerindeki etkilerinin önemine rağmen, literatürde bu konuda yapılan çalışmalar az sayıdadır. Herhangi bir yıldırım koruması olmayan hava aracına çarpan yıldırım, katastrofik hasar sebebiyle uçağın düşmesine neden olabilmektedir. Yapısal bütünlük açısından, iki temel kaygı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, yıldırımın çarptığı noktada meydana getirdiği fiziksel hasar ve yakıt tankları içerisindeki tutuşabilir yakıt

buharının alev almasıdır. İkincisi ise, yıldırımın elektrik arkının; fiberlerin kırılması, korunmasız polimer matrislerde termal bozulma gibi geniş fiziksel hasarlar oluşturmasıdır. Ayrıca, Federal Havacılık İdaresi (FAA), TWA 800 uçuşunun New York'ta 1996 yılında gerçekleşen uçak kazasına benzer kazaları önlemek amacıyla, oldukça sıkı yakıt tankı güvenlik düzenlemelerini oluşturmuştur [4]. Yıldırım testlerinde, çıplak KETPK köşelerinden yıldırım akımı geçerken genellikle "kenar korlaşması" (edge glow) adı verilen bir olguya sebep olduğu görülmektedir [5]. Kenar korlaşması, yakıt tutuşmasındaki potansiyel sebeplerden birisi olduğu için uçak üreticileri bu konunun araştırılması için yoğun çaba sarf etmektedirler. Sonuç olarak, yıldırımdan koruma yöntemlerinin, uçakların güvenliği ve uzun ömürlü olması için geliştirilmesi gerekmektedir.

Çalışmanın ana amacı, KETPK'nin yıldırım hasar mekanizmalarını anlamak ve yıldırım çarpmasına karşı koruma yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktır. KETPK'nin yıldırıma karşı koruması konusunda yapılan çalışmalar oldukça zorlayıcıdır ve bu nedenle bu konu ile ilgili yapılan araştırmalar sınırlıdır.

Bu tez kapsamında, KETPK'nin yıldırıma karşı koruma yöntemi olarak gerdirilmiş bakır folyo kullanılarak ve yapıların yapay yıldırıma maruz bırakılması sonucu oluşan hasar mekanizmaları incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, günümüz uçaklarında kullanılan kompozit yapıların kalınlıkları, malzemeleri ve boya katmanları düşünülerek, olabildiğince gerçeğe yakın senaryolar oluşturulmuştur. Uçakların maruz kaldığı olası yıldırım koşulları altında ve farklı koruma seviyelerine sahip aday yapısalların performansları incelenmiştir. Deneyler sonrasında kompozitlerde yıldırım çarpması sonucu oluşacak hasar tipleri ve bu hasar tiplerinin kompozitin farklı özelliklerine göre nasıl etkilendiği deneyimlenmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler, gerçek kompozit uçak parçalarının yıldırıma karşı optimum şekilde korunmasında faydalı olarak, ağırlık ve maliyet açısından faydalı tasarımlara yön verebilecektir.

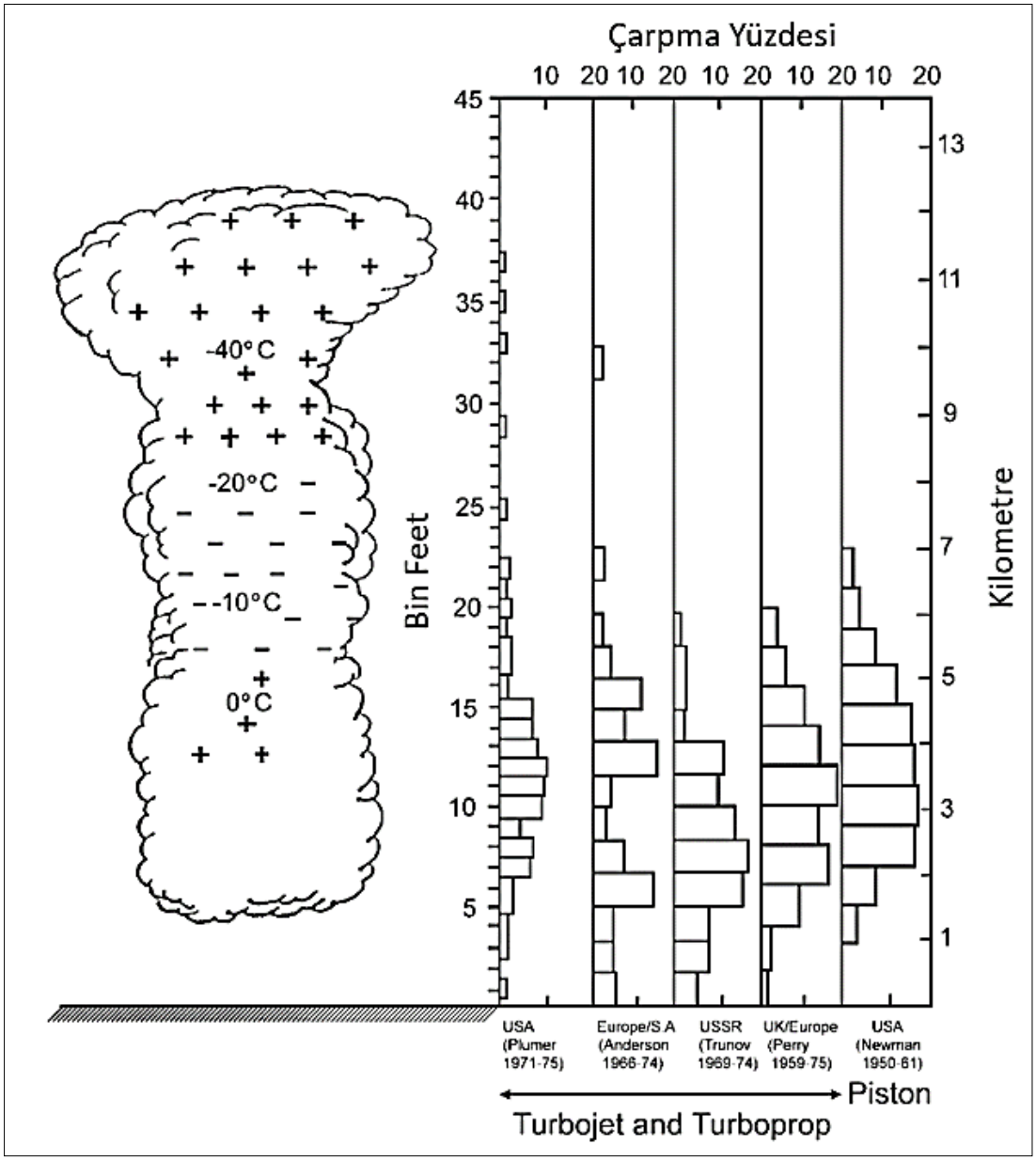
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Yıldırımın Uçağa Çarpma Olasılığı ve Yapısal Bütünlüğe Etkileri

İstatistiksel verilere göre, ticari uçaklar için yıldırım çarpması vakaları yılda yaklaşık iki kez gerçekleşmektedir [6-8]. Çizelge 2.1., Birleşik Devletler'deki ticari uçaklara 1950 ve 1974 yılları arasındaki ortalama yıldırım çarpma sıklığını göstermektedir. Çizelge 2.1.'e göre ortalama yıldırım çarpma sıklığı her 3000 uçuş saatinde bir gerçekleşmektedir. Askeri uçaklar için, yıldırım ortamı güvensiz hava koşulları ve belli olmayan uçuş rotalarından dolayı sivil uçaklara göre daha kötü olabilmektedir. Yıldırım çarpması olayları uçağın irtifasına bağlıdır. Şekil 2.1., yıldırım çarpma sıklığı ve çarptığı irtifalar ile ilgili beş farklı çalışmayı özetlemektedir. Daha eski olan pistonlu uçaklar jet uçaklarına kıyasla daha düşük seyir irtifaları (10 000 ~ 15 000 fit) için uygun olsalarda, yıldırım davranışı her iki tipteki uçak için benzerdir. Çarpmaların çoğu bulut seviyesi veya daha altı seviyelere denk gelen irtifalarda, uçağın seyir irtifasına çıkışı ya da seyir irtifasından inişi sırasında meydana gelmektedir. Bu nedenle, kısa mesafeli ticari uçak rotaları, uçağın yıldırım ortamına maruz kalma ihtimalini artırmaktadır. Yıldırım çarpmalarının meydana gelmesi için genelde öyle olsa da, her zaman fırtına bulutlarına ihtiyaç yoktur. Seyir halindeki bir uçak, her türlü hava koşullarında yıldırım çarpmasına maruz kalabilir. Harrison, Birleşik Hava Yolları'nda meydana gelen olayların yaklaşık %40'ının herhangi bir fırtına bulutuna dair kanıt olmadan meydana geldiğini raporlamıştır [9].

Çizelge 2.1. ABD ticari uçaklarının maruz kaldığı yıldırım çarpma olayları [10]

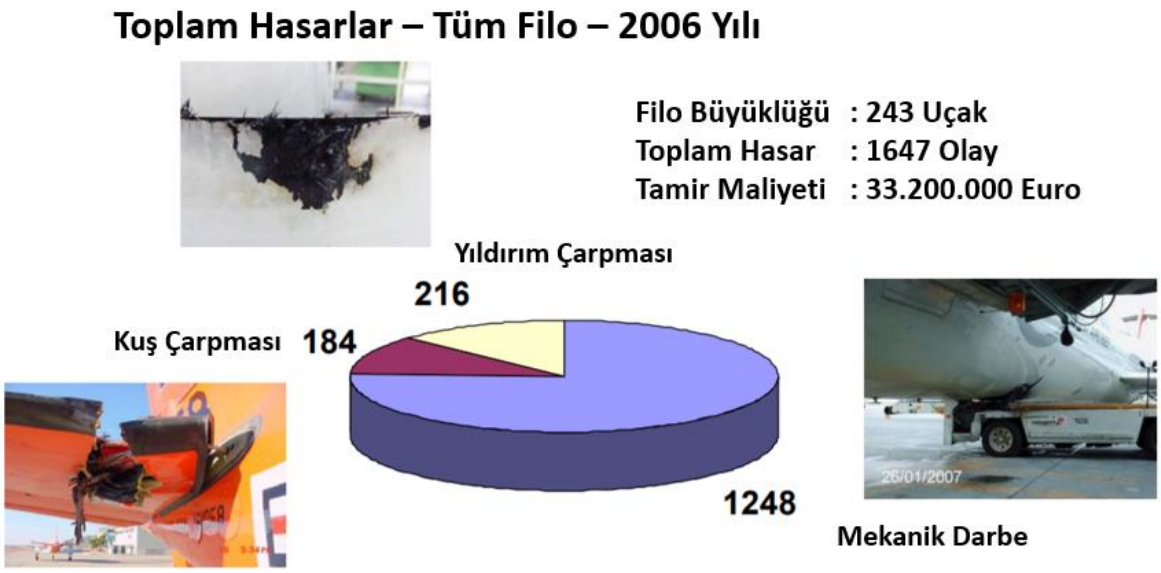
	Newman(1950-1961)		Perry(1959-1974)		Birleşmiş Tüm Veriler		
Uçak Tipleri	Çarpmalar	Uçuş Saati	Çarpmalar	Uçuş Saati	Çarpmalar	Saatler	Ortalama
Piston	808	2000000	-	-	808	2000000	2475
Turboprop	109	415000	280	876000	389	1291000	3320
Jet	41	427000	480	1314000	521	1741000	3340
Hepsi	958	2842000	760	2190000	1718	5032000	2930



Şekil 2.1. İrtifaya göre uçakların maruz kaldıkları yıldırım çarpması vakaları [10]

Şekil 2.2., yıldırım çarpması vakalarının meydana gelme sıklığını bakım-onarım bakış açısıyla vurgulamaktadır. Bu istatistiksel bilgi, Lufthansa'nın 2006 yılındaki toplam filosunun hasar kaynaklarının sebeplerini göstermektedir [11]. Filonun uçaklarında toplam kaydedilen hasarların %17'den daha fazlası yıldırım çarpmasına dayandırılmaktadır. Bu durum, Lufthansa'nın bakım-onarım maliyetlerinde büyük pay sahibidir. Bahsi geçen veriler, 2006 filosuna dayanmakta, karbon ve cam elyaf kompozit yoğunluğu 787 gibi çok yüksek olan uçakları kapsamamaktır. Lufthansa'nın filosunun çoğu, alüminyum ağırlıklı gövde yapısına sahip ve kompozit yapıları sadece dengeleyiciler, hareketli yüzeyler ve kaplamalarla sınırlı uçaklardan oluşmaktadır. Buna rağmen, kompozit bileşenlerdeki

yıldırım hasarının önemli bir seviyeye geldiği görülmektedir. All Nippon Havayolları'nın 767 uçağının saha tecrübelerindeki raporlarına göre, yıldırım hasarlarının %67'den daha fazlasının kabul edilebilir hasar limitini aşıp onarım gerektiren fiziksel hasara sebep olduğu, denetleme ve onarım sonuçları sonrası görülmüştür [12]. Günümüzde, birçok uçak operatörü bakım-onarım masraflarını azaltmak için strateji arayışındadır [13]. Bu nedenle, tamamen kompozit uçak gövdesinin geliştirilmesi, yıldırımdan kaynaklı hasar miktarını artıracak ve havacılık otoritelerine ve endüstrisine zorlayıcı bir konu olacaktır.



Şekil 2.2. Lufthansa'nın kompozit parçalarının tecrübe ettiği hasarlar [11]

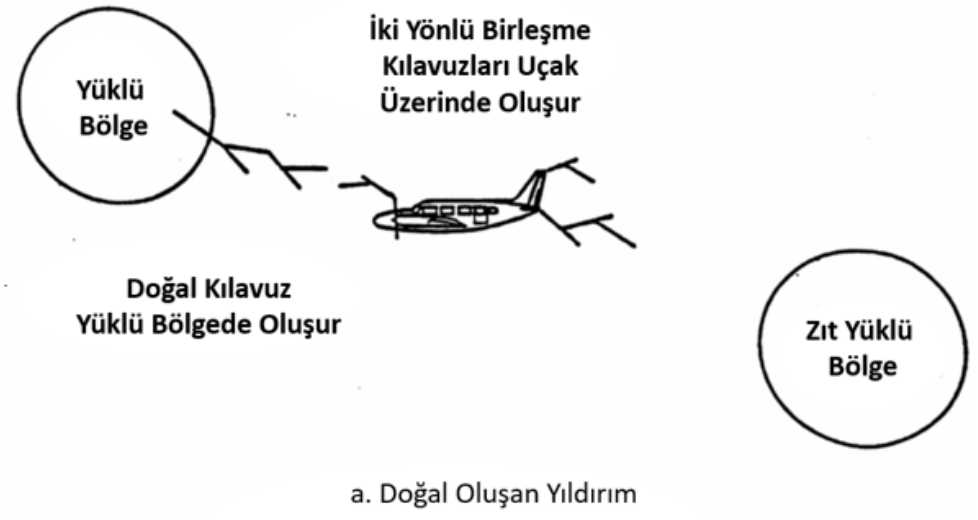
2.2. Uçakla Yıldırım Etkileşimi

Yıldırım birbirine zıt polaritedeki iki yüklü bölgenin yüksek iletken bir hat boyunca elektriksel deşarj olmasıyla ortaya çıkar. Yıldırım genellikle yukarı veya aşağı yönlü hareket eden "kılavuz adım" denilen kıvılcımların şarjlı bölgeden yollanmasıyla başlar. Kılavuz adım bir buluttan, uçan bir araçtan veya yeryüzündeki bir yapıdan gelebilir.

Havadaki kılavuz gelişimleri, çevredeki gazların termal iyonlaşmasının bir sonucudur. Kılavuz, iki yüklü alanın arasındaki boşluğu bir araya getirerek doldurduktan sonra nötralize olur. Bu süreç "geridönüş çarpması" olarak adlandırılır. Bu süreç boyunca, kılavuz kanal kısa devreye benzeyen yüksek elektrik akımının geçtiği oldukça yüksek iyonize bir kanala dönüşür [14]. Yüksek iletken kanal, büyük yük kaynaklarından gelen akımın daha fazla

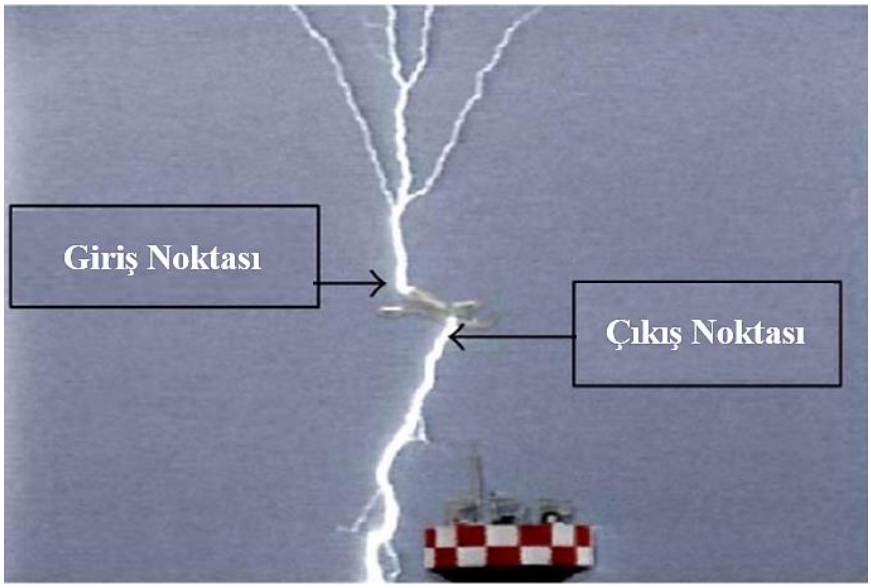
kendi üzerinden geçmesine izin verir. Kanalda akan aşırı yüksek miktardaki enerji, kanalda bulunan havanın aniden genişlemesi sonucu geri dönüş çarpması olarak yoğun bir şimşek ve akustik şok oluşturur [6, 10]. Bu süreç hem pozitif hem de negatif yüklerle gerçekleşebilir. Eğer yıldırım deşarj süreci dünyaya pozitif yük gönderirse, bu yıldırım "pozitif şimşek" olarak adlandırılır. Diğer bir taraftan ise, negatif yük negatif şimşek oluşturur. İstatistiksel verilere göre, negatif yıldırım daha sık görülen bir olaydır, çünkü elektronlar iyonlardan daha hızlıdır. Bu nedenle, negatif yıldırımlar fiziksel hasar ve müdahale açışından daha tehlikeli sonuçlar doğurur.

Yıldırımın başlama mekanizması göz önüne alındığında, uçak ile yıldırım etkileşimi; uçakla tetiklenen yıldırım ve doğal olarak oluşan yıldırım olmak üzere iki farklı grupta kategorize edilebilir. Etkileşim formları Şekil 2.3'te gösterilmektedir [8, 15]. Uçak ile yıldırım etkileşiminde, yıldırım yoğun bir elektrik alanında uçak tarafından başlatıldığında veya uçak üzerinde başladığında meydana gelirken, ikinci etkileşim ise uçağın doğal yollarla başka bir bölgede oluşmuş bir kılavuzla karşılaşması sonucu meydana gelmektedir. Her iki olayda da uçağın sınır bölgeleri yıldırımın tetiklenmesi ve yükün iletilmesi için önemli bir rol üstlenmektedir. Normal hava koşullarında ve deniz seviyesinde 3×10^3 kV/m bozulma dayanımına sahiptir ve uçağın havadaki varlığı bu değeri düşürmektedir. Bu nedenle, uçağın şekli yıldırımın yoğunluk ve oluşumunu etkileyen bölgesel elektrik alanlarının tanımlanmasında en önemli etkenlerden birisidir. Sonuç olarak, Resim 2.1'te gösterildiği gibi radom, kanat uçları, yatay/dikey dengeleyiciler ve motor kapağı gibi uçak yapıları, düz yapılara kıyasla yıldırım tehlikesine daha açıktır. Ayrıca şekildeki yolcu uçağı, havaalanından havalanırken yıldırıma maruz kalmakta ve öncüler buruna ve kuyruk bölümüne temas etmektedir. Yıldırımla uçağın temas ettiği nokta "bağlanma noktası" olarak adlandırılır ve uçak üzerindeki bu nokta, bulutla yer arasındaki yıldırım akım kanalının bir geçiş noktasıdır.



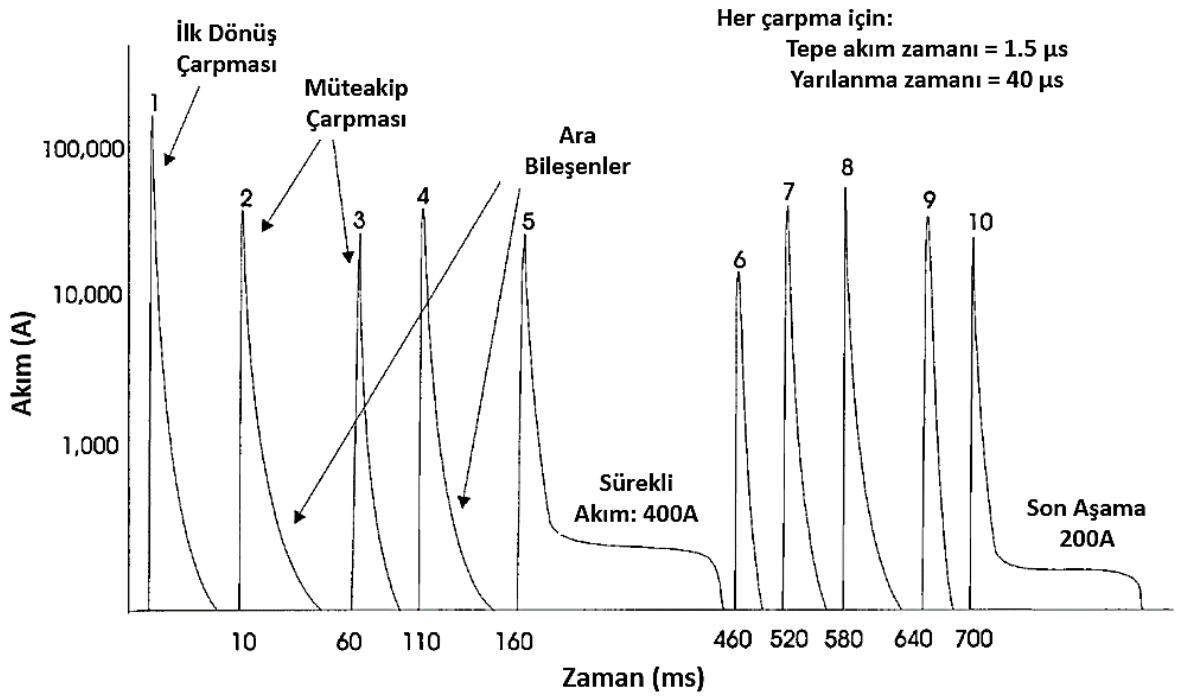


Şekil 2.3. Uçak ve yüklü bölgeler arasındaki yıldırım tetikleme mekanizmaları [15]



Resim 2.1. Japonya'da Komatsu hava kuvvetleri üssünden kalkan uçağa yıldırım çarpma anı [16]

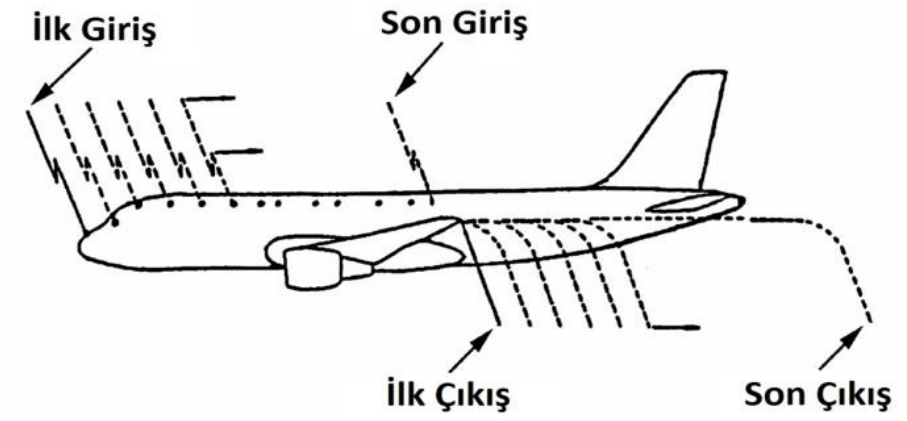
Enerji kaynağı ile uçak arasında yıldırım kanalı oluşur oluşmaz, yüksek miktarda elektrik enerjisi uçak üzerinden geçer. Elektriksel akım dalga şekilleri genellikle yıldırımın giriş enerjisini tanımlamak için kullanılır. Yıldırım akım miktarının ölçümüyle ilgili araştırmaların çoğundaki girişimler, bulut-bulut arasındaki ölçüm prosedürlerinde ki zorluklardan dolayı bulut-bulut arasındaki yıldırımlar yerine, bulut-yer arasındaki yıldırımlarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4.'te örnek bir negatif yıldırım akım dalga biçimi modeli gösterilmiştir [7]. Yıldırım olayı genellikle 1 ila 11 arasındaki birkaç itici çarpmadan meydana gelir. İlk çarpmanın zirve akımı genellikle 200 kA kadar yüksektir, ama onu takip eden geri dönüş çarpmaları genellikle 100 kA' dan daha azdır. Darbelerin süresi genellikle 0-500 µsn arasındadır. Müteakip geri dönüş çarpmaları ise daha yüksek yükselme oranına ve daha düşük akım zirvesine eğilimlidir. Genellikle bazı çarpmaların sonunda sürekli akım meydana gelir. Bu sürekli akım 100 – 400 A arasında olacak kadar düşük olsa da, süresi 100 msn'den daha fazladır. Bu nedenle göz ardı edilemeyecek kadar enerji transferi gerçekleşebilir. Yıldırım akımı itici ve sürekli olmak üzere iki ayrı bileşenle sınıflandırılabilir.



Şekil 2.4. Bir negatif yıldırım akım dalga biçiminin modeli [7]

Seyir halindeki bir uçağa yıldırım çarparsa, "süpürülme kanalı" olgusu uçağın yüzeyindeki bağlanma noktasında meydana gelir. Eğer uçan bir taşıt yeterli hıza sahipse ve yıldırım yeteri kadar sürerse, yıldırım bağlanma noktası Şekil 2.5.'da gösterildiği gibi uçağın gerisine doğru

süpürülme eğilimindedir. Yıldırım kanalı çevredeki havaya göre sabit kalma eğilimindedir ancak hava aracı ileri yönde hareket etmektedir.



Şekil 2.5. Süpürülme kanalı bağlantı noktalarının karakteristik patikası [15]

Uçağın sınır bölgelerinden olan burun kısmına kılavuz adımının ulaştığı bir durumu düşünelim. Uçağın öne doğru olan hareketinden dolayı sabit yıldırım kanalı uçak yüzeyinde arkaya doğru sürüklenir. Bağlanma noktası genellikle düzgün ve devamlı olarak hareket etmez; hatta ayrık, düzensiz adımlar yeniden arka uçak yüzeyinde birleşmeler meydana getirir ve buna ‘’yeniden çarpma’’ denir. Resim 2.2’de All Nippon havayollarının raporladığı üzere, süpürülen kanalın metalik yüzeyde oluşturduğu yanma izleri görülmektedir. Burun kabuğunun üzerinde görülen yanık izleri yıldırımın yeniden çarpmasına kanıt olarak gösterilebilir. Kısacası, yıldırımın yeniden çarpma noktalarındaki enerji miktarı ilk çarpma noktasında olduğu kadar yüksek olmasa da, tüm uçak gövdesinin yıldırımdan korunması için gerekli önlemlerin alınmasını gerektirmektedir.



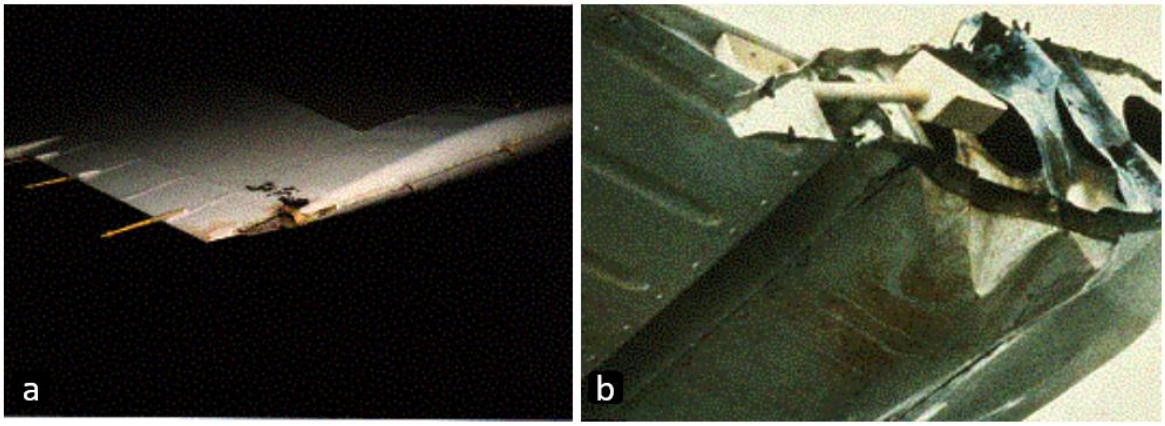
Resim 2.2. Uçak kabuğu üzerinde yıldırım çarpması kaynaklı hasarların giriş ve çıkış noktaları etrafındaki dağılımı [12]

2.3. Uçak Yapılarında Yıldırım Hasarı

Yıldırım akımları uçağa bir noktadan girer ve başka bir noktadan terk eder. Genel olarak etkiler ‘’doğrudan’’ ve ‘’dolaylı’’ olarak ikiye ayrılabilir. Endüstriyel deneyimlere göre doğrudan etkiler, yıldırımın doğrudan çarparak ve/veya yıldırım çarpması sonucu akımların transferi ile uçak ve/veya ekipmanların fiziksel olarak hasar almasıdır. Dielektirik açılma, havaya uçma, bükülme, erime, yanma, uçak yüzey veya ekipmanlarının yüzeylerinin ve yapılarının buharlaşması örnek olarak verilebilir. Bunun yanında; kablaj, borulama ve diğer iletken parçaların direkt olarak yükselen voltaj ve akımları da doğrudan etkilerden sayılmaktadır. Dolaylı etkiler ise elektrik devresi ve kablolarda geçici olarak elektriksel süreksizlikler ve dalgalanmalara sebep olabilir.

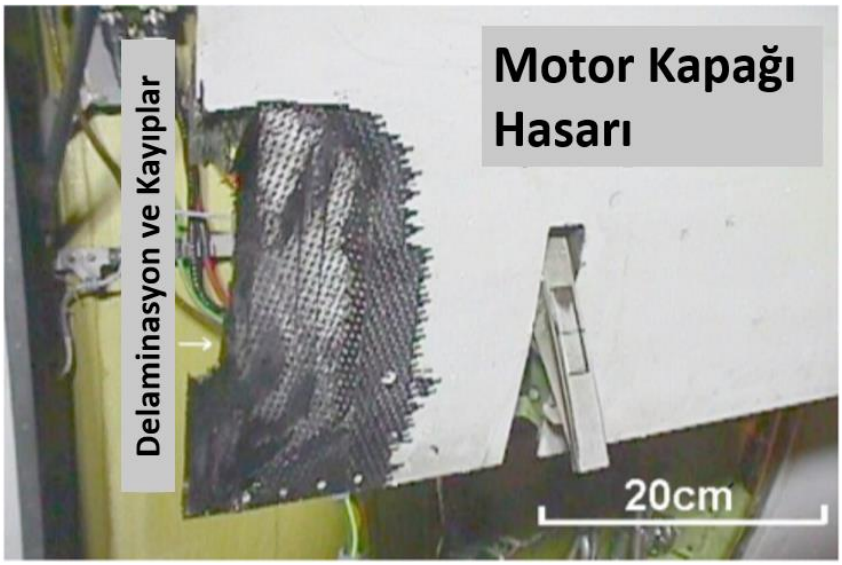
Yapısal bütünlük açısından, uçak dış yüzeyine gelen dolaylı etkiler başlıca ilgi konusudur. Doğrudan etkiler sebebiyle, yıldırım çarpması hem metalik hem de kompozit yapılarda ağır yapısal hasarlara neden olabilir. Bu hasarlar; erime, yıldırım çarpma noktasında süblimleşme, Joule ısınması, manyetik kuvvet etkileri, akustik şok, bağlantı yerlerinde ark atması ve yakıt tankında yanıcı yakıt buharının tutuşması gibi farklı biçimlerde olabilir [3, 10, 17, 18]. Resim 2.3’de yıldırımın uçak yapısallarına verdiği hasar temsili olarak

gösterilmektedir [19]. Gövde üzerinde 100 farklı bölgede yanık izleri oluşturan yıldırımın saptırıcı üzerinde bıraktığı hasar Resim 2.3a'da görülmektedir. Resim 2.3b'de ise, korumasız cam elyaftan üretilen kanat ucu üzerinde meydana gelen yıldırım kaynaklı şok dalgasının alüminyum kanat kabuğu üzerinde oluşturduğu yüksek basınç sebepli deformasyon görülmektedir.

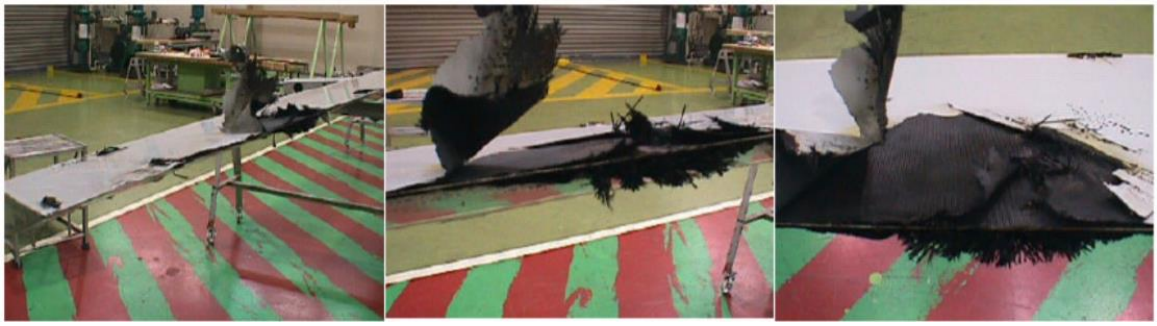


Resim 2.3. Yıldırım çarpması sonucu hasar alan metalik uçak parçaları; yatay dengeleyici üzerinde takılmış saptırıcının yıldırım kaynaklı eğilmesi (a), korumasız cam elyaf kanat ucu parçasında yıldırım akımı arkı sonucu oluşan şok dalgasının alüminyum parçada oluşturduğu hasar (b) [19]

Resim 2.4 ve Resim 2.5'te KETPK uçak yapılarında meydana gelen yıldırım hasarları gösterilmiştir [13]. İki olayda da, KETPK yapılar ısı ve diğer fiziksel etkilere maruz kalma, ayrışma, delaminasyon, polimer matriste yanma ve parça köşelerinde kayıplar meydana gelmiştir ve dolayısıyla söz konusu parçaların değiştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.



Resim 2.4. KETPK motor kapağı kenarında meydana gelen yıldırım çarpması kaynaklı hasar [13]

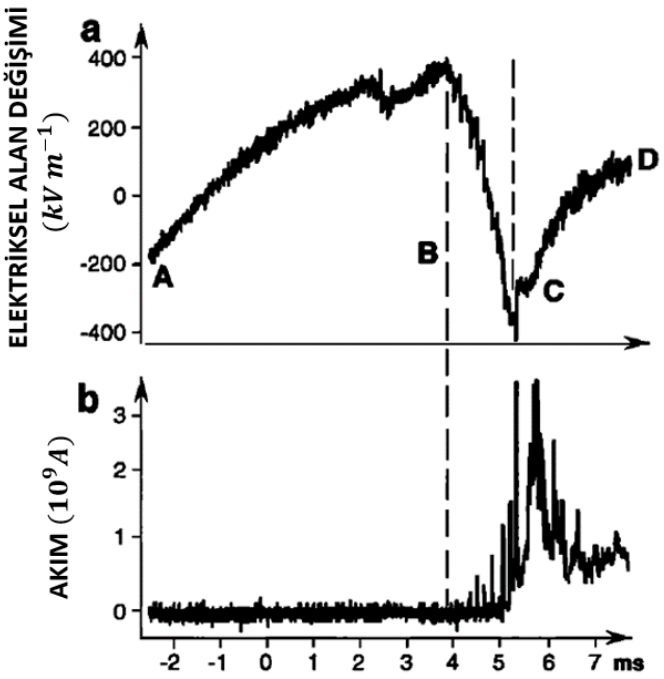


Resim 2.5. KETPK kanatçık üzerinde meydana gelen yıldırım çarpması kaynaklı hasar [13]

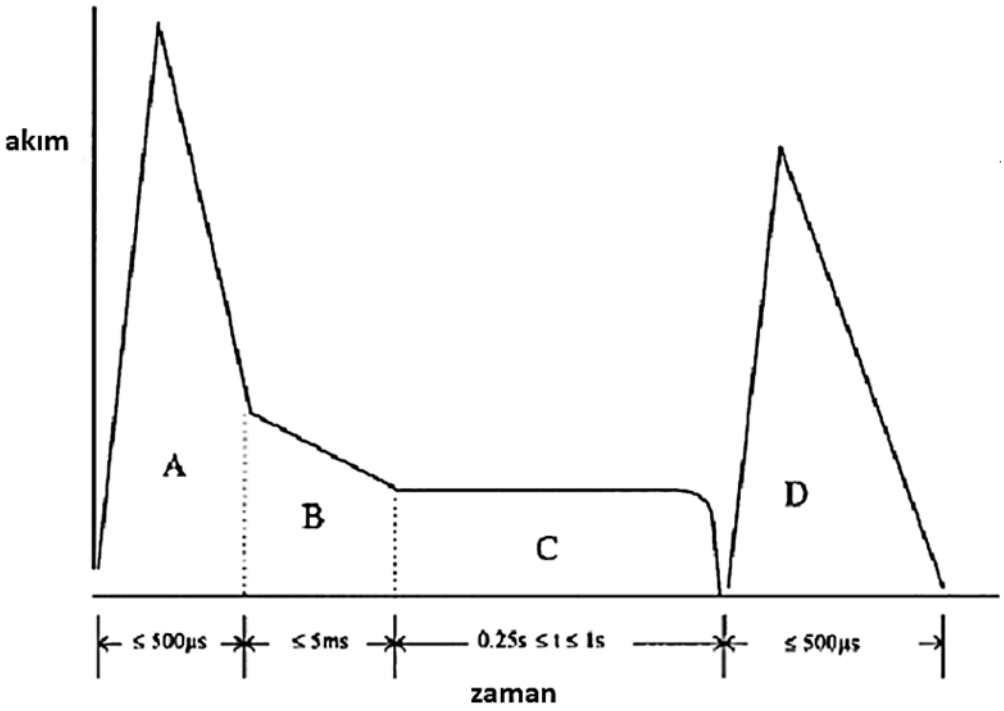
2.4. Yıldırım Dalga Şekilleri ve Etki Bölgelerinin Belirlenmesi

Yıldırım çarpmasının ‘‘kritik dalga formu parametreleri’’ olarak ifade edilen karakteristik özellikleri yıldırımdan koruma tasarımları için son derece önemlidir. Yıldırımların doğrudan etkilerini belirleyen en önemli faktörler elektriksel akım dalga formları ve geri dönüş çarpması olgularıdır. Bulutlardan yeryüzüne çarpan yıldırımlar hakkında yapılan deneysel araştırmalar sonucunda dört farklı kategori belirlenmiştir. Bunlar; elektriksel ve manyetik alanlar, akım, hız ve son olarak parlaklık ve optik tayflardır [20]. Uzun bir binanın tepesine yerleştirilmiş olan dirençli paralel bir devre üzerinde oluşan voltaj ölçümleri, akım ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için uygulanan en basit metottur. Veriler elde edildikten sonra, akımın zaman tepkilerinin üzerinde uygulanacak veri azaltma işlemiyle tepe akımı ve verilen enerji gibi kritik dalga parametreleri hesaplanabilir. Bu istatistiksel verilerin özetleri birçok farklı kitap ve makalelerde bulunabilir [6, 20, 21, 22]. Tahmin edilebileceği gibi, seyir

halindeki bir uçak etrafındaki elektromanyetik alandan veri elde edilmesi daha zorlayıcıdır. 1960 yılından bu zamana kadar birçok araştırma organizasyonu uçaklara ölçüm cihazları takıp fırtınaya doğru uçaklar uçurmuşlardır [8]. Günümüzde de birçok enstitü ve otorite bu konularda araştırmalar yapmaktadır. Genellikle bu uçaklar akım ölçen, yüzey elektriksel alanının zamana bağlı değişimi kayıt eden, yüzey manyetik alan yoğunluğunu ölçen cihazlarla ve optik kameralarla donatılmıştır. Şekil 2.6.'de görüldüğü gibi, bu tip bir uçak üzerinde kayıt edilen elektrik alan ve akım görülmektedir [23]. Sonraki aşamada ise, bu istatistiksel verilerden analiz ve test aşamalarında kullanmak üzere, Şekil 2.7.'de görülen ideal dalga ve dalga parametreleri formu elde edilir.



Şekil 2.6. C-160 uçağında kayıt edilen yıldırım verileri; (a) ön üst gövde elektrik alanı, (b) burunda akım verisi [23]



- A BİLEŞENİ (İlk Geri Dönüş Çarpması)

  Tepe Değer : $200kA\ (\mp 10\%)$

  Verilen Enerji : $2\ x\ 10^6\ A^2s\ (\mp 20\%)(in\ 500\mu s)$

  Toplam Süre : $\leq 500\mu s$

- B BİLEŞENİ (Yarı Değerli Akımı)

  Maks. Yük Aktarımı : $10\ Coulombs\ (\mp 10\%)$

  Ortalama Genlik : $2kA\ (\mp 20\%)$

  Toplam Süre : $\leq 5ms$

- C BİLEŞENİ (Sürekli Akım)

  Genlik : $200 - 800A$

  Yük Aktarımı : $200\ Coulombs\ (\mp 20\%)$

  Toplam Süre : $0.25s - 1s$

- D BİLEŞENİ (Müteakip Geri Dönüş Çarpması)

  Tepe Değer : $100kA\ (\mp 10\%)$

  Verilen Enerji : $0.25\ x\ 10^6\ A^2s\ (\mp 20\%)(in\ 500\mu s)$

  Toplam Süre : $\leq 500\mu s$

Şekil 2.7. Doğrudan yıldırım testleri için A, B, C ve D dalga form bileşenleri [7]

Yukarıda ifade edilen bazı dalga parametrelerinin tanımı aşağıdaki şekildedir.

Tepe genliği: Test dalga formunun tepe değeri

Verilen enerji: Elektrik akımının karesinin zamansal integrali ve akım yolu üzerinde direnç ısısı kaynaklı enerji yayımının temsili değeri

Yük aktarımı: Akımın zamana bağlı integrali ve metal gibi iyi iletkenlerdeki yanıkların kaynağı

Yükseliş Zamanı: Akımın tepe genliği değerinin %10'undan %90'a yükselmesi için gereken zaman

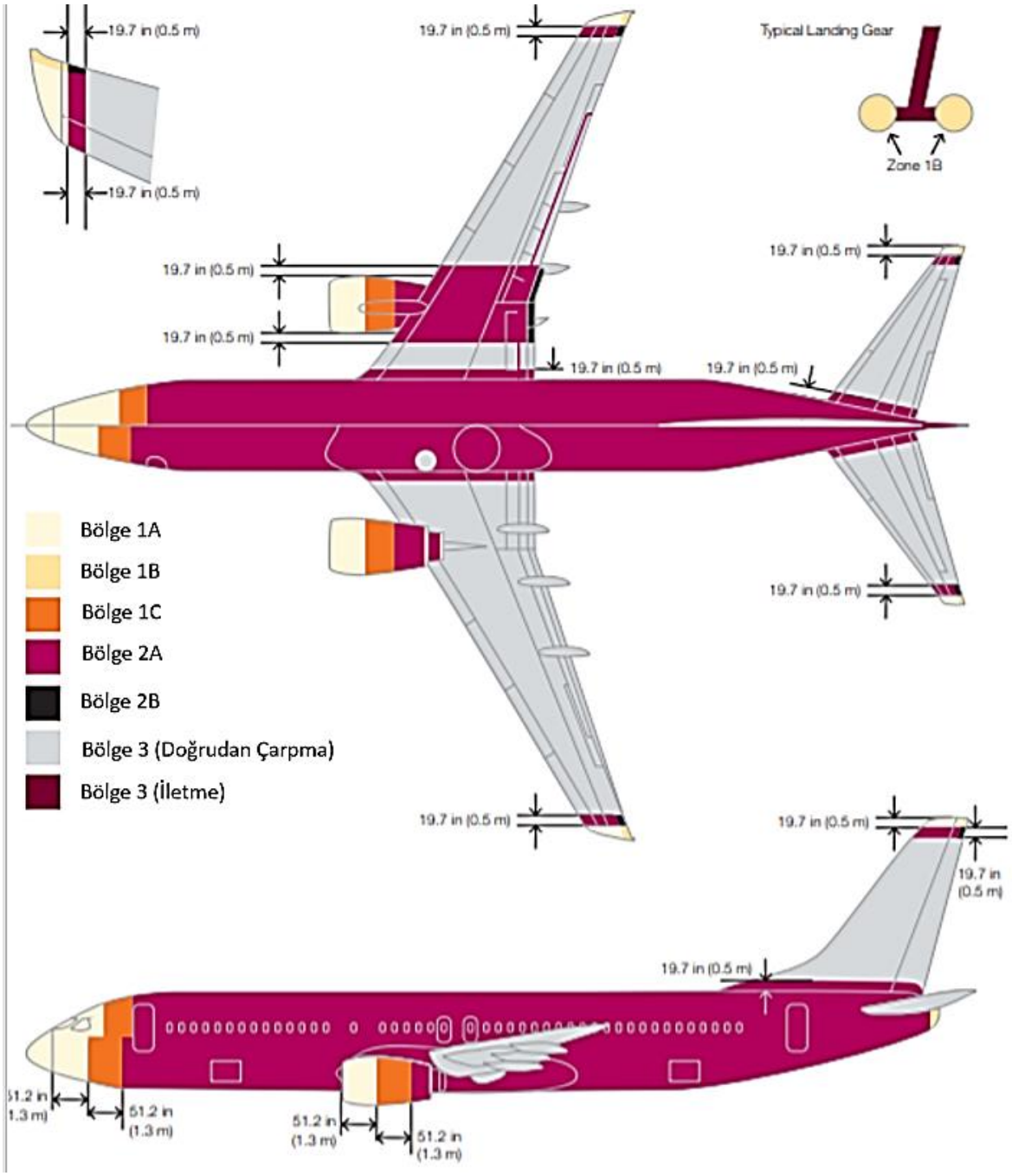
Toplam Süre: Akım tepe genliğinin %1'i için geçen toplam zaman

Yıldırımın uçak yapısalları üzerindeki etkisini incelemek için, doğal bir yıldırım çarpmasının fiziksel hasar ve uçak aviyonikleri ile ilgili en kötü koşulları temsil edebilecek birçok ideal akım bileşenlerine ayrılması gerekir. ABD Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE) havacılık ile ilgili önerilen uygulamaları (ARP) yayınlamaktadır. Bunlardan SAE ARP5412 [7] yıldırımların dolaylı ve doğrudan etkilerinin laboratuvar testleri için gerekli dalga form serilerini açıklamaktadır. Bu dalga form bilgileri hem askeri hem ticari uçakların yıldırım araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu veriler voltaj dalga formları ve akım dalga form bilgilerini ihtiva etmektedir. İdeal voltaj dalga formlarının kullanılması yıldırım bağlantısının anlaşılması konusunda kullanılacak olan elektrik alanın ifade edilmesi için son derece önemlidir. Voltaj arttıkça, elektriksel alan dielektrik kırılımın yaşanacağı zamana kadar artmaktadır. Bu kırılım, cam elyaf gibi bir katı yalıtkan kabuğun açılması veya yalıtkan bir yüzeyde parlama şeklinde gerçekleşebilir. Genel olarak, voltaj dalga formları dielektrik kırılmaların çalışılmasına uygundurlar. Akım dalga formları ise, direnç ısınması gibi akım baskın olguların değerlendirilmesi için gereklidir. Doğal bir yıldırımın hem voltaj hem akım özelliklerinin test laboratuvarlarında aynı anda simüle edilebilmesi son derece zor olduğundan, test amacına göre iki olgudan birinin seçilmesi gerekmektedir. Metal/kompozit malzemeler üzerindeki fiziksel hasarı görmek için, akım kaynaklı direnç ısınmalarına sebep olan akım dalga formları uygulanmaktadır. Çizelge 2.2. A, B, C ve D ideal akım bileşenlerini yıldırımın doğrudan etkilerinin çalışılması konusunda kullanılmaktadır.

Çizelge 2.2. Dolaylı yıldırım etkilerinin testi için kullanılan akım bileşenlerinin tanımları [15]

Parçalar	Tanımlar
Parça A	200kA'lık yüksek akımlı ilk geri dönüş çarpması, $2x10^6\ A^2s$ değerinde verilen enerji, düşük irtifalarda daha sık rastlanan $50\mu s$'den düşük yükseliş zamanı ve kısa süreli ($< 500\mu s$)
Parça A_h	150kA tepe akımı değerinde geçiş bölgesinin ilk geri dönüş çarpması, $2x10^6\ A^2s$ değerinde verilen enerji, $37{,}5\mu s$'den düşük yükseliş zamanı ve kısa süreli ($< 500\mu s$)
Parça B	2kA değerinde orta değer akımlı, ilk geri dönüş çarpması ve/veya yeniden çarpmalar
Parça C	200A ve 800A arasında akım genliği olan sürekli akım, 0,25 ve 1,0s arasında sürer, 200 coulomb yük transferi, büyük yük aktarımını temsil eder
Parça C^*	C bileşeninin modifiye edilmiş hali, ortalama 400A'dan daha fazla akım taşır.
Parça D	100kA değerinde yüksek akımlı mütakip çarpma, $25\mu s$'e kadar yükseliş zamanı ve kısa süreli

Yıldırımın yoğunluğu ve oluşum sıklığı uçak yüzeyinde çarptığı yere bağlıdır. Dolayısıyla, tasarımcılar ilk çarpma ve ikinci çarpma arasındaki yoğunluk, olası yerler, süpürülmüş çarpma etkilerinin farkında olmalıdırlar. Yıldırım izleri üzerinde yapılan çeşitli araştırmalar sonucu, SAE uçaklar için yıldırım bölgelerinin belirlenme esaslarını oluşturmuştur. Şekil 2.8.'de tipik büyük bir ticari taşıma uçağının yıldırım bölgelerini gösterilmiştir. SAE ARP 5414, Çizelge 2.3.'de yıldırım bölgelerinin tanımları açıklanmıştır [15]. Bölge 1 olarak ifade edilen uçağın burun ve motor kapağı gibi uç bölgelerinde en şiddetli akım dalgası olan A dikkate alınmalıdır. Kalan gövde ıslak yüzeylerin çoğu Bölge 2 olarak kategorize edilir ve daha az şiddetli olan D tipi akım dalgası dikkate alınmalıdır. Kanat ve yatay/dikey dengeleyicilerin büyük bir kısmı Bölge 3 olarak nitelendirilir ve Bölge 1 kadar şiddetlidir. Çizelge 2.4.'de yıldırımın doğrudan etkisinin testi için her yıldırım bölgesine özel test dalga form takımları belirtilmiştir.



Şekil 2.8. Tipik büyük bir ticari taşıma uçağının yıldırım bölgeleri [24]

Çizelge 2.3. Yıldırım bölgelerinin tanımları [15]

Yıldırım Bölgesi	Tanım
1A	*İlk geri dönüş çarpması bölgesi* Yıldırım kanalı bağlantısı sırasında ilk geri dönüş çarpmasının düşük flaş tutunması beklentisi ile oluşabileceği bütün uçak yüzeyleri
1B	*Uzun tutunmalı ilk geri dönüş çarpması bölgesi* Yıldırım kanalı bağlantısı sırasında ilk geri dönüş çarpmasının yüksek flaş tutunması beklentisi ile oluşabileceği bütün uçak yüzeyleri
1C	*İlk geri dönüş çarpması için geçiş bölgesi* Yıldırım kanalı bağlantısı sırasında azalmış genlikli ilk geri dönüş çarpmasının düşük flaş tutunması beklentisi ile oluşabileceği bütün uçak yüzeyleri
2A	*Süpürülmüş çarpma bölgesi* Müteakip geri dönüş çarpmasının düşük flaş tutunması beklentisi ile sürüklenebileceği bütün uçak yüzeyleri
2B	*Uzun flaş tutunmalı süpürülmüş çarpma bölgesi* Müteakip geri dönüş çarpmasının yüksek flaş tutunması beklentisi ile sürüklenebileceği bütün uçak yüzeyleri
3	1A, 1B, 1C, 2A veya 2B bölgesine dahil olmayan ve yıldırım kanalı ile buluşması olası olmayan yüzeylerdir. Bu bölgeler yıldırım bölgelerinin altında veya arasında kalabilir ve/veya doğrudan çarpma ve süpürülmüş çarpma noktaları arasında önemli miktarda akım taşıma

Çizelge 2.4. Doğrudan yıldırım etkilerinin çalışılması için yıldırım bölgeleri ve ilgili test akımı bileşenleri [15, 25]

Yıldırım Bölgesi	Akım Bileşenleri
1A	A, B, C^*
1B	A, B, C, D
1C	A_h, B, C^*, D
2A	D, B, C^*
2B	D, B, C
$3^{\uparrow}$	A, B, C, D
↑ Akım katı bir bağlantı ile uygulanır, ark kullanılmaz	

2.5. Yıldırım Regülasyonları ve Havacılık Firmalarının İlgili Uygulamaları

Yıldırıma karşı uçak tasarımları gerçekleştirilirken ana amaçlar yapının katastrofik hasar almasının engellenmesi, yolculara gelebilecek ölümcül hasarların engellenmesi, uçuş kontrolünün kayıp edilmemesi ve tutuşabilen yakıt buharının patlamasının engellenmesi şeklindedir.

Yıldırımdan koruma temel regülasyonları FAA tarafından Advisory Circular AC25-21, Section 25.581 "Lightning Protection of Structure" bölümünün altında açıklanmıştır.

(a) Uçaklar yıldırımın katastrofik etkilerine karşı korunmalıdır

(b) Metalik yapılar için, paragraf (a)'ya uyulmalıdır. Uygunluk aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

(1) Parçaların uçak iskeletine elektriksel olarak uygun bağlanması veya

(2) Parçaların yıldırımın uçağı tehlikeye sokmayacak şekilde tasarlanması

(c) Metal harici yapılar için, paragraf (a) ya uyulmalıdır. Uygunluk aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

(1) Parçaların yıldırım etkilerini en aza indirecek şekilde tasarlanması veya

(2) Oluşan akımın kabul edilebilir yöntemlerle saptırılması ile uçağı tehlikeye sokmasının önlenmesi [26]

Şekil 2.9.'de birincil uçak yapısalları için temel tasarım kriterlerinden çevresel ve münferit olaylar altında yıldırım çarpmaları yer alır. Aynı şekilde takım düşürme, kuş çarpması, dolu kaynaklı hasarlarda bu kategoride yer alır. Genellikle, tespit eşikleriyle ilgili stratejiler bakım ve denetim prosedürlerine bağlıdır. Bakım ve denetimlerde ise görünmeyen hasarlarda yapının statik dayanımına ve büyük görünür hasarlarda yapının hasar tolerans kapasitesine bakılır.



Şekil 2.9. Birincil uçak yapısalları için temel tasarım kriterleri [27]

Çizelge 2.5.'te yıldırım çarpması olayı için tipik hasar tolerans kriterleri özetlenmiştir [27]. Bir uçak ortalama bir yıldırım çarpmasına maruz kaldığında, yapısal performansının bozulması ekonomik ve güvenlik nedenlerinden dolayı istenmez. Orta enerji seviyesinde gerçekleşen bir yıldırım çarpmasında uçak yapısı üzerinde görünür hasarlar meydana gelebilir. Ancak, çarpma yapının yük taşıma kapasitesinde sınırlı bir düşmeye sebep olmalıdır. Dolayısıyla, kalıcı bir tamirin ertelenmesi kabul edilebilir. Yüksek enerjili çarpma SAE standartlarında bahsi geçen çarpmalardır ve otoritede tarafından öncelik verilenlerde bu tip çarpmalardır. Enerji seviyesi oldukça yüksektir ve uçak yapısında hasar kaçınılmazdır. Bu nedenle, gereksinimler yakıt tankı patlaması gibi katastrofik hasarların engellenmesini ve güvenli uçuşun devamlılığını hedefler.

Çizelge 2.5. Yıldırım çarpmaları için tipik hasar tolerans kriterleri [27]

Tehlike	Kriter	Gereksinim
Yüksek Enerji Çarpması	Yıldırım bölgelendirmesine uygun çarpma seviyesi	• Yakıt tankına hiçbir girişim olmamalı • Yakıt tankında hiçbir kıvılcım ve ısınan bölge olmamalı • Sistemler yıldırımdan korunmalı • Güvenli uçuş ve iniş yüklerini AC25-571-1c paragraf 8.c (1) ve (2)'ye uygun olarak devam ettirmeli
Dağıtılmış Yıldırım Çarpması	Yaklaşık olarak çarpma enerjisi seviyesinin %80 ila % 90'ı	• Gözle görülebilir hasar • Acil yapısal tamir gerektirmemeli • Bakım gerektirebilir • Ertelenen periyodlarda kalıcı tamirler gerektirebilir
Ortalama Yıldırım Çarpması	Yaklaşık olarak çarpma enerjisi seviyesinin %50'si	• Yapısal tamir gerektirmemeli • Bazı noktalarda korumanın restorasyonu gerekebilir

Yıldırıma karşı havacılık şirketlerinin uygulamalarını inceleyecek olursak, KETPK yapının elyaf ve reçinesinin düşük iletkenliğinden kaynaklanan yıldırıma karşı dayanıksızlığını arttırmak için yıldırıma karşı koruma (YKK) her zaman uygulanır. YKK yıldırımın çarptığı yerde oluşturduğu fiziksel hasarı hafifletmeyi, bağlantı yerlerinden ark atmasını engellemeyi ve güçlü elektromanyetik alanlara hassas olan ekipmanların korunmasını hedefler. Basit olarak YKK stratejisi dış yüzeye ekstra iletken patikalar oluşturarak, yıldırım akımının yüzeyde kalmamasını ve bölgesel birikme yaşanmadan yayılmasını sağlamaktır.

Çizelge 2.6. kompozitlerin yıldırıma karşı korunması için günümüzde kullanılan YKK yöntemlerini özetlemektedir. Üç ana başlık altında toplanan bu yöntemler; metal folyolar,

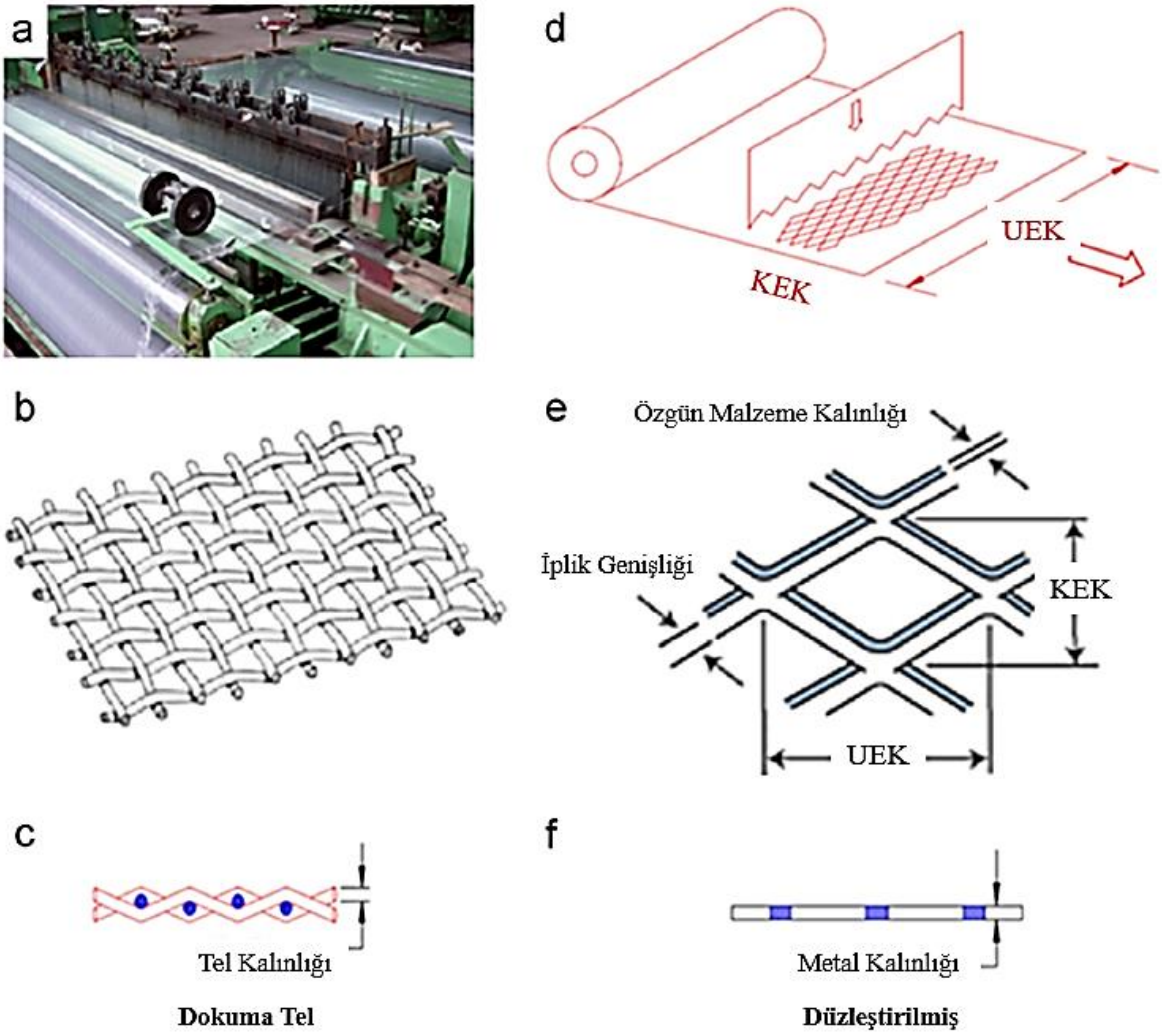
ağlar ve elyaflar şeklindedir. Kompozit yapıların korunmasında genelde bakır ve alüminyum metalleri, yapının dış yüzeyini kaplayacak şekilde kullanılır. Bu koruma metalleri folyo, dokuma ağ ve dokuma içermeyen ağ formlarında olabilir. Folyolar günümüzde tercih edilmemektedir çünkü reçinenin yapışmasını engellemekte ve delaminasyona sebep olmaktadır. Hatta folyo altında bulunan reçinenin ani buharlaşması patlamalara ve beklenenden daha fazla hasarın meydana gelmesine neden olabilmektedir.

Çizelge 2.6. Kompozitler için YKK yöntemleri [28]

YKK	**Seçenekler**	**Ticari Ürün**	**Ana Özellikleri**
Metal folyo veya ağın reçine ile bağlanması	- Ağ malzemesi (bakır, alüminyum, bronz, nikel) - Reçine malzemesi (epoksi, vinil ester, gelişmiş epoksi) - Reçine emdirilmiş veya kuru serim - Folyo, delinmiş veya dokuma	- Astrostrike, - MicroGrid - Synskin, Hysol - Surfacemaster 905C	- Yüksek metal iletkenliği - Ağır yüzey malzemesi - Porozite problemleri
Metal ya da metalize edilmiş elyafların reçine ile tutturulması	- Elyaf malzemesi (karbon, grafit, cam , polyester, sentetik elyaflar) - Kaplamalar (nikel, bakır, gümüş, platinyum) - Fiziksel buhar biriktirme (PVD) - Kıvılcım plazma sinterlemesi (SPS) - Elektro kaplama - Termal	- Metal elyaflar - Ametal kaplanan metal elyaflar - Metal kaplanan elyaflar	- Hafif - Ağlara göre daha az verimli - Esnek işlemeler (çoklu kaplama ve çoklu katman mümkün)
İleri çözümler: polimer bazlı film veya iletken yapıştırıcılar	- Katkı maddeli ileri polimerler - Karbon nanotüpler (CNT) - Grafen kağıtları		- Hafif - Pürüzsüz yüzey - Çarpılma sonrası değiştirilmeli

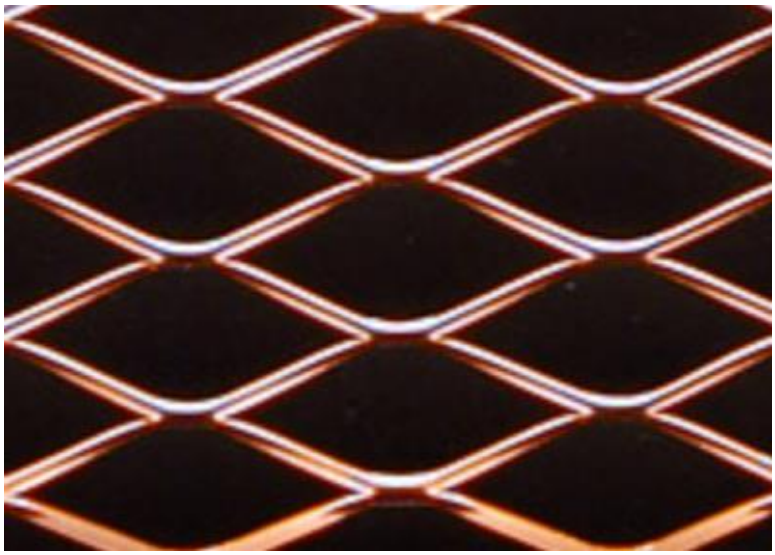
En temel YKK yöntemleri olan dokuma metal ağ ve dokuma içermeyen metal ağ Şekil 2.10.'te gösterilmiştir. Dokuma metal ağ bir dokuma makinası kullanılarak üretilirken (Şekil 2.10a.), dokuma içermeyen ağ kesik atılmış bir folyodan üretilir (Şekil 2.10d.). Dokuma ağ elyaflardan oluşur ve Şekil 2.10b.'de görüldüğü gibi elyafların üst üste binmesi elektriksel iletkenliği sağlar. Dokuma işlemi sebebiyle, dokuma metal ağlar delikli metal ağlara oranla daha fazla mekanik dayanım gerektirir ve dolayısıyla alaşım metallerinin kullanımı daha çok tercih edilir. Dokuma ağlar, elyaf çakışma noktalarında kalınlığın iki katına çıkması sebebiyle (Şekil 2.10c.), gerdirilmiş folyolara kıyasla (Şekil 2.10f.) daha yüksek elektriksel dirence sahiptirler. Bu kalınlık artışları katmanın ağırlığında da artışa sebep olmaktadır.

Dokuma metal ağlar günümüzde hala Boeing 787 gibi uçaklarda kullanılmaktadır. Şekil 2.10e.'de detayı gösterilen dokuma içermeyen ağ yapıları neredeyse saf metallerden üretilebilmektedir ve maksimum elektriksel iletkenliğe sahiptirler. Dokuma içermeyen ağların yani gerdirilmiş folyoların özelliklerini dört temel faktör belirler. Uzun Elmas Köşegeni (UEK), Kısa Elmas Köşegeni (KEK), et kalınlığı ve iplik genişliği bu parametreleri ifade eder. Bu faktörlerde değişiklik yaparak iletkenlik, hacim, ağırlık, kalınlık, yüzey pürüzlülüğü, reçine doldurma oranı gibi özellikler yönetilebilir.



Şekil 2.10. (a) Makinada dokuma ağ üretimi. (b) Dokuma ağ tasarımı (c) Dokuma metal ağın yan kesitinin görünümü (d) Metal folyoda kesik atma işlemi (e) Delik açılmış metalik ağ görünümü (f) Gerdirilmiş metal ağın yan kesitinin görünümü [28]

Resim 2.6'da gerdirilmiş bakır folyonun detayı görülmektedir. Bu malzemeler diğer birçok YKK malzemesinde olduğu gibi kompozit seriminde en dışta kalacak şekilde konumlandırılır. Böylece yıldırıma karşı optimum korumayı sağlamış olurlar.



Resim 2.6. Gerdirilmiş bakır folyo [29]

Ekstra iletken patikalar sonrasında uçağın iletken yapısına bağlanır ve böylece yıldırım akımının farklı rotalardan akması sağlanır. En sonunda yıldırım akımı uçağı güvenli şekilde terk eder. Düzgün kullanılmayan YKK yöntemleri koruma sağlamak yerine gereksiz maliyete ve ağırlığa sebep olmaktadır.

Çarpma noktasında meydana gelen doğrudan fiziksel hasarın yanı sıra yıldırımdan koruma birçok yerde gereklidir. Menteşe bölgelerinde elektriksel ark atması fiziksel hasara sebep olmaktadır ve ayrıca menteşe bağlantılarında ani erime sonucu kitlenmeler meydana gelebilmektedir. İletken kayışlar menteşe boyunca kullanılarak, elektromanyetik girişimleri engeller ve ark atlamalarını azaltır. Kompozit parçalarda kullanılan metalik bağlayıcıların kenarları, kenar büyümesine sebep olabilir. Bu da tutuşabilir yakıt buharının alev alması riskini ortaya çıkarır. Dielektrik kapatma ve köşe contaları uygulamaları elektriksel plazma arklarının uçağın içine kaçmasını engellemek için kullanılan özel yöntemlerdir. Uçak sistemlerinde yıldırım kaynaklı konularda sıkıntı yaşanmaması için YKK yöntemlerinin kullanılması elzemdir. Kullanılacak olan YKK yöntemlerinin yapıya kattıkları ağırlık ön önemli kriterleriden biridir. Korumaların yıldırıma karşı etkili olması yanında yapının ağırlık artışının en düşük seviyede olması hedeflenir.

2.6. Kompozitleri Yıldırım Çarpmasından Koruma Çalışmaları

Elyaf takviyeli polimer kompozitleri yıldırım çarpmasına karşı inceleyen çalışmalar iki başlık altında toplanabilir. Bunlar elektriksel ark girişimi ve akım transferi şeklindedir.

Elektriksel ark girişimi

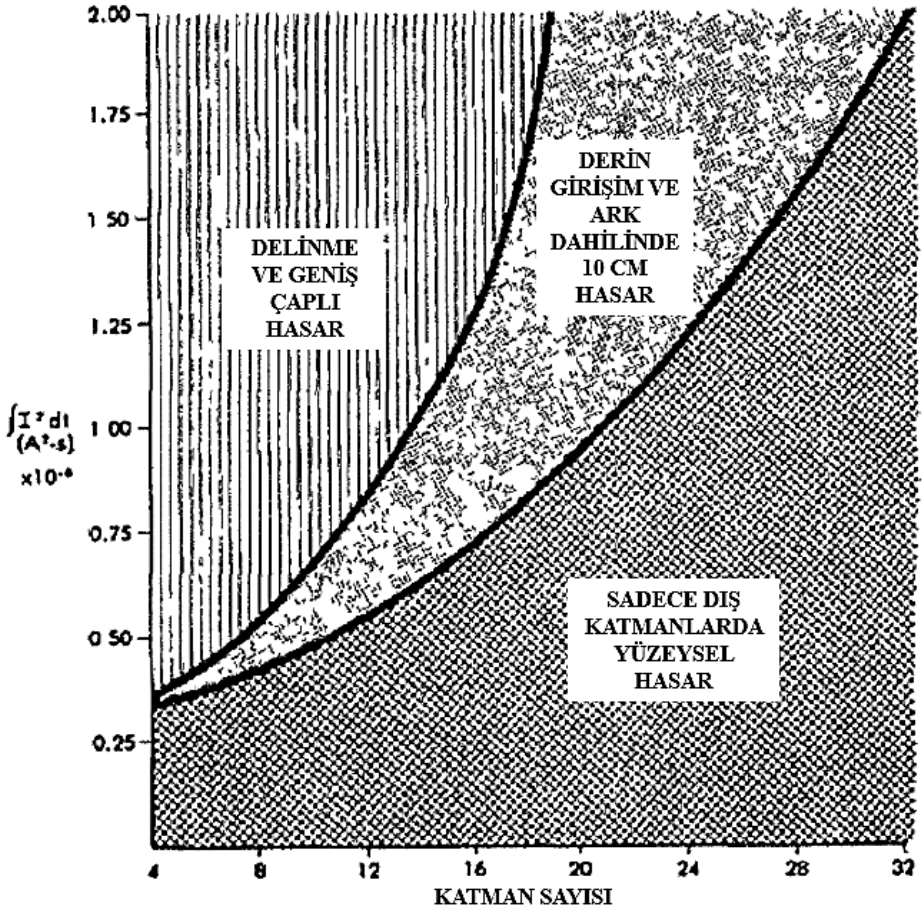
Ark girişimi testi hem metallerde hem kompozitlerde yıldırım hasarının anlaşılmasında kullanılan en yaygın test yöntemidir. SAE ARP5416 [25] testlerin icrası için kabaca yol göstermektedir. Dolayısıyla araştırmacıdan araştırmacıya test mekanizmaları farklılık gösterebilmektedir. Testlerde kullanılan dalga akım formları ise genellikle SAEARP5414 [7] kaynağı kaynak alınarak gerçekleştirir. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerle ilgili yapılan bazı ark girişim çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Kelly ve Schwartz yıldırım girişimi etrafında meydana gelen hasarların davranışlarını görmek için iki farklı test kampanyası yürütmüştür. Boron elyaf takviyeli polimer kompozitler, cam elyaf takviyeli polimer kompozitler, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler ve alüminyum saç metal üzerinde yıldırımın doğrudan etkileri işlenmiştir. Karbon kompozitlerin boron kompozitlere göre oldukça farklı hasar tepkisi verdiği belirtilmiş; karbon elyaflar tarafından yayılan ısının reçineyi buharlaştırıp hasarlı yüzeyde grafit ipliklerinin çıplak kaldığı görülmüştür. Ancak reçine buharlaşmasından ziyade mekanik kuvvetler sebebiyle iplikçiklerin çıplak kalabileceği ihtimalide belirtilmiştir [30].

Polimer matriste meydana gelen delaminasyon ve termal hasarların önemi birçok çalışmada tekrar tekrar bahsedilmiştir [31-34]. Bu çalışmalarda delaminasyonun detay özelliklerinden çatlak ilerlemesi ve katmanlar arasındaki ilişkilere değinilmemiş daha çok karbon elyaf yönünün; elektriksel akım yönü ve hasar patikası arasındaki ilişki incelenmiştir. Farklı akım dalga formlarının temsil ettiği tepe akım ve verilen enerji parametrelerinin oluşturduğu hasarlı yüzey alanı ve hasar derinliği de tartışılmıştır.

Korumasız KEPTK'ler de yıldırım hasarının tepe akımına ve verilen enerjiye bağlı olduğu bilinmektedir. Reid çalışmasında verilen enerji ve test sonuçları arasındaki ilişkiyi iletkende

biriken toplam enerjiyle açıklamıştır. Bu enerjinin numunenin sıcaklık artışının olası sebebi olduğu belirtilmiştir. Başka bir çalışmada, verilen enerji ve korumasız KEPTK yapıda meydana gelebilecek kabaca hasarla ilgili değişimi Şekil 2.11.'de ifade edilmiştir [17, 35].



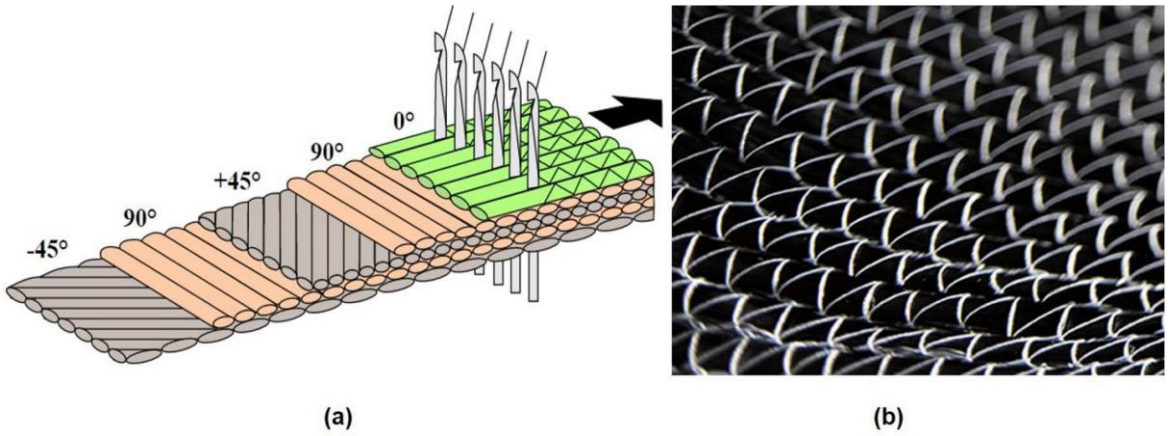
Şekil 2.11. Hasar boyutu ve verilen enerji arasındaki değişim [35]

Hasar dayanım testlerine kıyasla az da olsa çarpma sonrası numunelerin hasar toleranslarını inceleyen araştırmalarda olmuştur. Feraboli çentik ve delik tamiri uygulanmış karbon kompozit numuneler üzerinde üç farklı akım seviyesinde (10, 30 ve 50kA) yıldırım çarpma testleri icra etmiştir. Sonuçlara göre her iki numune tipi içinde çekme dayanımındaki azalma basma dayanımındaki azalmaya göre daha az olmuştur. Bağlayıcıların bulunduğu testlerde daha ilgi çekici sonuçlar elde edilmiştir. Düşük akım seviyesinde (10kA) bağlayıcılar enerjiyi sönümleyerek hasarı azaltırken, yüksek akım seviyelerinde (20kA ve 30kA) bağlayıcılar yıldırım akımının lamina içine dağılımına ve hasarım tüm kalınlıkta meydana gelmesine sebep olmuştur [33]. Heidlebaugh delik tamiri görmüş numuneler üzerinde yaptıkları çalışmada, numunelerin yıldırım testinden sonra daha çekme dayanımı gösterdiğini belirtmişlerdir. Ancak numunelerin uzun kullanımı hakkında yorum

bulunmamaktadır. Yıldırım akımı ve sıcaklık etkilerine maruz kalmış karbon elyaf ve polimer matrislerin kimyasal yapılarında değişiklik meydana gelebilmektedir. Buda kompozitlerin kısa vade performansında olumlu ve olumsuz sonuçlar çıkarabilmektedir [36].

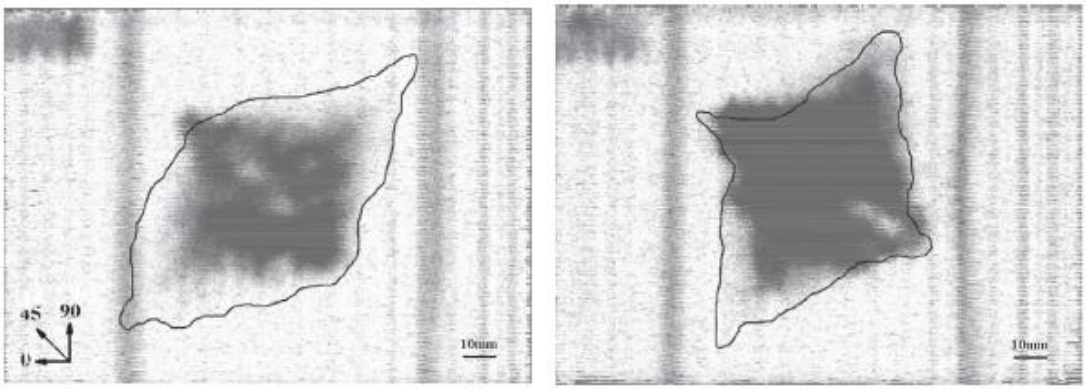
Yıldırımdan koruma katmanları iletken ya da dielektrik malzemelerden oluşabilmektedir. Araştırmalar öncesi beklenenin aksine, boyanmış numuneler üzerinde yapılan yıldırım testleri korumasız KETPK numunelere oranla çok daha fazla hasar oluşturmuştur [37]. Yıldırımın boya sebebiyle yapı üzerinde akamayıp tek bir noktada yoğunlaşması daha yüksek bir akımın yüzeye çarpmasına sebep olmaktadır. Ayrıca dielektrik boya katmanın elektrik arkının yüzeye tekrar bağlanmasını engellediği deneylerle gösterilmiştir [38]. Boyasız ve metal ağ ile korunmuş bir KETPK panelde, ark kökü santimetrelerce uzaktaki noktalara tekrar tekrar bağlanması sürekli akımlarda söz konusudur. Bu tekrar bağlanmalar yıldırım çarpma hasarı düşünüldüğünde son derece faydalıdır çünkü enerji yoğunlaşması engellenmiş olur. Ancak yalıtkan boyalar bu rastgele ark atlamalarını önler ve akımın ve dolayısıyla enerjinin birikmesine neden olurlar.

Lee çalışmasında, geleneksel olan düzlemsel kumaşlara kalınlık yönünde elyafların eklendiği Şekil 2.12.'de tasvir edilen bir çeşit üç boyutlu dokuma kumaş tipi üzerinde yıldırım çarpma testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde, boyalı-boyasız ve düzlemsel kumaş-üç boyutlu kumaş konfigürasyonları farklı tepe akım değerleri altında değerlendirilmiştir. Diğer birçok çalışmada da doğrulandığı üzere boya katmanın varlığı aynı yıldırım akım değerlerinde boyasız duruma göre daha fazla hasarın meydana gelmesine sebep olmuştur. Kalınlık yönünde kullanılan elyaf dokumalı bölgelerde, yıldırım hasarının yayılmasını azalttığı ve özellikle delaminasyon hasar tipinin daha sınırlı kaldığı görülmüştür. Beklenildiği gibi artan yıldırım akım değerlerinde, her iki kumaş tipinde de hasarın arttığı görülmüştür. Yıldırım çarpması sonrası; elyaf kırılması, yüzey erozyonu ve delaminasyon hasarları üç boyutlu kumaş tipi içinde meydana gelmiştir [39].

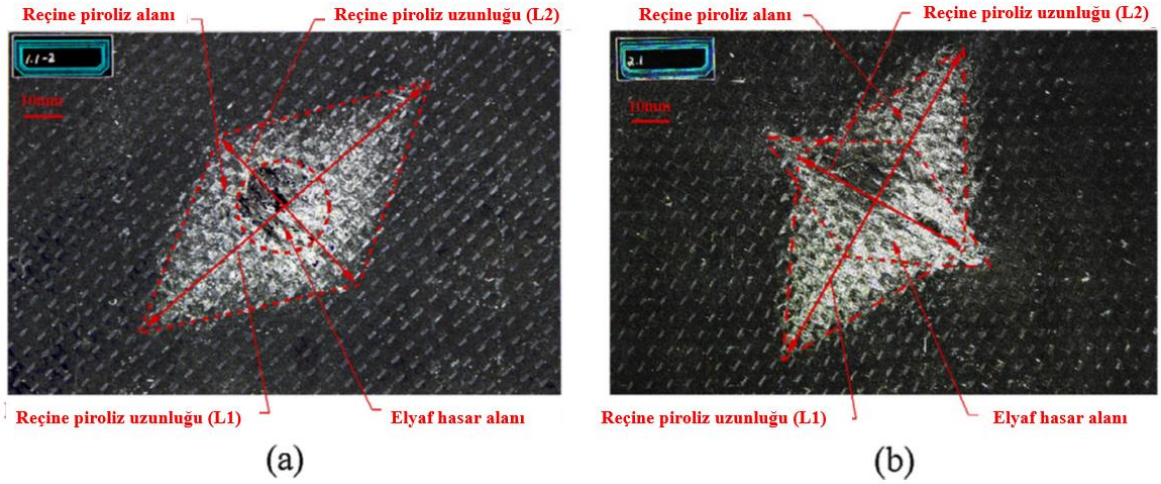


Şekil 2.12. Çok eksenli kumaş şematiği (b) Çok eksenli kuru karbon elyaf kumaş fotoğrafı [39]

2015 yılında farklı iki serim ($[45_2/0_2/-45_2/90_2]$s, $([30_2/0_2/-30_2/90_2]$s) dizilimine sahip karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler özelinde yıldırım testleri yapılmıştır. Resim 2.7 ve Resim 2.8, iki numunenin de 38kA sonrası oluşan delaminasyon ve reçine piroliz bölgelerini göstermektedir. 45 yönünde serilime sahip numunelerde, elmas alan şeklinde reçine piroliz bölgeleri ve yuvarlak alan şeklinde elyaf hasarlı bölgeler oluşmuştur. Delaminasyon alanları iki yönde de ilerlemiştir. 30 yönünde elyaf yönelimine sahip numunelerde ise; elyaf hasar alanı daha geniş alanlı elmas şeklinde, delaminasyon alanı ise elyaf yönü ağırlıklı ilerlemiştir. Her iki serim tipinde yapılan mikroskobik ölçekte incelemelerde, termal-mekanik etkilerden dolayı elyaf ve reçine arasındaki bağlarda zayıflamaların yaşandığı görülmüştür. Yıldırım sonrası yapılan mekanik testlerle, numunelerin yapısal dayanımlarının düştüğü gösterilmiştir [40].

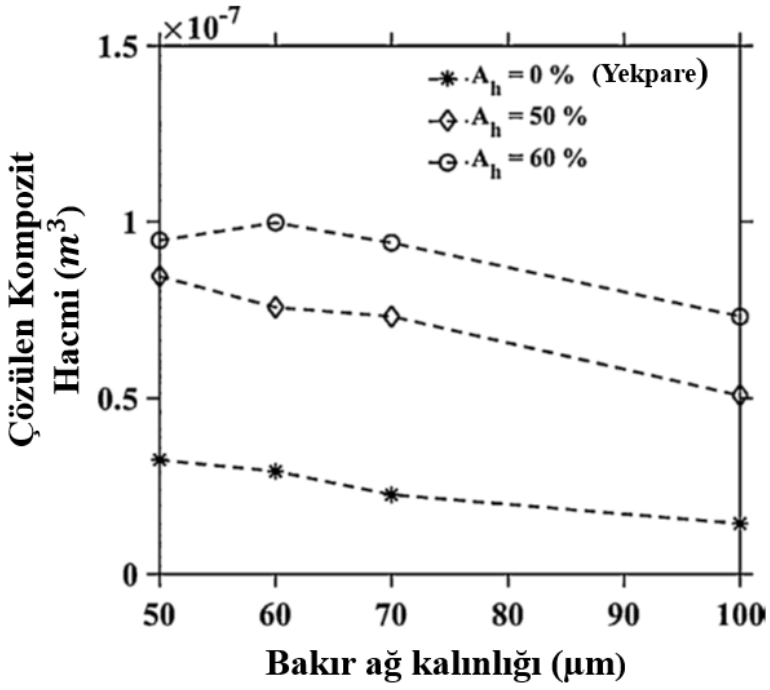


Resim 2.7. 38kA yıldırım tepe akımı sonrası ultrasonik C-tarama sonuçlarının ve reçine piroliz bölgelerinin birleşmiş sonuçları; numune $[45_2/0_2/-45_2/90_2]$s (a), numune $[30_2/0_2/-30_2/90_2]$s [40]



Resim 2.8. 38kA yıldırım çarpması sonrası hasar profilleri numune 45 (a) ve numune 30 (b) [40]

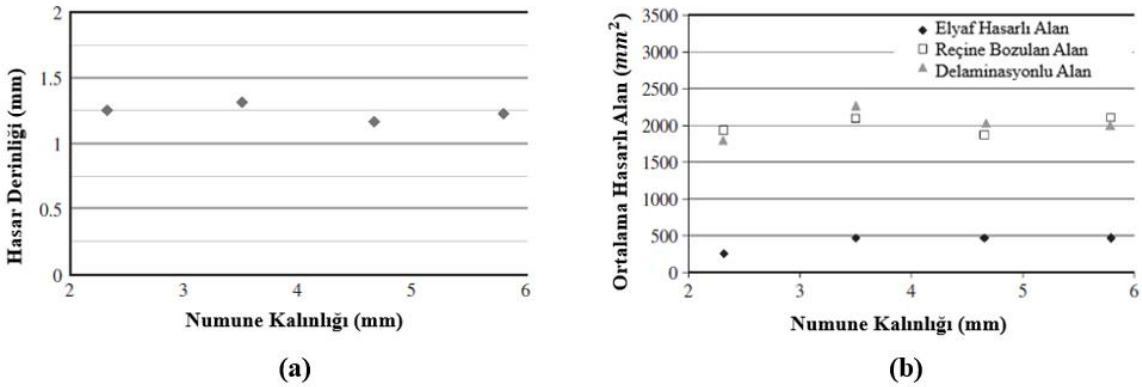
Yıldırımdan koruma yöntemi olarak sıkça tercih edilen gerdirilmiş bakır folyo özelinde nümerik bir çalışma Dhanya ve Yerramalli tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında farklı gerdirilmiş bakır folyo kalınlıklarının ve gözenek genişliklerinin koruma etkisi incelenmiştir. Beklendiği gibi delikler küçüldükçe ve folyo kalınlığı arttıkça koruma özelliği artmakta ama ağırlıkta bir o kadar artmaktadır. Bakır folyo kalınlığı ile ayrılan KETPK arsındaki ilişki Şekil 2.13.'de ifade edilmiştir. Koruma seviyesi ve ağırlık arasında optimum seçimin yapılabilmesi için bazı sonuçlar türetilmiştir [41].



Şekil 2.13. Bakır katmanın kalınlığına göre ayrışan KETPK hacmi [41]

Karbon elyaf takviyeli termoplastik matrisli kompozitler için deneysel yıldırım çarpması çalışması 2017 gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada süreksiz elyaflarla, sürekli elyaflardan üretilen numuneler karşılaştırılmıştır. Ayrıca ince elyaf ve kalın elyaflar kullanılarak yıldırım çarpması altında gösterdikleri davranışlara da bakılmıştır. İnce elyaflardan üretilen numunelerin iki kompozit tipinde de daha iyi yıldırım çarpması dayanımı göstermiştir. Süreksiz elyafların kullanıldığı numuneler, sürekli elyafların kullanıldığı numunelerle benzer yıldırım çapması hasar tiplerini gösterirken, daha fazla alana yayılan ve daha derin hasarların meydana geldiği görülmüştür [42].

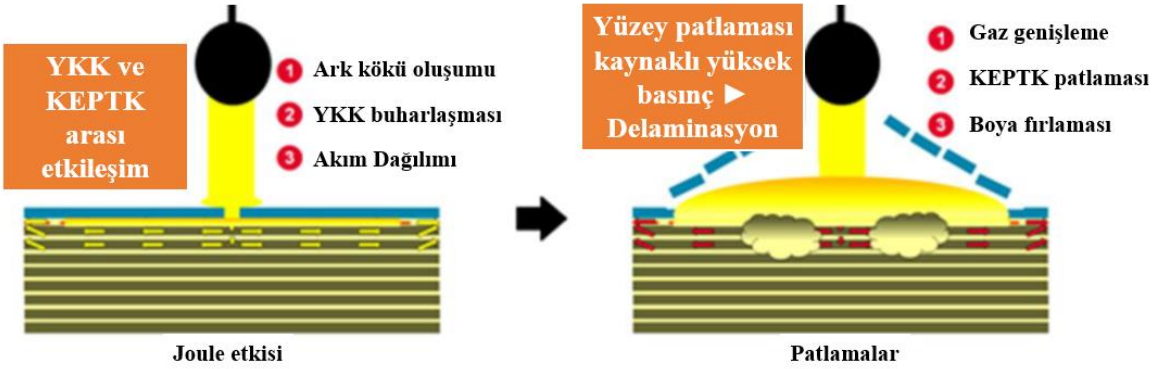
Hirano ve diğerleri tarafından korumasız grafit elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitler üzerinde yapay yıldırım çarpma testleri icra edilmiştir. Yapılan bu çalışma sonucu çıkan hasar tipleri; elyaf hasarı, reçine bozulması ve delaminasyon kategori altında toplanmıştır. Düzlem içindeki hasar ilerlemesinin kompozitin ortotropik elektriksel özellikleri yüksek oranda bağlı olduğu belirtilmiştir. Her hasar modunun farklı bir yıldırım parametresiyle uyumuna dikkat çekilmiştir. Bunlar; elyaf hasarlı alan ve hasar derinliği ile yıldırımın tepe akım değeri, reçine bozulma alanı ve delaminasyon ile elektriksel yük transferi ve verilen enerji arasında şeklindedir. Şekil 2.14'de görüldüğü üzere, numune kalınlığının hasar davranışlarına belirgin bir etkisi görülmemiştir. Numune büyüklüğünün de hasar sonuçlarında dikkate değer bir etkisi gözlenmemiştir. Ayrıca uygulanan dalga formundaki farklılıkların oluşan hasar tiplerine ve büyüklüğüne bir etkisi olmadığı görülmüştür [34].



Şekil 2.14. Numune kalınlığı ve maksimum hasar derinliği ilişkisi (a), numune kalınlığı ve ortalama hasar alanlar arasında ilişki [34]

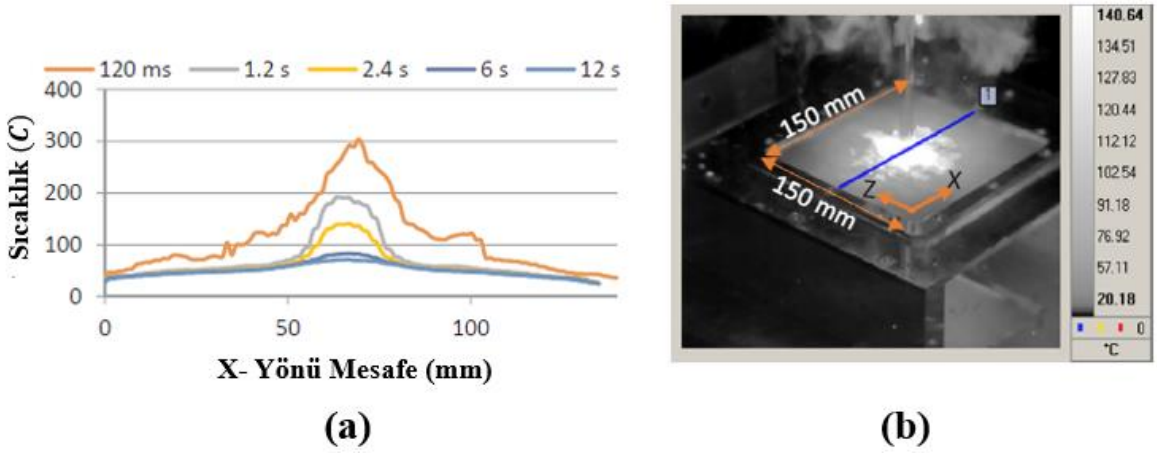
Bigand, KETPK yapılar üzerinde yıldırım çarpması kaynaklı oluşan kuvvet tiplerini ve hasar oluşma sürecini tanımlamıştır. Şekil 2.15.'de görüldüğü üzere, elektrik arkı; akustik şok

formunda mekanik kuvvet, termal fluks ve termal radyasyon oluşturmaktadır. Yıldırım akımının metalik koruma ve kompozit katmanlardan akması; manyetik kuvvet (laplace kuvveti) ve joule ısınmasına sebep olmaktadır. Yıldırım akımı YKK'yi patlama seviyesine kadar getirmektedir. Ancak kalın boya katmanının varlığı akımın YKK yerine KETPK'in ilk katmanına akmasına ve joule ısınması sebebiyle patlamasına sebebiyet verebilmektedir. Gaz patlaması boya tarafından sıkışması sonucu patlama etkisini artırır ve patlama yapıda delaminasyona yol açar. Boyanın varlığı YKK'nin görevini yerine getirmesini önemli ölçüde kısıtlar [43].



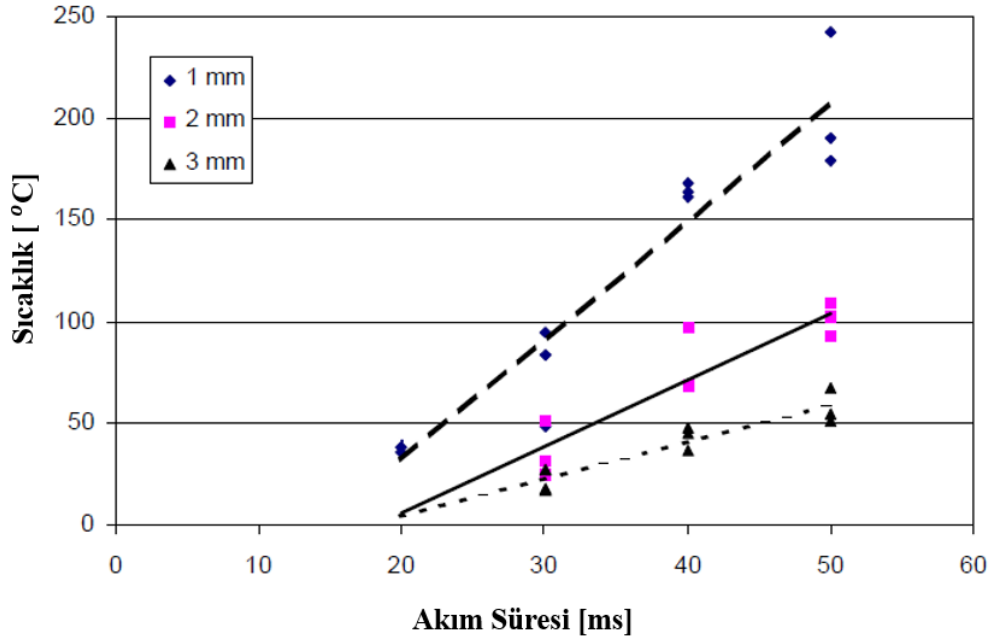
Şekil 2.15. Boyalı KETPK yapılarda yıldırım çarpması kaynaklı hasar oluşma süreci [43]

Reçine iletkenliğini artırmanın yıldırımdan koruma konusunda sağladığı faydalar Kumar ve diğerleri tarafından araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında klasik reçine yerine iletkenliği artırılmış reçineler kullanarak KETPK'lerin kalınlık yönünde iletkenlikleri artırılmıştır. Yıldırım testi uygulanan numunelerde yüzeydeki termal dağılım ölçülmüştür. Şekil 2.16'da görüldüğü üzere numune üzerinde meydana gelen çarpma kaynaklı sıcaklık artışı ark girişim noktasında en yüksek değere ulaşmış ve uzaklaştıkça azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca yıldırım çarpmasının devamında sıcaklığın nasıl azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışma artan reçine iletkenliğinin joule ısınması kaynaklı ısı artışını ve hasarı azalttığını göstermiştir. Termal dağılımın iletkenlikle şekillendiği ve iletkenliğin belirlenmesinde karbon elyafların reçineye göre daha baskın olduğuna değinilmiştir [44].



Şekil 2.16. Numune yüzeyinde ölçülen x-yönünde sıcaklık değerleri (a), yıldırım çarpması anında numune genel görünüm (b) [44]

Farklı kalınlıklardaki karbon elyaf takviyeli ve boyalı numunelerin yıldırım çarpması kaynaklı arka yüzeylerinde meydana gelen sıcaklık artışlarını incelemek için deneyler gerçekleştirilmiştir [38]. Sürekli akım belli bir seviye numuneden aktıktan sonra delaminasyonun başladığı görülmüştür ve delaminasyon sonrası arka yüzeyde dikkate değer sıcaklık artışları gözlemlenmiştir. Şekil 2.17'de farklı kalınlıklara sahip numunelerde sürekli akım karşısında arka yüzey sıcaklık artışları ifade edilmiştir. Kompozit kalınlaştıkça sıcaklık artış hızının düştüğü ve daha düşük sıcaklıkların okunduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklık değişimlerinin lineer bir dağılım gösterdiği Şekil 2.17'den anlaşılmaktadır.



Şekil 2.17. 400 amperlik akım süresine karşı karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin arka yüzeyinde sıcaklık değişimi [38]

Akım transferi

Uçak yüzeylerinde Bölge 3 olarak bilinen yüzeyler yıldırım çarpmasına direk maruz kalmazlar ancak diğer yıldırım çarpan bölgeler arasında elektriksel alım taşırlar. Ark girişimi olmasada KETPK'lerin üzerinden geçen elektriksel akımlar yapısal performansta sıkıntılara ve yeni arkları oluşturarak yakıt patlaması gibi istenmeyen sonuçlara sebep olabilirler.

Penton, karbon ve bor elyaf takviyeli polimer kompozitler üzerinde birçok seviyede yüksek elektriksel akımda itici dalga formları kullanarak çalışmalar gerçekleştirmiştir. Numuneler 3,7 ~ 5,7 x 104 A/cm^2 kadar olan akım değerlerinde düşük hasarlar göstermiştir. Ancak bu seviyenin üzerinde hasarın arttığı ve KEPTK'lerin yapısal bütünlüğünün tamamen bozulduğu görülmüştür. Tek yönelimli numunelerde testler sonrası ayrışma, baloncuk oluşumu ve pul pul dökülme gibi farklı hasar mekanizmaları meydana gelmiştir. Bor ve karbon elyaflarda farklı hasar tipleri görülmüştür. Bordaki hasarın farklılığı tungsten çekirdek ve bor arasındaki termal gerilmelerden kaynakladığı düşünülmüştür. Karbondaki balonlaşma ise geçen akımın ikincil etkilerine dayandırılmıştır. Yani buharlaşan polimer matris kaynaklı hasar yerine iletken ve paralel yerleştirilmiş karbon elyaflar arasındaki akımın büzüşme ve sıkıştırma gibi elektromanyetik etkileri balonlaşmaya neden olmuştur. Kısaca hasar oluşma süreci şu aşamalardan oluşur: 1) elektriksel akım nedeniyle karbon elyaflar ısınır 2) elyaf etrafındaki matris pirolize uğrar 3) piroliz sonucu gaz ortaya çıkar 4) iç basınç kaynaklı patlama meydana gelir 5) sıcak elyaf, piroliz gazları ve hava girişiyle KETPK in yanması. Bu araştırma tek yönelimli laminalar özelinde gerçekleştirilmiştir ve dolayısıyla çok yönlü laminalar hakkında bilgi vermemektedir [45].

3. DENEYSEL PROSEDÜR

Bu bölümde tez kapsamında çalışılmış olan senaryolar ve bu senaryolarda kullanılan numunelerinin belirlenmesi aşamaları anlatılmıştır. Devamında numunelerin geçirdikleri üretim ve kalite aşamaları belirtilmiştir. Bölümün sonunda deney düzeneği ve kullanılan cihaz bilgileri detaylandırılmıştır.

3.1. Senaryoların Belirlenmesi

Kompozit üretiminde reçine emdirilmiş kumaşlar sağladıkları avantajlar nedeniyle sıklıkla tercih edilir. Bu çalışmada iki tip Hexcel'in reçine emdirilmiş karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kumaşları kullanılmıştır. Tek yönelimli M21/IM7 ve twill dokuma M21/AS4C kumaşları tercih edilmiştir. Kumaşların teknik özellikleri Çizelge 3.1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Karbon elyaf takviyeli polimer reçine emdirilmiş M21 kumaşlarının fiziksel özellikleri [46]

Teknik Özellikler	M21/IM7	M21/AS4C
Elyaf Tipi	IM7	AS4C
Dokuma Tipi	Tek Yönelimli (UD)	2x2 Twill Dokuma
Elyaf Kütlesi $[g/m^2]$	194	285
Reçine Emdirilmiş Kütle $[g/m^2]$	294	475
Teorik Kürlenmiş Katman Kalınlığı $[mm]$	0,184	0,285
Teorik Elyaf Hacim Oranı [%]	59,2	55,8
Reçine Yoğunluğu $[g/cm^3]$	1,28	1,28
Elyaf Yoğunluğu $[g/cm^3]$	1,79	1,78
Teorik Tabaka Yoğunluğu $[g/cm^3]$	1,58	1,56

KETPK numunelerin yıldırımdan korunması için iki farklı reçine emdirilmiş gerdirilmiş bakır folyo kullanılmıştır. Bunlardan birincisi ve koruma özelliği daha yüksek olan ECF195. Diğeri koruma özelliği daha az olan ama hafif birim alan ağırlığı olan ECF73 malzemesidir. Kullanılan yıldırımdan koruma katmanlarının teknik özellikleri Çizelge 3.2.'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. Gerdirilmiş bakır folyoların fiziksel ve elektriksel özellikleri [47]

Teknik Özellikler	ECF195	ECF73
Ağırlıkça Reçine Oranı [%]	43	67
Ana Materyal	99.9 % Bakır	99.9 % Bakır
Alansal Ağırlık $[g/m^2]$	195 ∓ 20	73 ∓ 8
Metal Kalınlığı $[\mu m]$	76 ∓ 8	51
Uzun Köşegen $[mm]$	$2{,}54 \mp 0{,}13$	-
Kısa Köşegen $[mm]$	$1{,}23 \mp 0{,}12$	-
Boş Alan Yüzdesi [%]	$71 \mp 3{,}5$	85
Reçine Emdirilmiş Kütle $[g/m^2]$	360 ∓ 40	258 ∓ 23
Reçine Yoğunluğu $[g/cm^3]$	1,54	1,28
UEK Yönünde Yüzey Direnci $[\mu\Omega/kare]$	$\leq 1{,}1$	$\leq 2{,}5$
KEK Yönünde Yüzey Direnci $[\mu\Omega/kare]$	$\leq 3{,}6$	$\leq 8{,}2$

Karbon elyaf takviyeli reçine emdirilmiş kumaş ve koruma katmanı seçildikten sonra gerçekçi senaryoların belirlenmesi için aşağıdaki kompozit tasarım kriterleri dikkate alınmıştır [48].

- Simetrik serim dizilimi uygulanması istenmeyen ve analiz etmesi de zor olan bükülme etkileşiminin oluşmasını engeller.
- Tabakada her +yöndeki bir katman için – yöndeki bir katmanın bulunmasına denge denir. Katman dağılımının dengeli olması gerekir. Dengeli dağılım bükülme /burulma etkileşiminin oluşmasını engeller.
- 0, 45, -45, 90 ana yönlerinin her birinden en az %10 tabaka içinde sağlanmalıdır. Bu dağılım yapıyı ikincil yük koşullarına karşı korur ve erken bir kopma yaşanmasının önüne geçer.
- Düşük hızlı darbe kaynaklı hasara direnci artırmak için en dış katmanlarda +-45 yönlü katmanlar kullanılır.
- +-45 yönlü katmanlar kayma rijitliği ve mukavemetin artmasını sağlar. Dolayısıyla kabuk parçalarının +-45 yönlü katmanlarla domine edilmelidir.
- Bağlayıcılar etrafında yük transferini geliştirmek için en az %40 oranında +-45 yönünde katmanların kullanılması gerekir.
- Üst üste aynı yönlü katmanların kullanılmasının minimize edilmesi gerekir. Bu olgu matriste bir çatlağın yaşanıp tüm katman boyunca ilerlemesine neden olabilir.
- Kalınlık 0,5-0,6 mm'den daha az olmamalıdır. Düşük kalınlıklarda nemin içeri sızması mümkün hale gelir.

Numunelerde kullanılacak malzemeler ve tasarım kriterleri belirlendikten sonra Çizelge 3.3.'de ki test matrisi oluşturulmuştur. Test matrisi oluşturulurken iki farklı kumaş tipide ayrı ayrı kullanılmıştır. 1 den 16 ya kadar olan numunelerde tek yönelimli M21/IM7 kumaşı kullanılmıştır. 17 den 23 ye kadar olan numunelerde ise twill M21/AS4C kumaşı tercih edilmiştir. Böylece iki kumaş tipide ayrı ayrı incelenerek kıyaslaması sağlanmıştır. Numunelerin kalınlıkları yukarda bahsi geçen kompozit tasarım kurallarına bağlı kalarak farklılaştırılmıştır. Böylece iki kumaş tipi için de kalınlık etkisi görülmüş olacaktır. Çizelge 3.1.'de gösterilen kalınlıklar yapısal kumaşlardan gelen kalınlıklar olup, koruma katmanları ve boya kalınlıkları gösterilmemiştir. Koruyucu katman ve boya kalınlıklarının numuneler arasında çok farklılık göstermemesi sebebiyle sadece yapısal katmanların kalınlık etkisine odaklanılmıştır. Gerdirilmiş bakır folyoların koruma etkisini görmek amacıyla; korumasız numuneler, bir kat $73\ g/m^2$ ECF, bir kat $195\ g/m^2$ ECF, iki kat $73\ g/m^2$ ECF, bir kat $73\ g/m^2$ ECF ve bir kat $195\ g/m^2$, iki kat $195\ g/m^2$ ECF olacak şekilde farklı kombinasyon numunelere eklenmiştir. Hava araçlarını maruz kaldığı gerçek yıldırım koşulları düşünülerek numuneler farklı yıldırım bölgelerini temsil eden ve SAE tarafından belirlenmiş test koşullarına tabi tutulacaktır. Yıldırım bölgeleriyle ifade edilen bu kavramlar tepe akımı, verilen enerji, yük transferi gibi farklı yıldırım parametrelerini içerdiği literatür kısmında detaylı olarak değinilmiştir. 1B bölgesi iniş takımları için kritik olduğu için test parametresi olarak kullanılmamıştır. 1C bölgesi ise 1A ve 2A bölgeleri arasında kalan bir bölge olduğu için testlerde tercih edilmemiş daha belirgin farklılıklar içeren 1A ve 2A bölgelerine odaklanılmıştır. Sonuç olarak yıldırım dalga formlarının belirgin olarak farklılaştığı 1A, 2A, 2B ve 3 bölgeleri bu çalışmada tercih edilmiştir. Testlerle; kalınlık, kumaş ve koruma katmanlarının farklı yıldırım tipleri karşısında gösterdiği davranışlar görülmüş olacaktır.

Boya ve astarlar dielektrik yapıdadır. Dolayısıyla boya ve astar kalınlığı ne kadar fazla olursa yapı yıldırım çarpması sonucu o kadar fazla hasar alır. Bunun nedeni yıldırım akımının iletken olmayan yüzeyden akamayıp birikme yapması sonucu artarak etki etmesidir. İlk astar katmanı $40\mu m - 50\mu m$, ikinci astar katmanı $15\mu m - 25\mu m$, boya katmanı ise toplamda $250\mu m - 270\mu m$ aralığında olacak şekilde uygulanacaktır. Böylece normal bir uçak yapısında izin verilen maksimum boya kalınlığı sağlanmış olacaktır. Boya rengi olarak havacılık standardında FED- STD-595 – 17925 Untinted White kodlu beyaz renk tercih edilecektir [49].

KEPTK yapılar genelde uçaklarda dış yüzeylerde kullanıldığından, yakıt tankının bulunduğu kanat ve gövde gibi kısımlarda sıkça kullanılmaktadır. Yıldırım çarpması sonucu yakıt tankı içine kıvılcım atması yakıtın yanmasıyla sonuçlanabilir. Alev ya da kıvılcım olmadan yakıtın alev alması olayına ise ‘’sıcak yüzey ateşlemesi’’ denir. Kıvılcım ya da alev oluşması için gerekli yüksek enerji her yıldırım çarpması sonucu oluşmasada çarpma yüzeyinde sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Bu sıcaklık artışı yakıt buharının kolayca alev almasına sebep olabilir. Jet A uçak yakıtı için $210\ ^{o}C$ seviyesinde yüzey sıcaklığı alev almaya sebep verebilmektedir [50]. Bu çalışma kapsamında numunelerin arka yüzeyinde oluşacak sıcaklık değerleri ölçülecek ve $200\ ^{o}C$ değerini geçip geçmediği incelenecektir. Böylece numune kalınlığının, koruma katmanının, yıldırım bölgesinin, kumaş tipinin arka yüzey sıcaklığı ile ilgili olan ilişkisi anlaşılmış olacaktır.

Çizelge 3.3. Numuneler ve özellikleri

Numune	Twill Kumaş Katman Sayısı	Tek Yönelimli Kumaş Katman Sayısı	Toplam Kalınlık [mm]	Serim Yönü Dağılımı	Koruma Katmanı/Katmanları	Yıldırım Bölgesi
1	0	8	1,472	[25/50/25]	73 g/m^2 ECF	2A&2B
2		10	1,84	[40/40/20]	73 g/m^2 ECF	2A&2B
3		12	2,208	[33/50/17]	Korumasız	3
4					195 g/m^2 ECF	1A
5					73 g/m^2 + 195 g/m^2 ECF	1A
6					2 × 195 g/m^2 ECF	1A
7					73 g/m^2 ECF	1A&2A
8					2 × 73 g/m^2 ECF	1A&1A&2A
9					73 g/m^2 ECF	2A&2B
10		16	2,944	[38/50/12]	Korumasız	1A
11					Korumasız	2A&3
12					195 g/m^2 ECF	1A
13					73 g/m^2 ECF	1A&1A&2A

Çizelge 3.4. (devam) Numuneler ve özellikleri

Numune	Twill Kumaş Katman Sayısı	Tek Yönelimli Kumaş Katman Sayısı	Toplam Kalınlık [mm]	Serim Yönü Dağılımı	Koruma Katmanı/Katmanları	Yıldırım Bölgesi
14		16	2,944	[38/50/12]	73 g/m^2 ECF	2B
15		20	3,68	[30/60/10]	195 g/m^2 ECF	1A
16					73 g/m^2 ECF	1A&2A
17	6	0	1,71	[17/66/17]	195 g/m^2 ECF	1A
18					2×195 g/m^2 ECF	1A
19	8		2,28	[25/50/25]	195 g/m^2 ECF	1A&2A
20					2×195 g/m^2 ECF	1A
21	10		2,85	[20/60/20]	195 g/m^2 ECF	1A
22					2×195 g/m^2 ECF	1A&1A
23	12		3,42	[25/50/25]	195 g/m^2 ECF	1A

Testler sonrası numuneleri kıyaslamak için parametrelerin sabit tutulup incelenecek olgunun değerlendirilmesi gerekir. Kalınlık etkisini incelemek için:

- Tek yönelimli kumaş - Korumasız – Bölge 3A : 3 ve 11 numaralı numuneler
- Tek yönelimli kumaş - 73 g/m^2 ECF – Bölge 1A : 7, 13 ve 16 numaralı numuneler
- Tek yönelimli kumaş - 73 g/m^2 ECF – Bölge 2A : 1, 2, 7, 9, 13 ve 16 numaralı numuneler
- Tek yönelimli kumaş - 73 g/m^2 ECF – Bölge 2B : 1, 2, 9 ve 14 numaralı numuneler
- Tek yönelimli kumaş - 195 g/m^2 ECF – Bölge 1A : 4, 12 ve 15 numaralı numuneler
- Twill kumaş - 195 g/m^2 ECF – Bölge 1A : 17, 19 ve 21 numaralı numuneler
- Twill kumaş – $2x195$ g/m^2 ECF – Bölge 1A : 18, 20 ve 22 numaralı numuneler karşılaştırılacaktır.

Koruma katmanı etkisini incelemek için:

- Tek yönelimli kumaş – 2,208mm – Bölge 1A : 7, 8, 4, 5 ve 6 numaralı numuneler
- Tek yönelimli kumaş – 2,208mm – Bölge 2A : 7 ve 8 numaralı numuneler
- Tek yönelimli kumaş – 2,944mm – Bölge 1A : 10, 13 ve 12 numaralı numuneler
- Tek yönelimli kumaş – 2,944mm – Bölge 2A : 11 ve 13 numaralı numuneler
- Tek yönelimli kumaş – 3,680mm – Bölge 1A : 16 ve 15 numaralı numuneler
- Twill kumaş – 1,71mm – Bölge 1A : 17 ve 18 numaralı numuneler
- Twill kumaş – 2,28mm – Bölge 1A : 19 ve 20numaralı numuneler
- Twill kumaş – 2,85mm – Bölge 1A : 21 ve 22 numaralı numuneler

karşılaştırılacaktır.

Yıldırım bölge etkisini incelemek için:

- Tek yönelimli kumaş – 73 g/m^2 ECF – 2,208mm : 7 ve 9 numaralı numuneler
- Tek yönelimli kumaş – 73 g/m^2 ECF – 2,944mm : 13 ve 14 numaralı numuneler

karşılaştırılacaktır.

Kumaş tipinin etkisini incelemek için:

- 195 g/m^2 ECF – Bölge 1A : 4, 12, 15-17, 19, 21 ve 23

numaralı numuneler karşılaştırılacaktır.

3.2. Elle Serim

Numunelerin üretilmesi için elle serim yöntemi uygulanmıştır. Elle serim yöntemi havacılık sektöründe uzun yıllardan bu yana kullanılmaktadır. Numunelerin düz ve serimi kolay şekilleri nedeniyle elle serim yöntemi tercih edilmiştir. Serim işlemleri sonrası numuneler kürlenmesi için otoklav olarak isimlendirilen yüksek basınçlı fırınlara yerleştirilmiştir.

Serim işlemine başlamadan önce numunelerde kullanılacak malzemelerin hazırlanması gerekmektedir. Önceden reçine emdirilmiş karbon kumaşlar ve yapıştırıcılar oda sıcaklığında kürlenmeye başladıklarından özel soğutucu dolaplarda saklanmaktadır. Bu soğutucu dolaplar en fazla $-18\,^{o}C$ sıcaklıkta sürekli çalışmaktadır. Önceden reçine

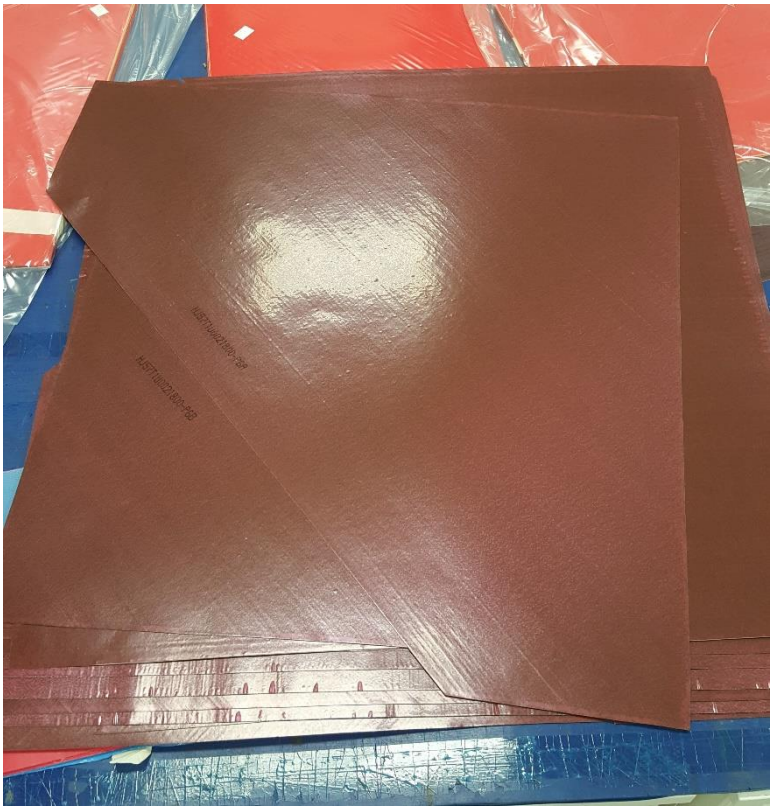
emdirilmiş kumaşlar dolapların içinde özel nem mühürlü torbalarda bulunur. Dolaptan çıkan kumaşlar yumuşamaya bırakılır. Eğer bu esnada torbaların içinde nem oluşumu gözlenirse bu malzemeler kullanılmaz.

Dolaptan çıkarılan malzemelerin serim için uygun geometrilerde kesilmesi için otomatik kumaş kesme makinesine aktarılmıştır. Basit kare numuneler için gerekli kumaşlar elle de kesilebilecek kolaylıkta olsalarda, elle kesim işlemi daha uzun sürecek ve malzemelerin ömürlerinden kayıba neden olacaklardır. Kesim için Resim 3.1'de görünmekte olan Gerber Z1 Cutter makinası kullanılmıştır.



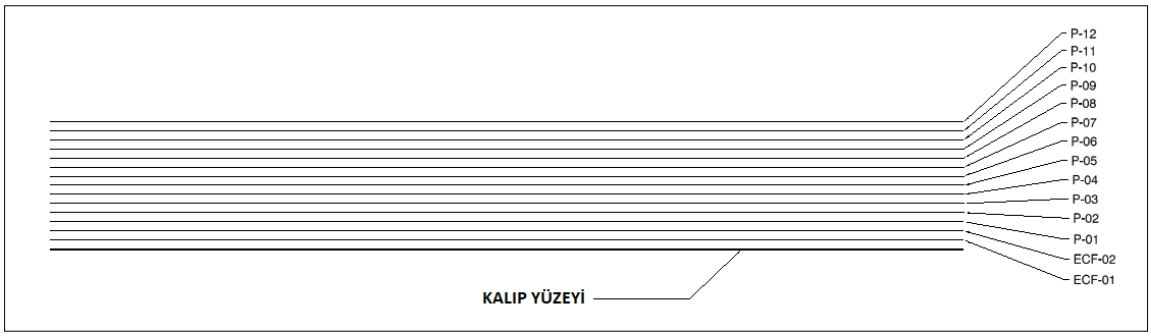
Resim 3.1. Gerber Z1 cutter

Her bir numune için gerekli olan kumaş katmanları Resim 3.2'de görüldüğü gibi ayrı ayrı elde edilmiş ve tasniflenmiştir.

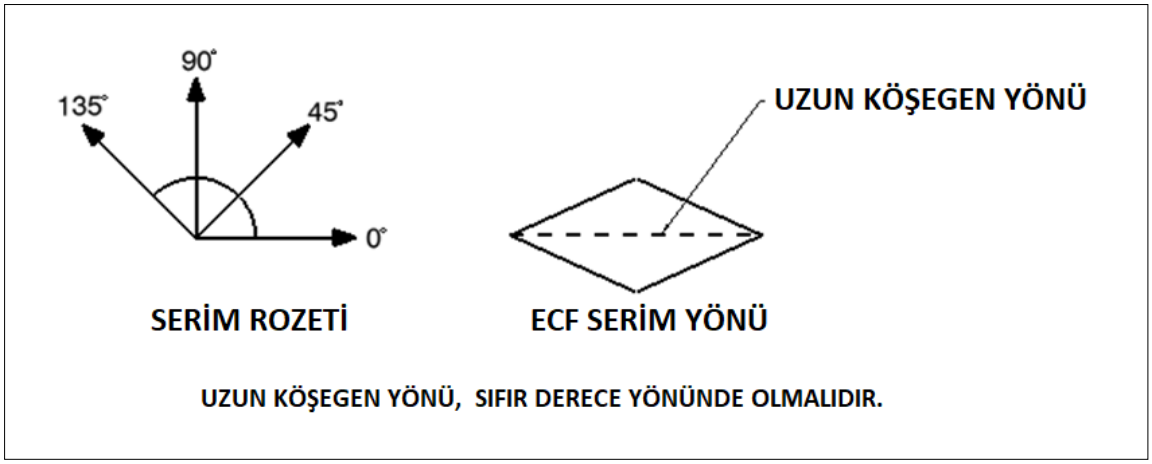


Resim 3.2. Serim için kesilmiş numuneye özel katmanlar

Serim için düz temiz bir yüzey hazırlanmıştır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi numunelerin serim dizilimlerine ve Şekil 3.2'de ki serim rozet ve yönlerine bağlı kalarak serim işlemi uygulanmıştır. Yıldırım koruma katmanı olarak kullanılan ECF katmanlarının serim yönü yıldırım testlerinin doğruluğu açısından önemlidir. ECF'lerin uzun köşegen yönü rozette sıfır yönüyle eşleştirilmiştir.

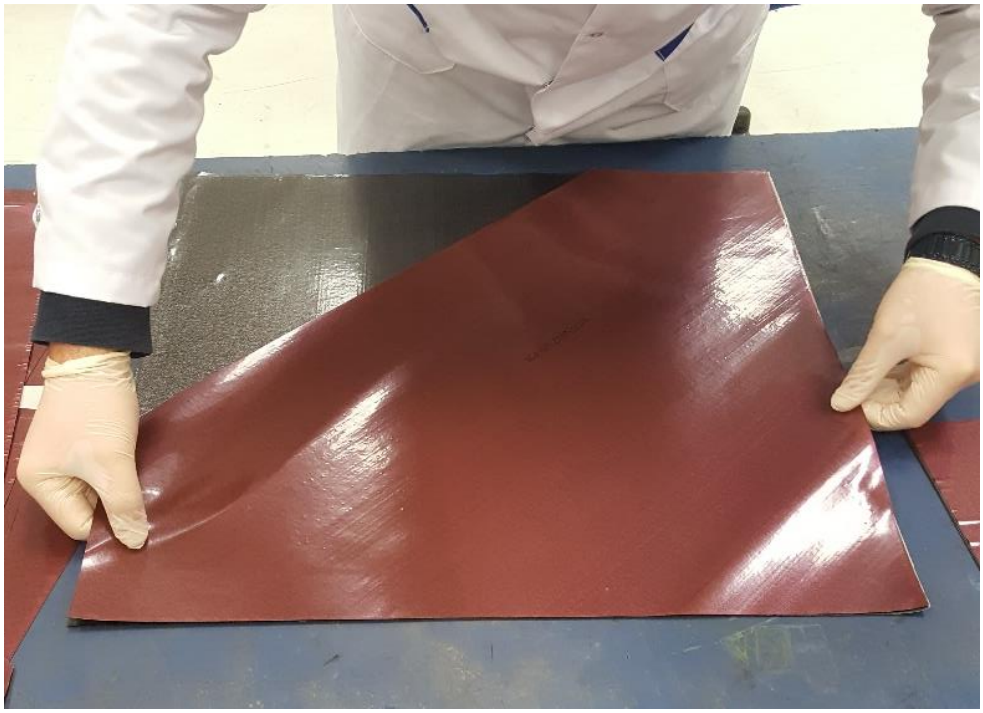


Şekil 3.1. Bir numune için örnek serim dizilimi



Şekil 3.2. Katmanlar için kullanılan serim rozeti ve yönleri

Resim 3.3'te birbiri üzerine gerçekleştirilen katman serimi uygulaması gösterilmektedir. İşlem sırasında tüm katmanların olması gerektiği yere serildiği kontrol edilir ve sonraki katmanın serime başlanmadan önce serilen katman üzerindeki koruyucu bant tabakası sökülür.



Resim 3.3. Katman serimi

Serim esnasında tabakaların daha iyi yapışması, katmanların kırışmaması ve katmanlar arasında boşluk kalmasının engellemesi için her dört katmanda bir baskı uygulanır. Resim 3.4'de gösterilen baskı işleminde en az 5 dakika boyunca -66Kpa basınç uygulanır.



Resim 3.4. Baskı uygulaması

Numunelerin tüm katmanlarının serimleri gerçekleştirilmiş ve sonraki işlemler için hazır hale getirilmiştir. Tüm bu işlemler temiz odada gerçekleştirilmiştir.

3.3. Kürleme

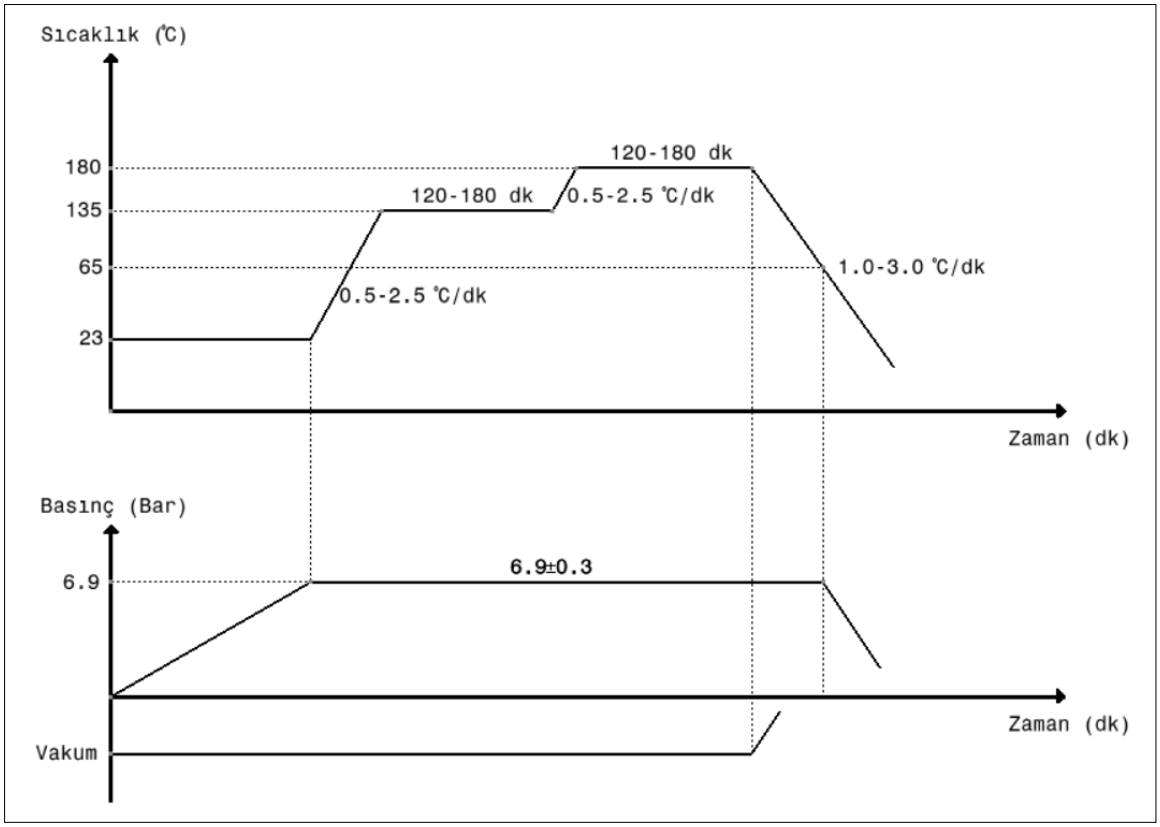
Serim işlemi bitmiş olan numuneler kürleme aşamasına hazır hale getirilmiştir. Resim 3.5'te gösterilen otoklav kürleme işlemi için kullanılmıştır.



Resim 3.5. Otoklav

Monolitik numunelerin kürlenmesi için Şekil 3.3'te gösterilen kürleme döngüsü uygulanmıştır. Kürleme işlemi için dikkat edilen bazı hususlar:

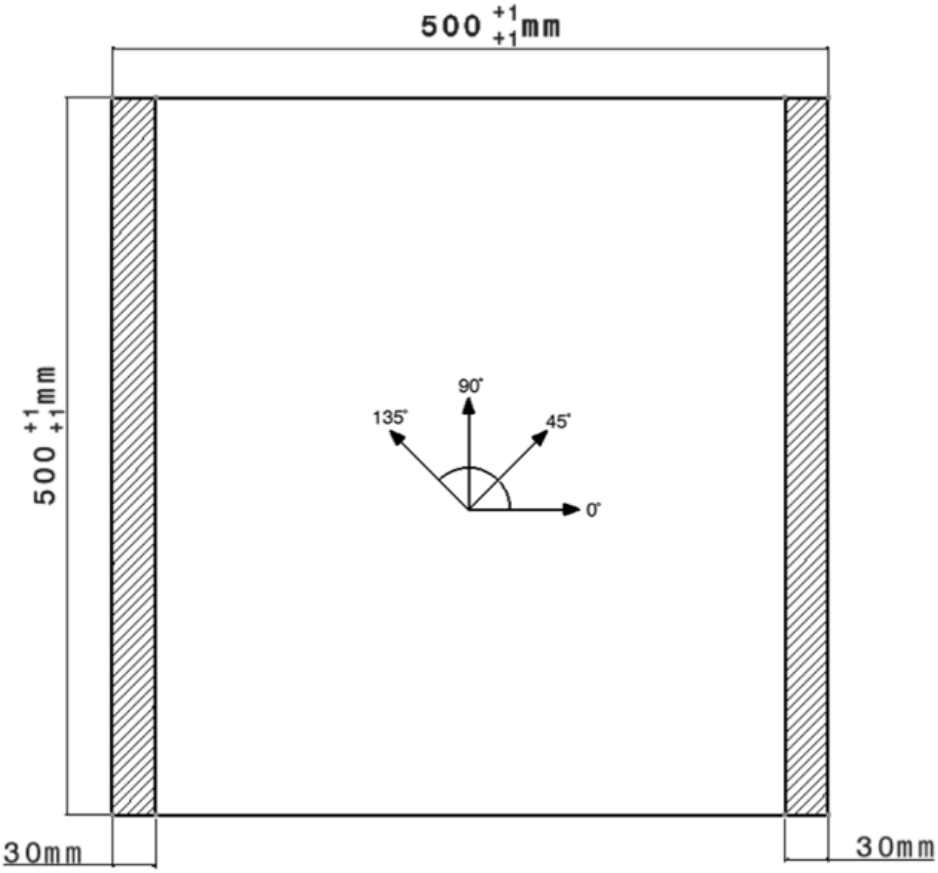
- Kalibrasyonu yapılmış ve birbirini doğrulayan iki adet ısılçift kullanılmıştır.
- Kullanılan ısılçiftler $\pm$ 3 ^{o}C tolerans aralığında çalışmaktadır.
- Numuneler tüm kürleme işlemi boyunca 650 mmHg vakum altında tutulmuştur ve vakumlama işlemi için sadece bir tane vakum portu kullanılmıştır. Kürleme işlemi öncesi vakum basıncı sızdırmazlığı kontrol edilmiştir.
- Otoklav basıncı 6,9 $\pm$ 0,3 bar değerine çıkarılmış ve kürleme bu basınç değerinde yapılmıştır.
- Özellikle numune ve kalıp malzemelerinin farklı olması ve sıcaklık değişimi kaynaklı çarpılmaların önüne geçilmesi için iki aşamada ısıtma işlemi uygulanmıştır. 0,5 $-$ 2,5 ^{o}C/dk ısıtma hızıyla oda sıcaklığındaki numuneler ısıtılmış ve 135 ^{o}C'de 120 -180 dk bekletilmiştir. Sonrasında tekrar aynı ısıtma hızı ile 180 ^{o}C'ye getirilmiş ve 120 - 180 dk bekletilmiştir. 1,0 $-$ 3,0 ^{o}C/dk hız ile numuneler soğutulmuş, otoklav ve vakum basıncı zamanla azaltılarak tamamen kaldırılmıştır.



Şekil 3.3. Kürleme Döngüsü

3.4. İlave Üretim Aşamaları ve Muayene

Otoklavdan çıkan numunelerin üzerlerindeki vakum basıncı kaldırılıp, sıcaklığın $60\ ^oC$'den düşük olduğu kontrol edilip ve kalıp çıkarma işlemine geçilmiştir. Teflon spatula ve plastik tokmaklar yardımıyla numuneler kalıptan ayrılmıştır. Numuneler üretim kaynaklı yaşanabilecek köşe-kenar hatalarını düşünerek $550 \times 550\ mm$ ölçülerinde üretilmiştir. Ancak Şekil 3.4'de gösterildiği gibi son numune boyutuna toleranslar dahilinde getirmek için kesim işlemi uygulanmıştır. Kesim ve çapak temizleme işlemleri sonucu numune $500 \times 500\ mm$ ölçülerine getirilmiştir.



Şekil 3.4. Net numune geometrisi ve boyasız bölgeler

Kesme işlemi sonucu istenilen ölçülere getirilen numuneler üzerinde tahribatsız muayene yaparak numunelerin istenilen kalitede üretilip üretilmediğinin kontrol edilmesi gerekmektedir.

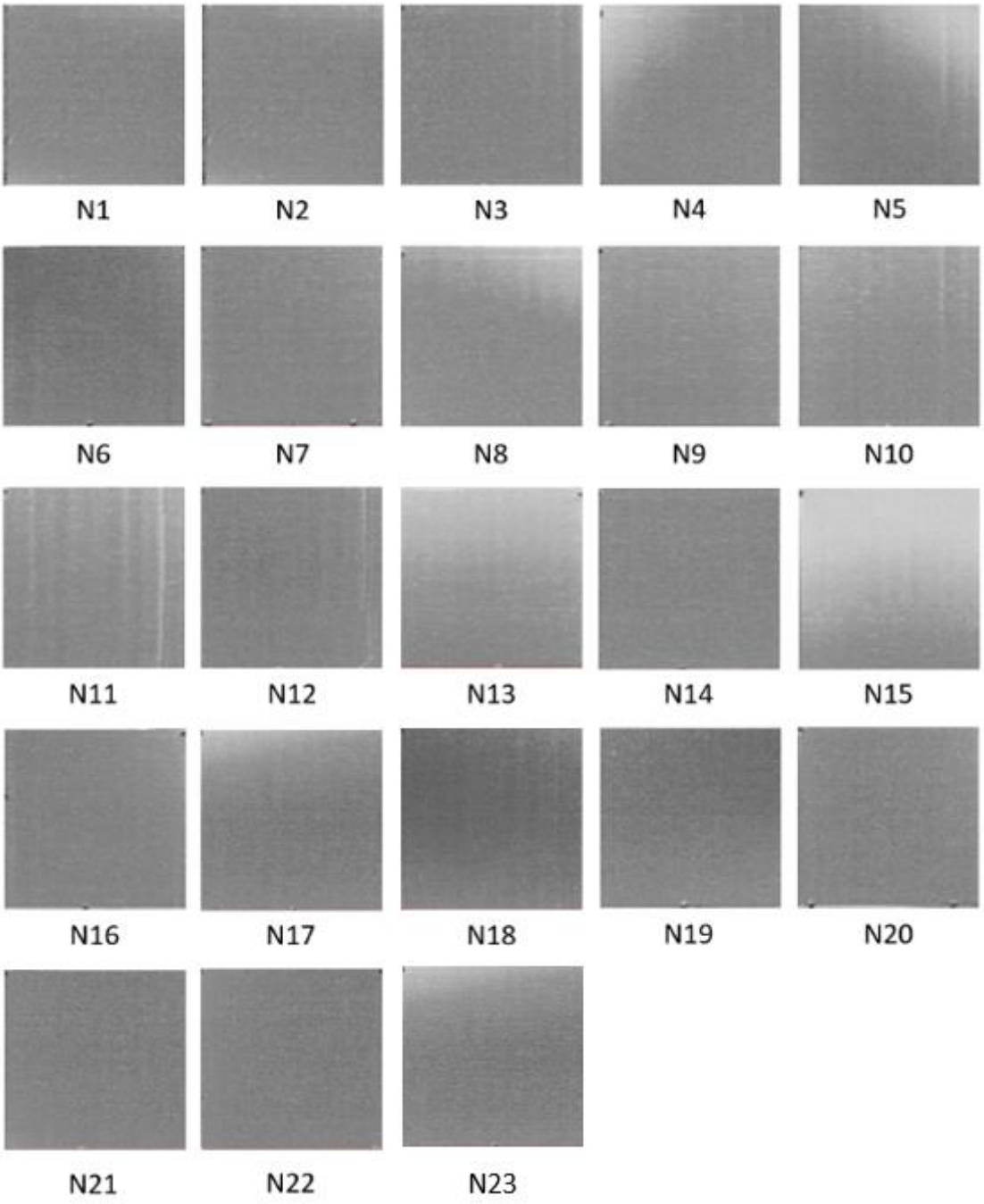
Ultrasonik muayenede de yüksek ses dalgaları kullanılır. Ses dalgaları yolları üzerinde bir engel ile karşılaşırlarsa çarparak yansırlar. Çarpma sonrası sinyaller açıya bağlı olarak proba ya da prob dışına gelirler. Eğer yansıyan sinyaller alıcı proba ulaşırsa muayene cihazında yankı görüntülenir. Yansıma ara yüzünün konumu yankıya göre hesaplanabilir. Yankı incelenerek yansıtıcının büyüklüğü ve türü hakkında yorum yapılabilir. Ultrasonik muayene hem metal yapıların hem metal dışı yapıların içindeki hacimsel hataların ve yüzeyde bulunan çatlak türü hataların tespiti için kullanılabilir. Bu yöntemde bazı sınırlamalar vardır. Sesin hız ve gücü gibi bazı özelliklerinin muayene parçasının bazı bölgelerinde güçlü değişimler göstermesi muayene doğru değerlendirme yapmayı güçleştirir. Tane yapısı iri olan ve/veya soğurma özellikleri yüksek olan malzemelerde muayene zor hatta imkansız hale gelebilir. Sıcak muayene yüzeylerinde, bu koşullarda çalışması için tasarlanan özel problar tercih

edilir. Yüzey özellikleri muayeneyi etkileyen anahtar faktörlerden biridir. İnce et kalınlığına sahip parçaların muayenesi kalın parçalara göre daha güçtür. Düzlemsel düzensizliklerin tespitini kolaylaştırmak için referans bloklar kullanılabilir. Muayene edilecek parçanın malzemesinin mikroyapı özelliklerine göre farklı frekans değerleri kullanılır. Ses dalgalarının muayene parçasına geçişini kolaylaştırmak için prob gezdirilirken yağ, gres, su gibi temas sıvıları kullanılır. Muayene için genellikle boyuna ve enine dalga türleri kullanılır. Dalga türleri de yine parçanın özelliklerine göre belirlenir. Çalışma kapsamında Resim 3.6.'da görünmekte olan Tecnatom marka tahribatsız ultrasonik muayene cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.6. Tecnatom ultrasonik tahribatsız muayene makinası

Tez kapsamında çalışılan numunelerin hepsinin monolitik yapıda olması yani çekirdek içermemeleri nedeniyle, muayene sırasında frekans olarak 5Mhz değeri kullanılmıştır. Resim 3.7'de, numunlerin ultrasonik tahribatsız muayene sonrası elde edilen sonuçları gösterilmiştir.



Resim 3.7. Kürleme sonrası numunelerin ultrasonik muayene sonuçları

Ultrasonik muayene işlemi sonucu sorunsuz olduğu görülen numuneler boyama aşamasına geçmiştir. Boya sadece parçanın kalıp yüzeyine bakan yüzeyine uygulanmıştır. Boya işlemine başlamadan önce Şekil 3.9.'da gösterildiği gibi parçanın iki kenarı 30 mm genişliğinde maskelenir. Bu bölgelerin boyanması engellenerek bakır korumanın açıkta kalması sağlanmıştır. Boyanmayan bu yüzey akımın tahliyesi ve parçanın elektriksel direncinin ölçülmesi için kullanılmıştır. Maskelenen numunelere ilk olarak astar boya uygulanmıştır. Astarın kalınlığı $40\ \mu m - 50\ \mu m$ arasındadır. İlk astar boya sonrası ikinci

astar boya $15\ \mu m - 25\ \mu m$ kalınlığında olacak şekilde uygulanır. Astar boya işlemi tamamlanan numunelere dış boya uygulanmıştır. Dış boya beyaz renktedir ve toplam kalınlığı $250\ \mu m - 270\ \mu m$ olacak şekilde her katmanda $43\ \mu m - 58\ \mu m$ kalınlığında uygulanmıştır. İşlem sonrası boya kalınlıkları eddy akım metodu ile kontrol edilmiştir. Boya sonrası numuneler Resim 3.8'de gösterildiği gibi test aşamasına hazır hale getirilmiştir.



Resim 3.8. Boyama işlemi sonrası numune

3.5. Test Düzeneği ve Testin İcrası

SAE ARP5412 [7] ve SAE ARP5414 [15] kaynaklarına göre yıldırım çarpması doğrudan etkileri ark girişimi ve akım transferi şeklinde iki test çeşidi altında uygulanır. Bu çalışmada yıldırım çarpma düzeneği, elektrotlarda küçük değişiklikler yapılarak sadece ark girişim testlerinin icrasında kullanılmıştır. Yıldırım akımı sivri elektrot ucu ve düz numune yüzeyinin arasında meydana gelmiştir.

Test mekanizması bir adet yüksek voltaj kapasitörü, yüksek voltaj dirençleri, bir elektrot, bir anahtar, bir numune tutma düzeneği ve akım topraklama hattından oluşmaktadır. Jeneratör, SAE ARP5412'de bahsi geçen akım dalga formlarını oluşturabilecek güçte tasarlanmıştır.

İstenilen test akımı dalga formlarının üretilmesi, kapasitörlerin voltaj yükü ve kapasitör ile numune arasındaki dirençlerin ayarlanmasıyla gerçekleştirilir. Kapasitörden çıkan akım, direnç ile yavaşlatılarak istenilen dalga formu elde edilir. A ve D bileşen dalga formları 52 μF kapasitör banklarının 75 kV'a kadar yüklenmesiyle elde edilir. B ve C bileşen dalga formları 1080 μF kapasitör bankının ve 1890 μF kapasitör bankının 10 kV'a kadar yüklenmesiyle elde edilir. İndüktans ve direnç yardımıyla devreden çıkış değeri yönetilir.

Numuneler köşelerinden bakır saclarla desteklenir ve tüm düzenek tahta parçalarla bir arada tutulur. Numunenin bağlandığı yerin altında Resim 3.9'da gösterilen karanlık hazne bulunur. Karanlık hazne içerisinde konumlanan termal kamera sayesinde numune arkasında meydana gelen sıcaklık değişimleri takip edilir. Resim 3.10'da olası elektrik atlamaları ve kaçaklarına karşı kullanılan tahta test düzeneği görülmektedir. Düzenekteki bakır saclar bakır kayışlarla topraklama hattına bağlanır. Numunenin tam ortasına denk gelecek şekilde bakır elektrot yani yıldırım çarpma ucu ayarlanır. Elektrotun ucu ve numune yüzeyi arasındaki mesafe 50 mm olacak şekilde yerleştirilir. Arkın hareketini kısıtlamak amacıyla numunelerin üst yüzeylerinin belli bir kısmı dielektrik malzemeyle kaplanır. Test icrasıyla elektrot ucundan numune yüzeyine ark yollanmıştır.

Test süresince ortam sıcaklığı $20\ ^oC \mp 15\ ^oC$ arasında, nem ise $\%40 \mp \%20$'dir.



Resim 3.9. Karanlık hazne düzeneği



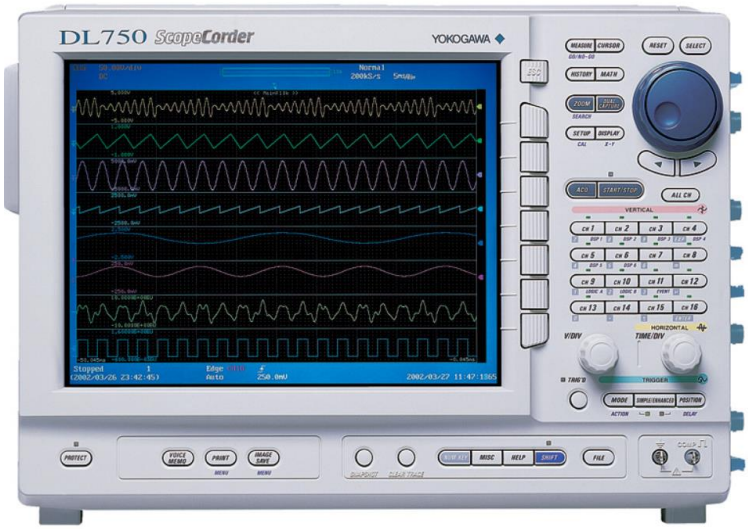
Resim 3.10. Tahta test düzeneği

Testler için kullanılan yüksek voltaj düzeneği Resim 3.11’de gösterilmiştir.



Resim 3.11. Yüksek voltaj düzeneği

Akım ölçümü ve kayıt işlemleri için Resim 3.12'de gösterilen DL750 ScopeCorder cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.12. DL 750 ScopeCorder

Transformatör olarak Resim 3.13'te gösterilen ISM 200 tercih edilmiştir.



Resim 3.13. ISM 200

Miliohmmetre olarak Resim 3.14'de gösterilen DLRO10HD tercih edilmiştir.



Resim 3.14. DLRO10HD

Sıcaklık ve nem değerlerinin ölçülmesi için Resim 3.15’te gösterilen TESTO-171 kullanılmıştır.



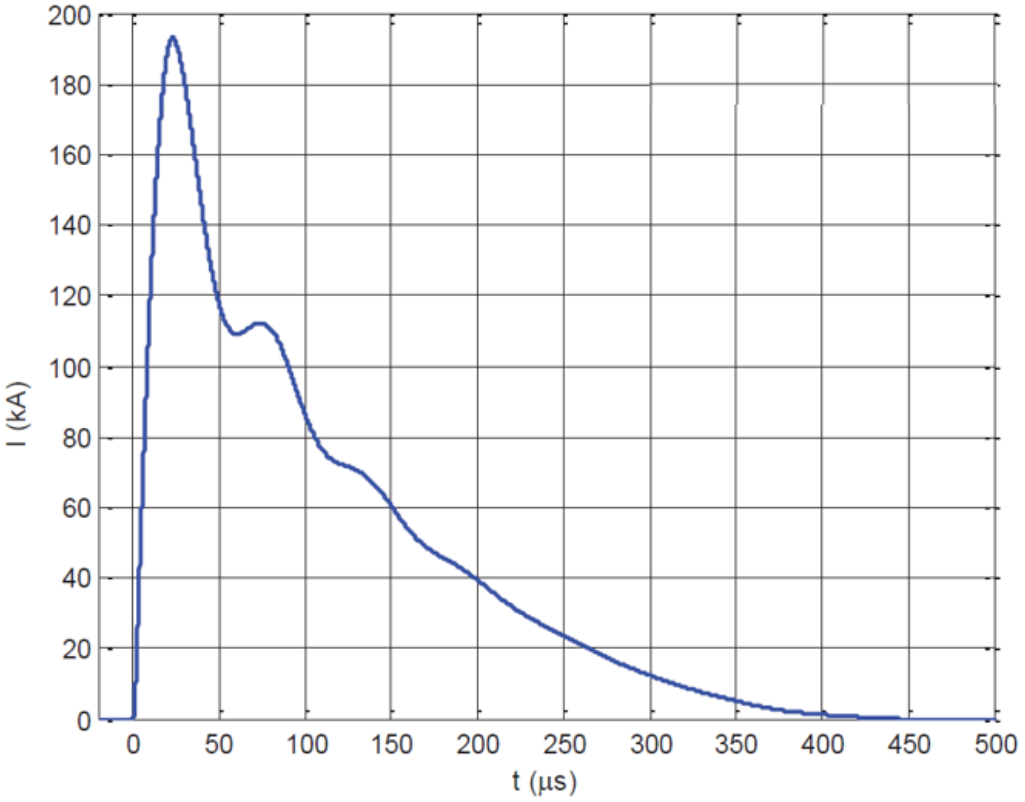
Resim 3.15. TESTO-171

Termal kamera olarak Resim 3.16’da gösterilen G 100 EX kullanılmıştır.

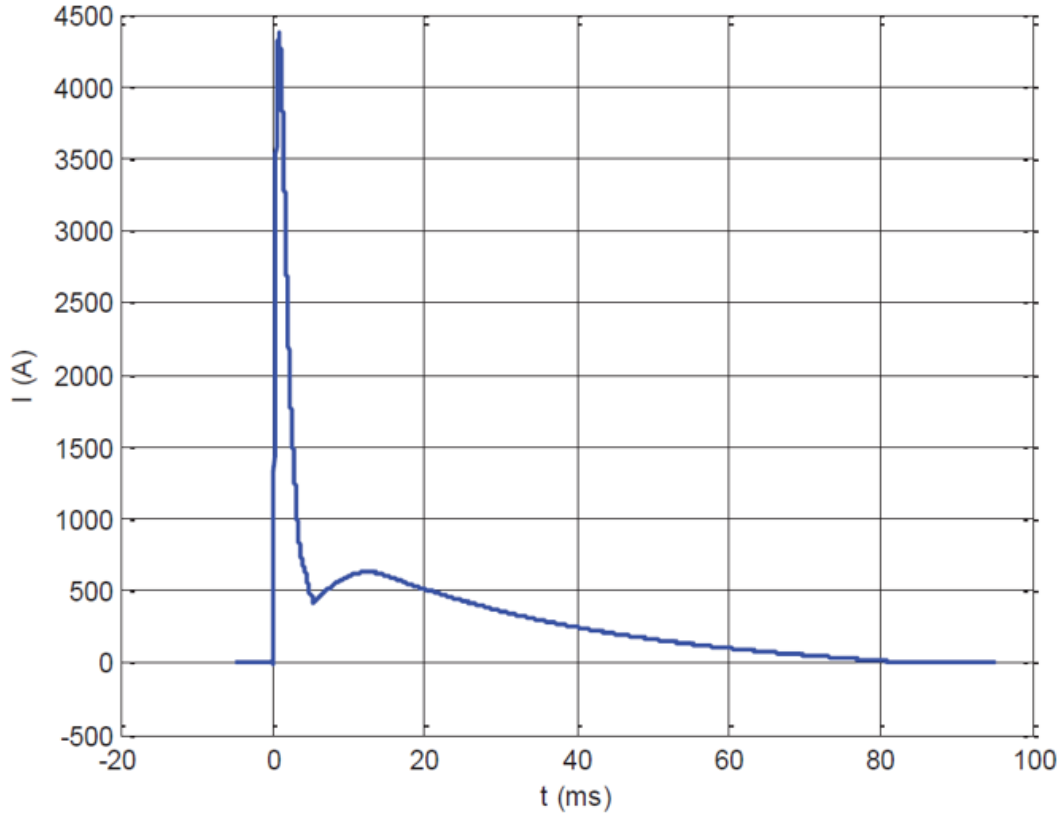


Resim 3.16. G100 EX

Test icrası sonrası uygulanmak istenen yıldırım koşullarının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Bunun için doğrudan yıldırım testlerinde kullanılan ideal A, B, C ve D dalga form bileşenleri (Bkz. Şekil 2.7) ile uygulanan dalga form bileşenleri karşılaştırılır. 1A yıldırım bölgesinin kriterlerine göre numune 4 üzerine A (Şekil 3.5), B ve C (Şekil 3.6) akım bileşenleri uygulanmış ve kayıt edilmiştir. Uygulanan dalga form bileşenlerinin; tepe akım değeri, yükselme oranı, ortalama akım değeri, sönümlenme zamanı ve verilen enerji gibi parametrelerin ideal dalga formlarına uyumluluklarına bakılmıştır. Böylece amaçlanan yıldırım çarpma koşulları doğrulanmıştır.



Şekil 3.5. Numune 4 üzerine uygulanan A akım bileşeni

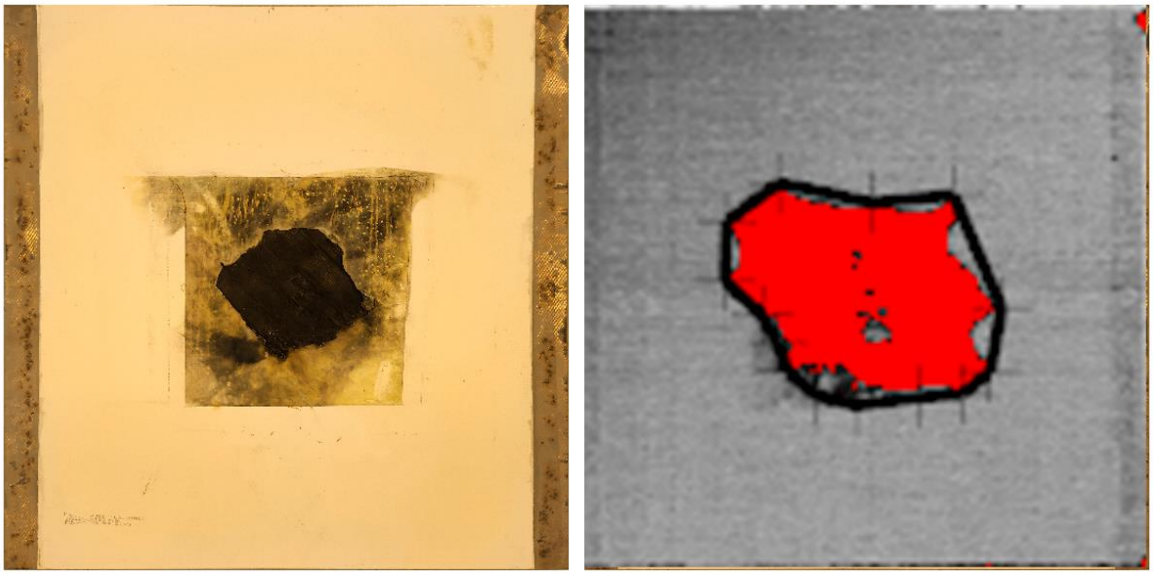


Şekil 3.6. Numune 4 üzerine uygulanan B ve C akım bileşenleri

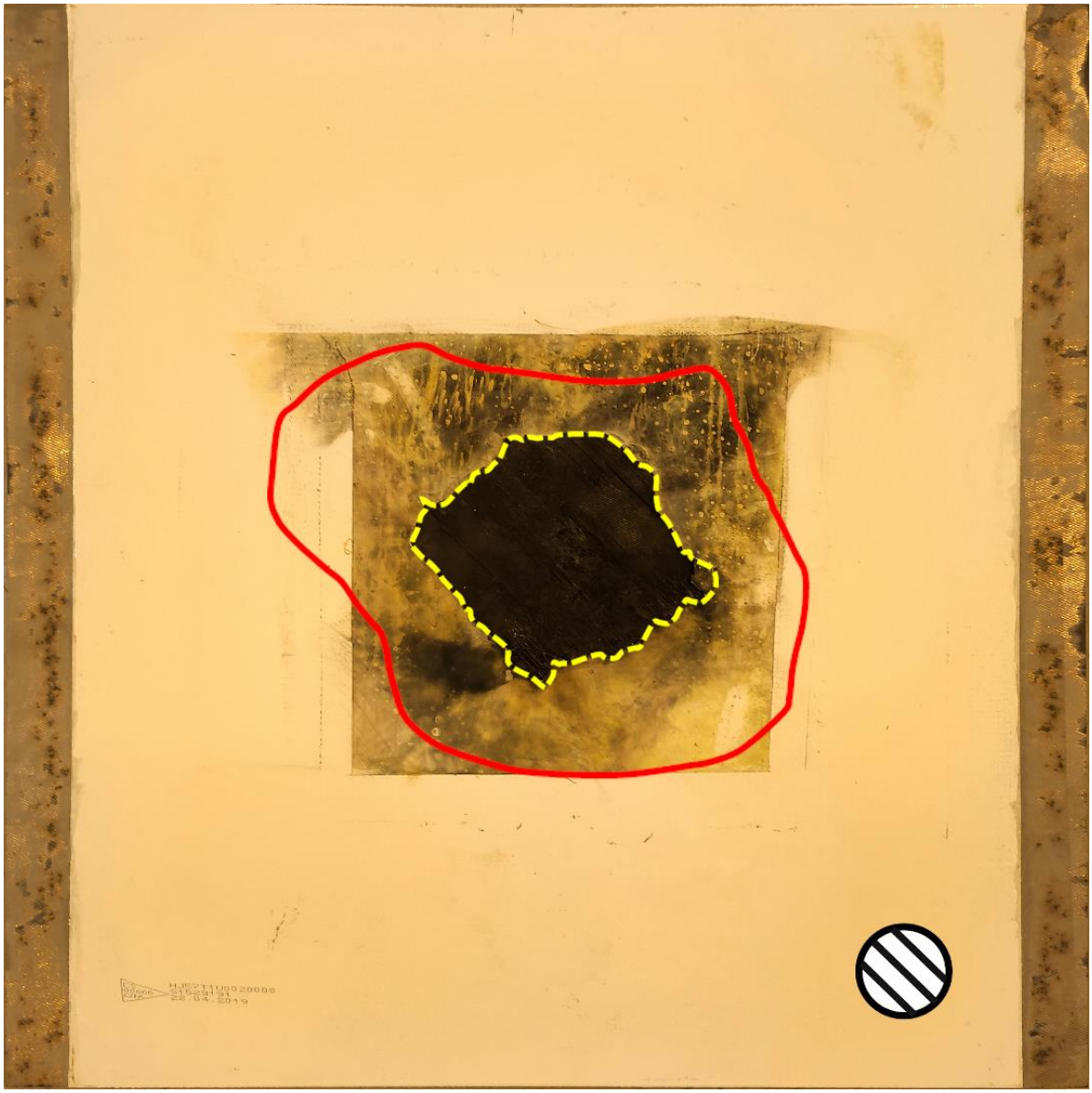
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Yıldırım Çarpması Kaynaklı Hasar Tipleri ve Mekanizmaları

Testler sonrası numunelerde meydana gelen hasarların incelenmesi için gerekli görseller alınmış, numuneler içinde meydana gelen hasarın hem alan olarak hem derinlik olarak tespiti için tahribatsız muayene metotları uygulanmıştır. Resim 4.1a'da numune 4'ün yıldırım testi sonrası durumu gösterilmektedir. Numune 4 için uygulanan ultrasonik tahribatsız muayene sonucu çıkan delaminasyon alanı ise Resim 4.1b'de gösterilmiştir. Resim 4.2'de ise numune 4 de meydana gelen delaminasyon alanı ile test sonrası hasarlı numune görseli aynı görüntü içinde birleştirilmiştir. Böylece numunede meydana gelen kırmızı çizgi ile gösterilen iç ve sarı şeritli çizgi ile gösterilen dış hasarların tek bir görsel üzerinde incelenebilmektedir. Numunelerde meydana gelen hasar alanları hesaplanmış ve ileriki başlıklar altında kullanılmıştır. Numunelerdeki hasarlı bölge alanları GIMP2 ve ImageJ programları yardımıyla belirlenmiştir. Ayrıca numune üzerine atılan son reçine emdirilmiş karbon elyaf kumaşın yönü Resim 4.2'de sağ alt köşede gösterilmiştir. Böylece hasar yayılma yönü ile son katman yönü arasındaki ilişki kolaylıkla gözlemlenebilir. Örnek olarak gösterilen işlemler tüm numunelere uygulanmıştır (Bkz. Resim 4.2).



Resim 4.1. Yıldırım testi sonrası numune 4'te oluşan dış hasar (a), ve delaminasyon alanı (b)



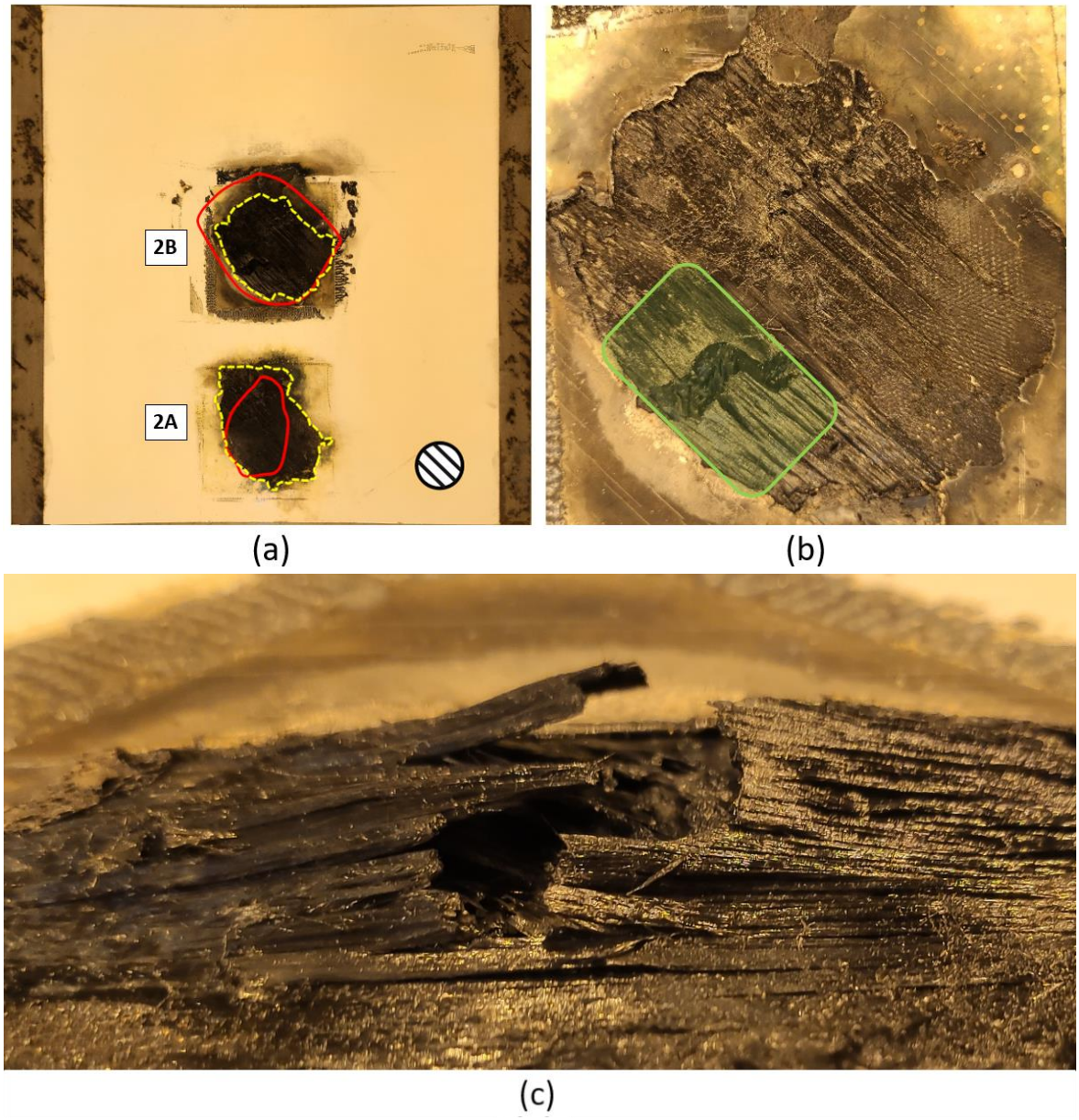
Resim 4.2. Yıldırım testi sonrası numune 4'te oluşan iç ve dış hasarlar

Yıldırım testi sonrası numuneler incelendiğinde görsel olarak üç hasar tipi belirgin olarak görülmektedir. Bunlar elyaf kırılması, katman kalkması, yüzey erozyonu ve delaminasyon şeklinde sınıflandırılmıştır. Bu hasar tiplerinin yanında numunenin arka yüzeyinde kayıt edilen numune termal izdüşümü ile yıldırım kaynaklı hasarlar arasındaki ilişki incelenmiştir.

4.1.1. Elyaf kırılması

Elyaf kırılması literatür kısmında da değinildiği gibi yıldırım kaynaklı olarak kompozit malzemelerde oluşan ciddi hasar tiplerinden biridir. Yıldırım çarpması sonucu meydana gelen termal, elektriksel değişimler ve şok basıncı elyaflarda kırılmalara neden olmaktır.

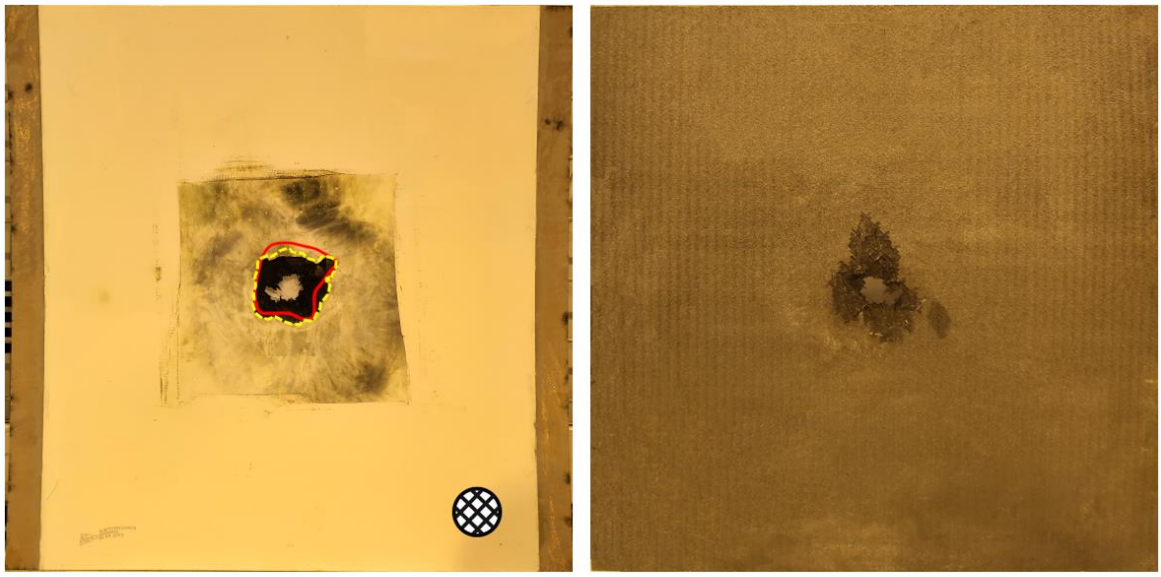
Genellikle elyaf kırılması hasar katmanın yönelimine dik yönde meydana gelmektedir. Hasar ark girişim bölgesinden başlayarak alt katmanlara doğru ilerler. Numune 1'de yıldırım sonrası meydana gelen iç ve dış hasarlar Resim 4.3'te gösterilmiştir. Resim 4.3a'da numunenin ön yüzeyinde 2A ve 2B bölgelerine yapılan yıldırım testleri sonucu oluşan hasarlar görülmektedir. Resim 4.3b'de 2B bölgesi için hasarlı bölgenin detaylı görünümü ve Resim 4.3c'de ise hasar bölgedeki elyaf kırılmasının belirgin olarak yaşandığı yeşil bölge daha da detaylı biçimde görülmektedir. Numune 1 tek yönelimli karbon kumaştan üretilmiştir. Elyaflar, literatürle uyumlu olarak katman yönelimine dik yönde kırılmıştır. Gerdirilmiş bakır folyo kullanımı elyaflarda gerçekleşen kırılım mekanizmasında yani hasar oluşum sürecinde değişikliğe neden olmamıştır çünkü elyaf kırılmasının ana nedeni elyafı saran reçinenin pirolizidir. Ancak koruma katmanı olarak kullanılan gerdirilmiş bakır folyo yıldırım akımının kompozit katmanlara geçmesini önemli ölçüde azaltmaktadır. Koruma katmanı seviyesinde önemli ölçüde engellenen ve şiddeti düşürülen yıldırım kaynaklı elektriksel enerji, kompozit katmanlarda daha düşük seviyede elyaf kırılım hasarının oluşmasını sağlamaktadır.



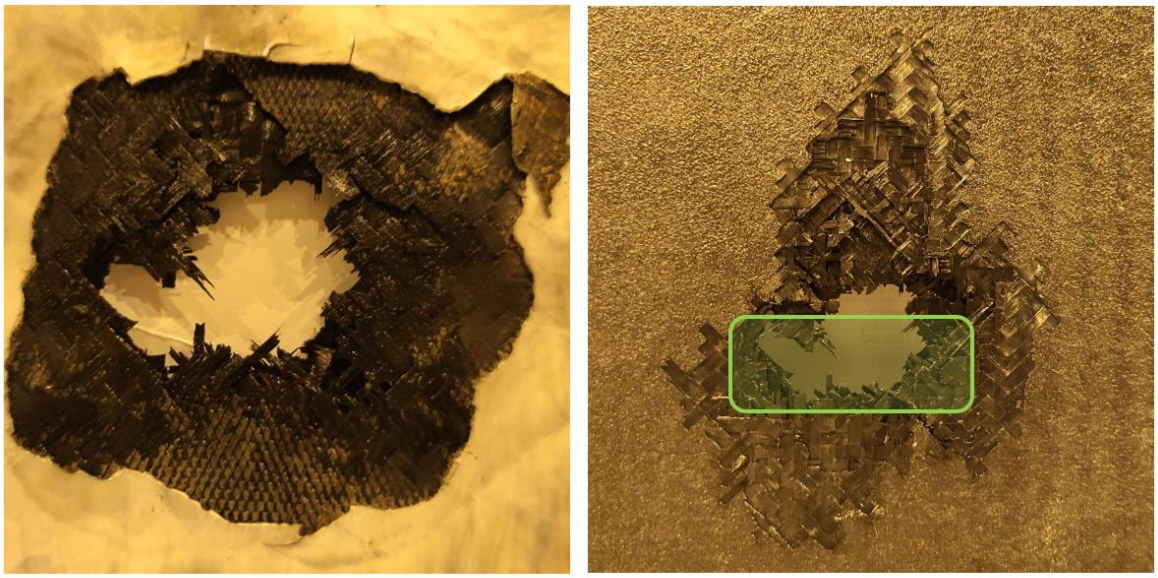
Resim 4.3. Yıldırım testi sonrası Numune 1'de iç ve dış hasarlar (a), 2A bölgesi için hasar detayı (b), elyaf kırılması (c)

Resim 4.4'te twill kumaş kullanılarak üretilen numune 18 ve üzerinde meydana gelen hasarlar görülmektedir. Resim 4.4a'da numunenin ön tarafında meydana gelen hasar görülmektedir. 1A bölgesinde gerçekleştirilen yıldırım çarpma testi sonrası numunenin delindiği ve hasarın arka yüzeyde de meydana geldiği Resim 4.4b'de görülmektedir. Resim 4.4c'de ve Resim 4.4d'de hasarların detay görünümü görülmektedir ve elyaf kırılımının numunenin iki tarafında da oluştuğu görülmektedir. Özellikle Resim 4.4e'de elyaf kırılması bariz olarak görülmekte ve incelenebilmektedir. Twill kumaşın yapısı gereği zıt yönlü elyafların birbirine dokunduğu bu kumaşta, tek yönelimli kumaşta olduğu gibi yönelime dik yönde elyaf kırılması meydana gelmiştir. Gerdirilmiş bakır folyo kullanımı yine bu kumaş

tipi içinde elyaf kırılması mekanizmasında bir değişikliğe neden olmamıştır ancak elyaf kırılma hasarının daha düşük seviyelerde meydana gelmesini sağlamıştır.



(a) (b)



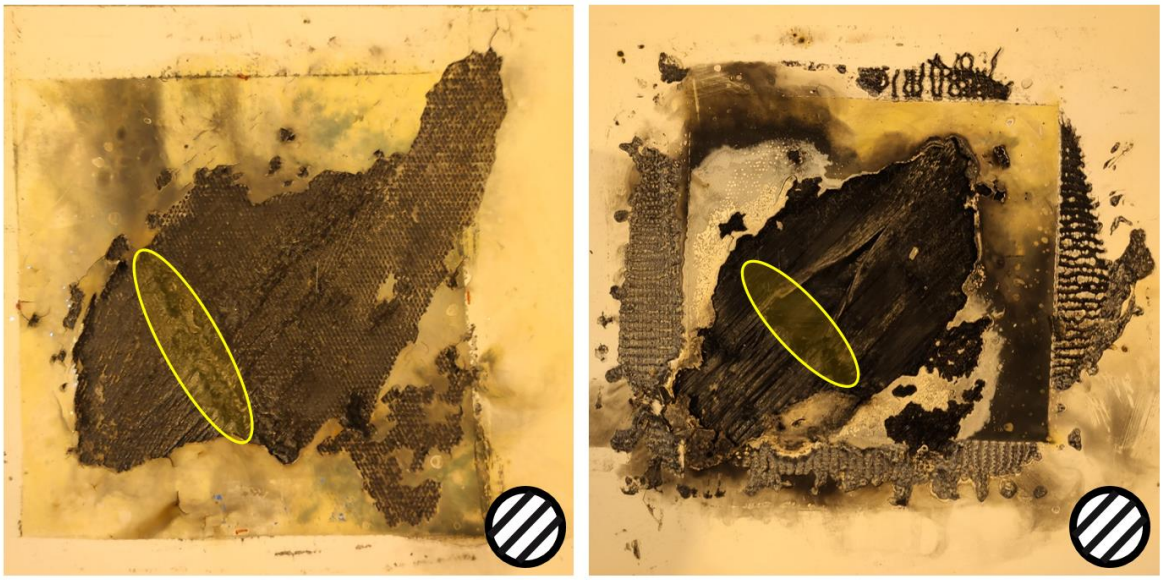
(c) (d)



(e)

Resim 4.4. Yıldırım testi sonrası numune 18'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), arka yüzey hasarı (b), ön yüzey hasar detayı (c), arka yüzey hasar detayı (d), elyaf kırılması (e)

Numuneler incelendiğinde elyaf kırılımının yıldırım arkının numuneye giriş yaptığı bölgede meydana geldiği görülmüştür. Bazı durumlarda elyaf kırılımının tek bir bölgede değil birbirine yakın bölgelerde meydana geldiği görülmüştür. Bu olgu yıldırım akımının numune üzerinde atlamalar yapmasıyla açıklanmaktadır. Numune 14 (Resim 4.5a ve Resim 4.5b), 11 (Resim 4.5c) ve 6 (Resim 4.5d) üzerinde meydana gelen elyaf kırılım bölgeleri (sarı alanlar) ve dış katman yönelimi gösterilmiştir. Elyaflar yıldırımın ark girişim noktasından başlayarak elyaf yönelimine dik yönde kırıldığı görülmektedir. Literatürde korumasız kompozitlerinde meydana gelen elyaf kırılmalarıyla benzer sonuçlar elde edilmiştir [40].



(a) (b)



(c) (d)

Resim 4.5. Yıldırım testi sonrası numune 14 2A bölgesi hasarı (a), numune 14 2B bölgesi hasarı (b), numune 11 2A bölgesi hasarı (c), numune 6 1A bölgesi hasarı (d)

4.1.2. Katman kalkması

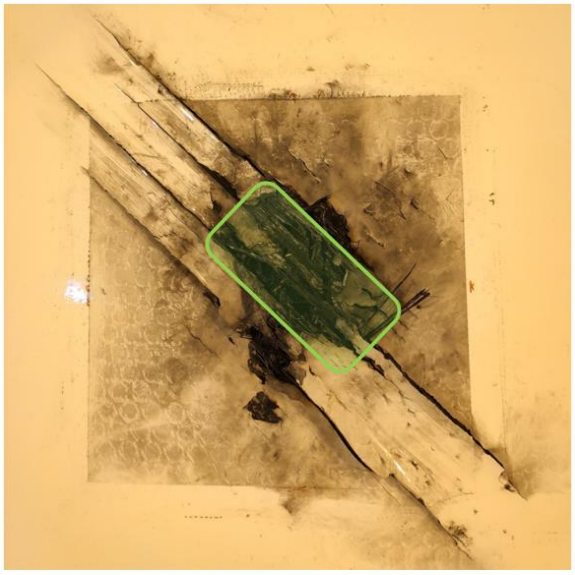
Katman kalkması özellikle elyaf kırılması ve delaminasyon sonucu meydana gelmektedir. Yıldırıma maruz kalan numunelerde bazı katman ara yüzeylerinde ayrışma olmaktadır. Özellikle ark girişimine yakın bölgelerde gerçekleşen elyaf kırılması, ayrışmanın olduğu ara yüzlerde üst katmanın kalkmasıyla sonuçlanabilir. Resim 4.6a'da ve Resim 4.6b'de yıldırım çarpma testi sonrası numune 7'nin ön ve arka yüzeyinde meydana gelen hasarlar görülmektedir. Numunenin ön ve arka yüzeyinde hem elyaf kırılması hem katman kalkması meydana gelmiştir. Resim 4.6c ve Resim 4.6d, katman kalkmasının daha bariz görüldüğü resimlerdir. Korumasız ve tek yönelimli karbon kumaştan üretilen numunede meydana gelen katman kalkması ve elyaf kırılması hasarının boyutu görülmektedir. Resim 4.7a'da ise gerdirilmiş bakır folyo katmanın koruma olarak kullanıldığı numune 6 bulunmaktadır. Resim 4.7b'de hasar detayı, Resim 4.7c'de ise meydana gelen katman kalkması görülmektedir. Numune 6 ve numune 7 aynı (1A) yıldırım bölgesinde test edilmesine rağmen koruma katmanı kullanılan numune 6'da katman kalkması hem daha düşük boyutlarda hem de daha nizami şekilde meydana gelmiştir. Koruma katmanın yıldırım enerjisinin bir kısmının kompozite geçmesine engellemesi bu olgunun ana nedenidir. Bigand hasar oluşma sürecine ve koruma katmanın etkisine çalışmalarında değinmişlerdir [43].



(a)



(b)

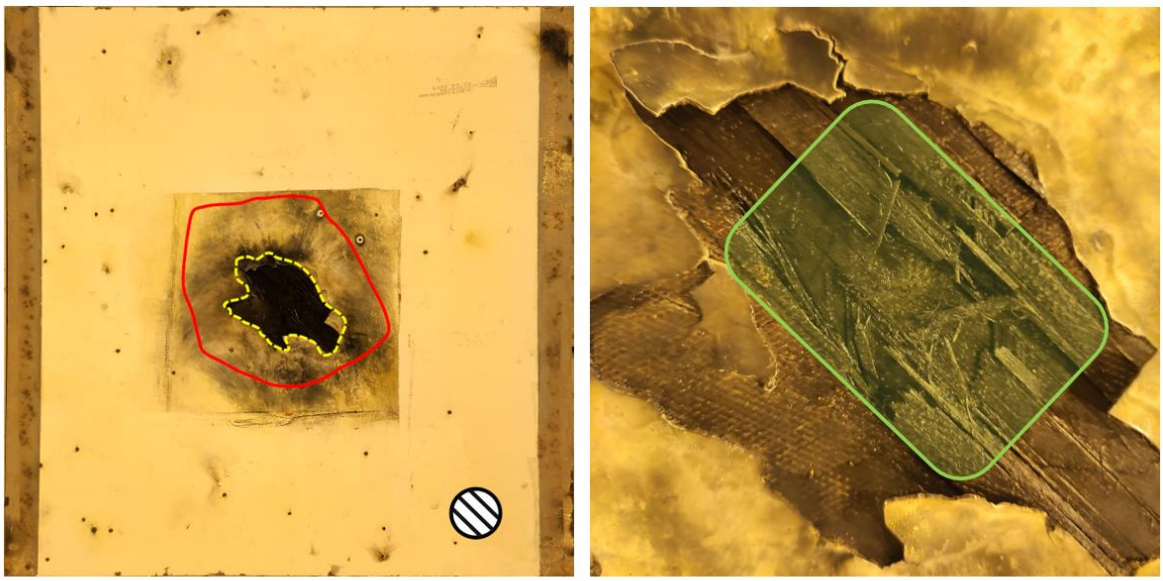


(c)

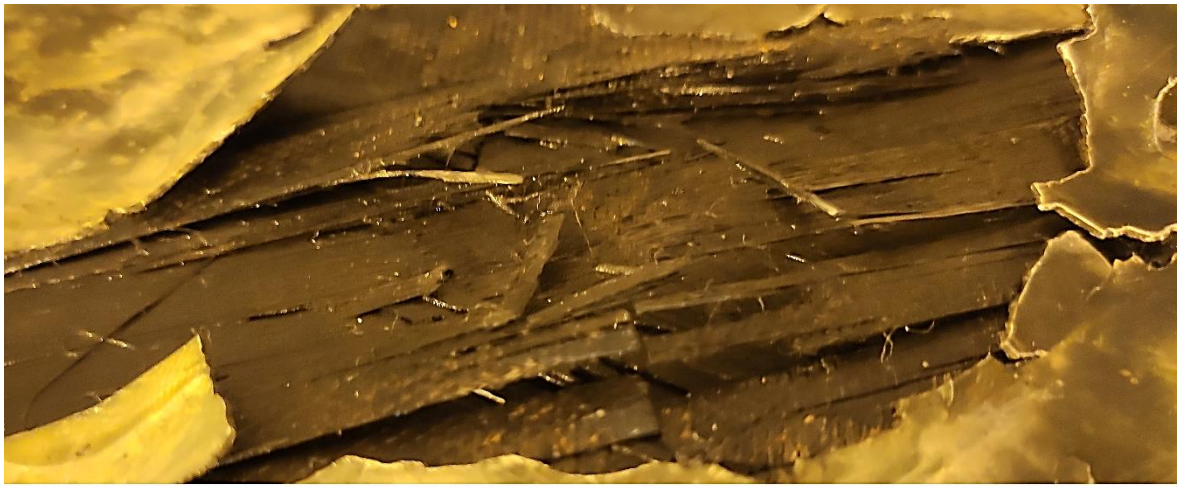


(d)

Resim 4.6. Yıldırım testi sonrası Numune 7'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), arka yüzey hasarı (b), ön yüzey hasar detayı (c), ön yüzey katman kalkması (d)



(a) (b)

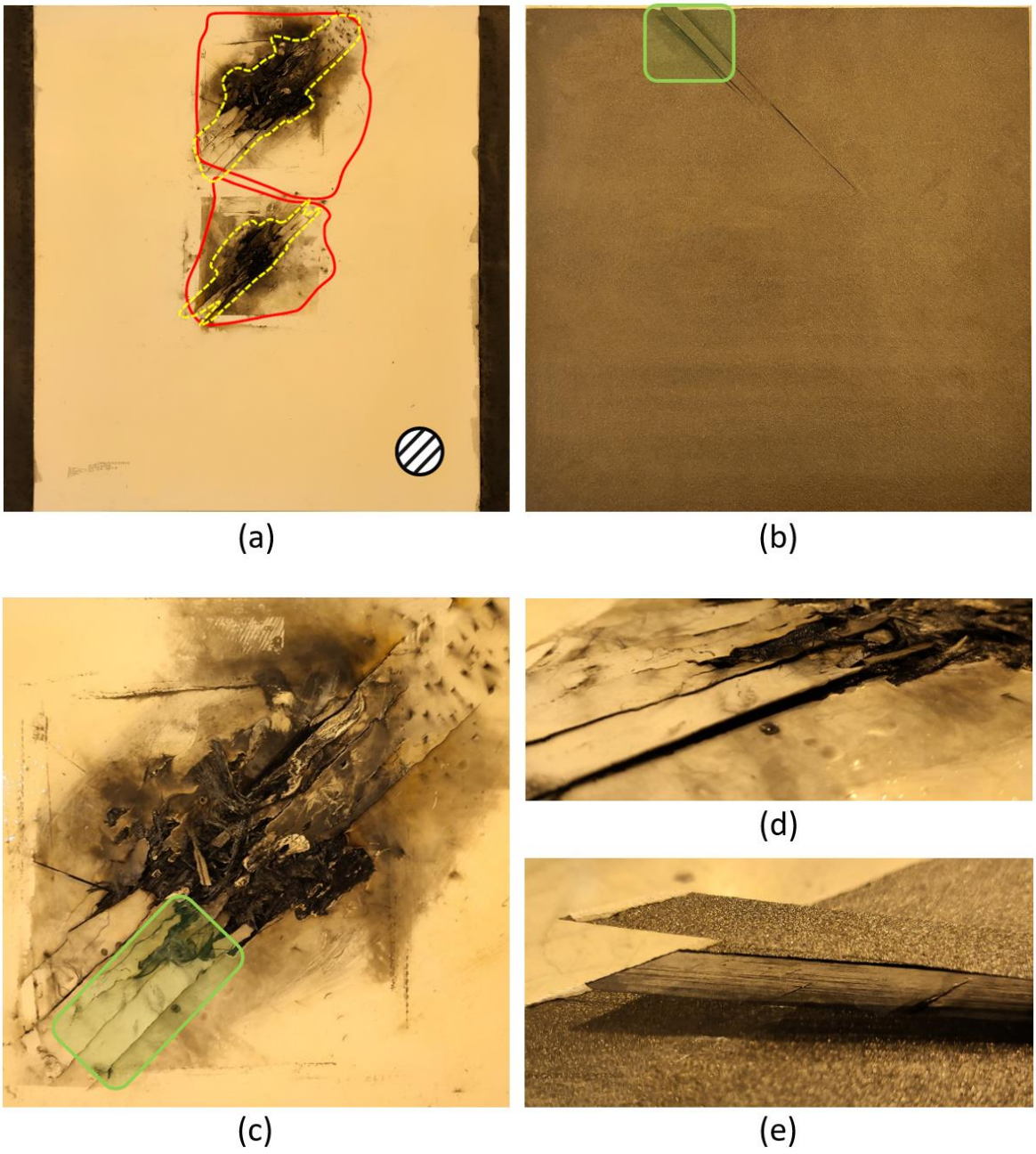


(c)

Resim 4.7. Yıldırım testi sonrası Numune 6'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), ön yüzey hasar detayı (b), ön yüzey katman kalkması (c)

Resim 4.8'de tek yönelimli kumaştan üretilen ve 1A yıldırım bölgesinde testi gerçekleşen numunede meydana gelen hasarlar görülmektedir. Hasarlar incelendiğinde katman kalkmasının sadece yıldırımın çarptığı ön yüzeyde (Resim 4.8a, Resim 4.8c ve Resim 4.8d) değil arka yüzeyde de (Resim 4.8b) meydana geldiği görülmektedir. Resim 4.8e'de meydana gelen katman kalkmasının elyaf kırılmasından değil, numunenin serbest ucundan başladığı görülmektedir.

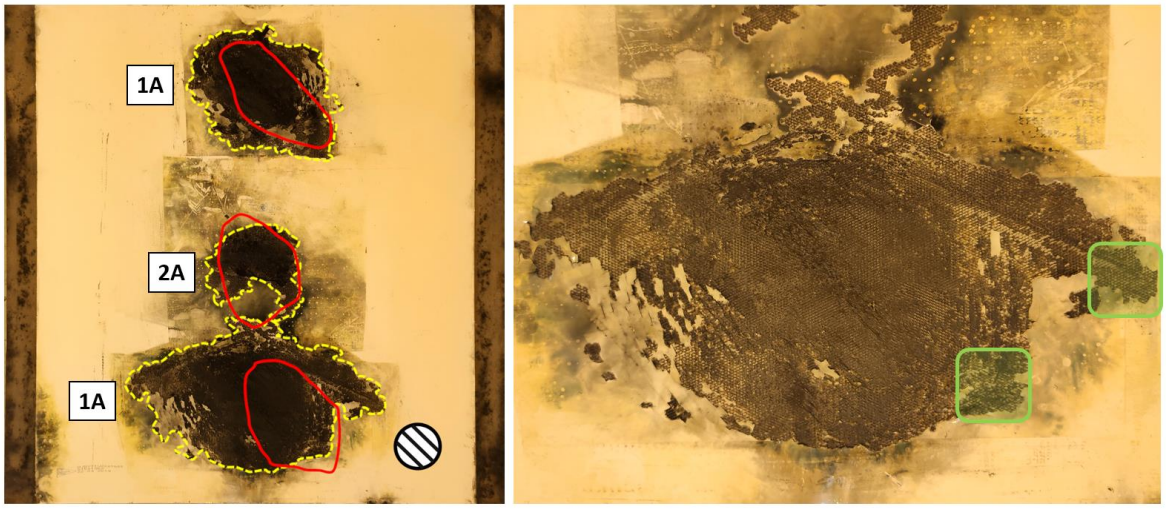
Katman kalkması özellikle delaminasyonun belirgin yaşandığı tek yönelimli numunelerde yaygın ve belirgin olarak görülmüştür. Ancak twill kumaştan üretilen numunelerde delaminasyonlar çok geniş çaplı olmamıştır dolayısıyla katman kalkmaları da büyük ölçekte gerçekleşmemiş durumdadır. Twill kumaşın bir bine kenetli elyaf yapısı akımın akmasına karşı direnç gösterip hasarın daha bölgesel ama derin olmasına sebep olmuştur.



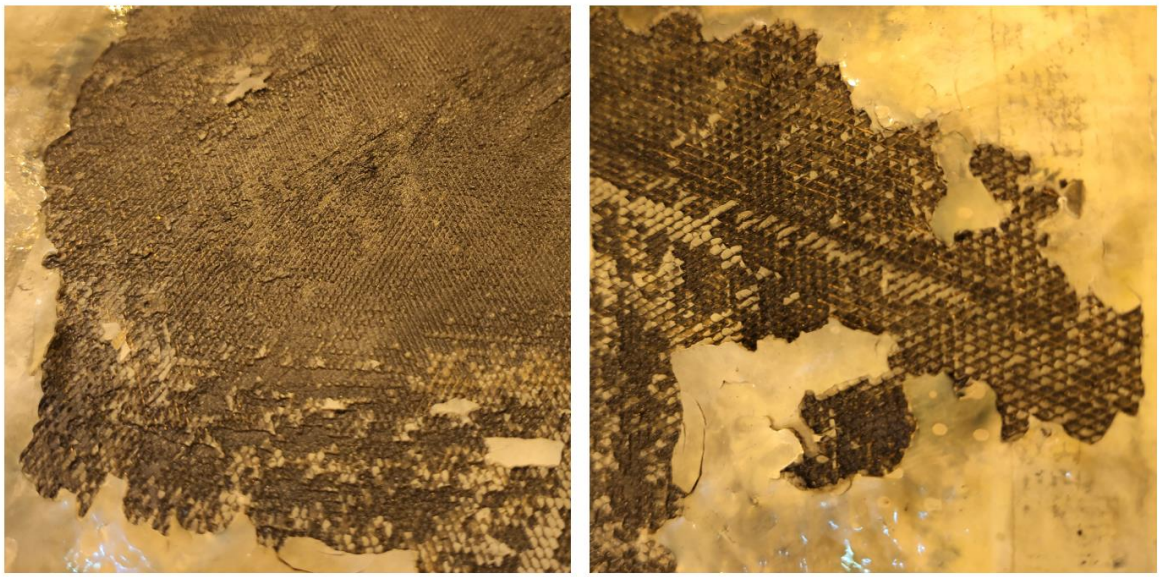
Resim 4.8. Yıldırım testi sonrası Numune 3'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), arka yüzey hasarı (b), ön yüzey hasar detayı (c), ön yüzey katman kalkması (d), arka yüzey katman kalkması (e)

4.1.3. Yüzey erozyonu

Yüzey erozyonu genellikle yıldırım çarpmasının yaşandığı yüzeyde oluşmaktadır. Yıldırım arkı girişim yaptığı bölgede elyaf kırılması ve katman kalkmasına sebep olurken girişim noktasından uzaklaştıkça akım yoğunluğu azalır. Akım yoğunluğunun azalması hasarın belli bir ölçüde kalmasına neden olur. Akım ilk başta boyayı yok eder. Sonrasında yeterli akım varsa koruma katmanında bulunan reçineyi piroliz eder. Akım daha da fazlaysa koruma katmanını buharlaştırır. Akımın gücü daha da fazlaysa kompozitin en üst katmanına zarar verebilir. Tüm bu yüzeysel hasarlara yüzey erozyonu adı verilir. Ark girişim noktasında yoğunlaşır ve çevresine atlamalar yaparak girişim noktası etrafında hasarlara neden olabilir. Ayrıca ark girişim noktasından aktarılan yüksek miktarda akım etrafa dağılır ancak bu yüksek akım üst katmanda yüzey erozyonuna neden olabilmektedir. Resim 4.9'da numune 8 için meydana gelen hasarlar görülmektedir. Özellikle numune 8'in 1A yıldırım bölgesi testi sonrası gelen hasara (Resim 4.9b, Resim 4.9c ve Resim 4.9d) detaylı bakıldığında boyanın kalktığı bölgeler ve gerdirilmiş bakır folyonun reçineden arınmış bölgeleri bariz şekilde görülmektedir. Benzer şekilde Resim 4.10a'da numune 12'nin test sonrası durumu gösterilmiştir. .Numunede oluşan yüzey erozyonu (Resim 4.10b ve Resim 4.10c) belirgin olarak incelenebilir. Bu erozyon bölgelerine test esnasında akımın çıkış yaptığı numune kenarlarında rastlamakta mümkündür.

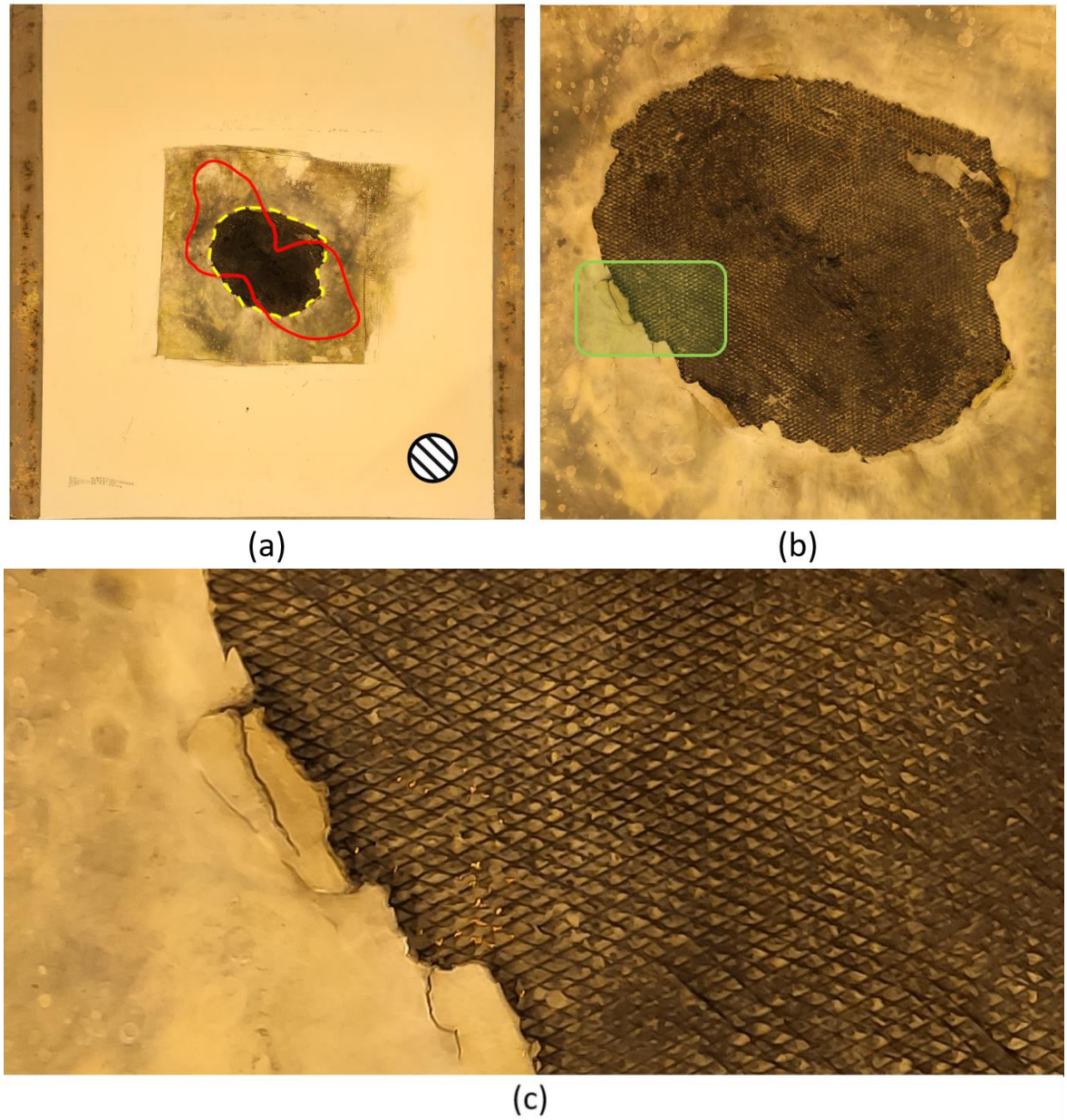


(a) (b)



(c) (d)

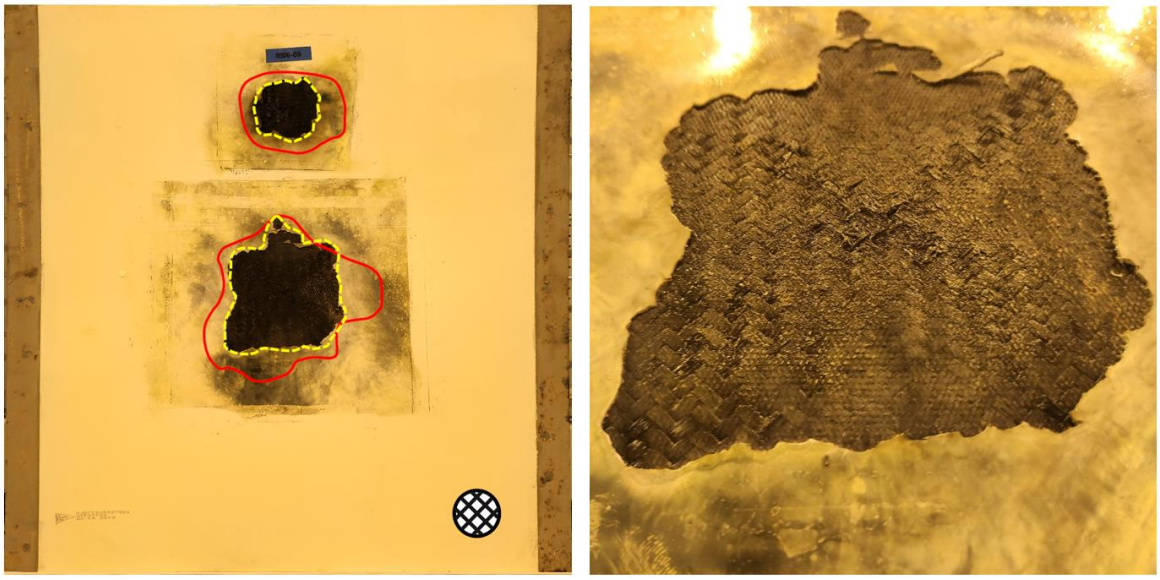
Resim 4.9. Yıldırım testi sonrası Numune 8’de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), 1A bölgesi ön yüzey hasar detayı (b), ön yüzey erozyonu (c), ön yüzey erozyonu (d)



Resim 4.10. Yıldırım testi sonrası Numune 12'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), ön yüzey hasar detayı (b), ön yüzey erozyonu (c)

Yüzey erozyonu Resim 4.11a'da gösterilen twill kumaştan üretilmiş numune 19'da da oluşmuştur. Resim 4.11b'ye detaylı bakıldığında boyanın kalktığı bölgeler, gerdirilmiş bakır folyonun reçinesiz kaldığı bölgeler ve koruma katmanın yok olduğu twill kumaşın ortaya çıktığı bölgeler açık şekilde görülmektedir. Yüzey erozyonu yıldırım akımının dağılmasıyla doğrudan ilişkilidir. Yüzey erozyonu yapısal olarak ciddi kayıplara neden olmasada geniş alanlarda yüzeysel hasara neden olur. Buda tamir gerektiren bölgenin geniş olmasına; zaman, maliyet ve iş gücü kayıplarına neden olmaktadır. Literatürle karşılaştırıldığında benzer yüzey hasarları korumasız karbon elyaf takviyeli kompozitlerde de elde edilmiştir.

Ancak gerdirilmiş bakır folyo koruma katmanın varlığı yüzey hasarının geniş ölçekte koruma katmanında kalmasına ve karbon elyaf katmanlara ulaşmasını engellemiştir.



Resim 4.11. Yıldırım testi sonrası Numune 19'de ön yüzey iç ve dış hasarlar (a), ön yüzey hasar detayı (b)

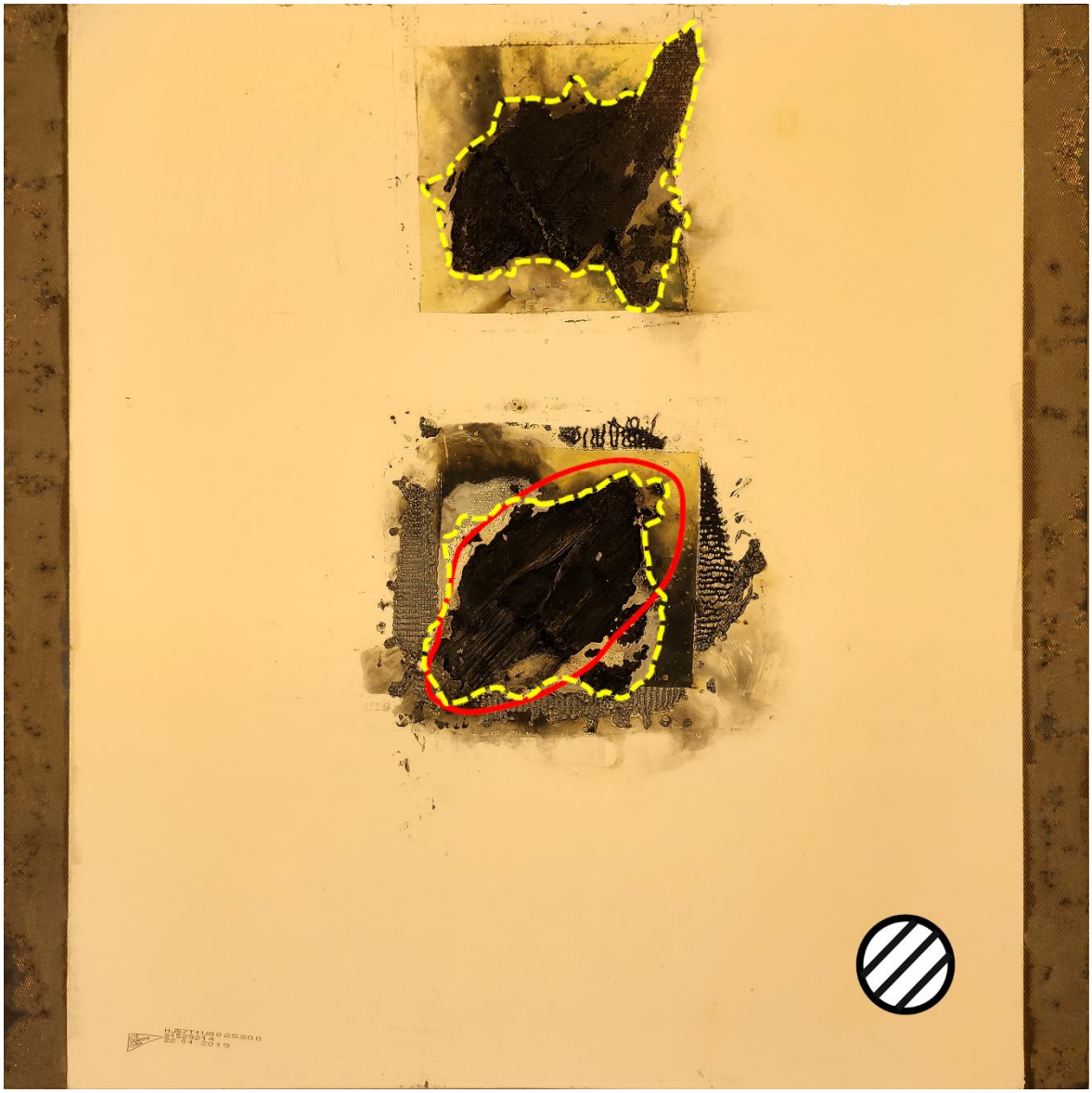
4.1.4. Delaminasyon

Yıldırım çarpması esnasında yeterince yüksek yıldırım akımına maruz kalınması durumunda hasar yüzeysel kalmaz ve numunenin içinde de meydana gelir. Yüzey erozyonu tamamen yüzeyde oluşurken, elyaf kırılması ve katman kalkması kompozitin üst katmanlarında meydana gelir. Ancak yıldırım kaynaklı termal ve elektriksel yüklemeler yeterince güçlü olduğunda daha da derinlere iner ve katman ayrışmasına yani delaminasyona neden olur. Delaminasyonları anlamak için numunelere C tipi ultrasonik muayene uygulanmış ve ayrışan en geniş katmanlar tespit edilmiştir. Delaminasyonlu alanın büyümesi yapının dayanımını önemli ölçüde düşmesine neden olur. Ayrıca delaminasyon büyüdükçe ve derinleştikçe tamir işlemi zorlaşır ve gerekli maliyet ve iş gücü artar. Resim 4.12'de ve Resim 4.13'de tek yönelimli kumaştan üretilen numune 10 ve 14 üzerinde meydana gelen hasarlar gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde delaminasyonun ark girişim bölgesini merkez aldığı ve hem elyaf yönünde hem elyaf yönüne dik yönde ilerlediği görülmektedir. Ancak elyaf yönünde ilerlemenin literatüre uygun olarak dik yönelime kıyasla daha fazla olduğu barizdir [40]. Bunun ana nedeni elyafların yönleri boyunca iletkenliklerinin fazla olması sebebiyle akımı daha fazla üzerlerinde taşımaları ve hasar bu yönde daha hızlı oluşmasıdır.

Burada dikkat çeken nokta ise koruma katmanın var olması ve üst katmanla farklı yönde olmasına rağmen delaminasyon ilerleme yönünde dikkate değer bir değişikliğe neden olamamasıdır. Yani koruma katmanı delaminasyon oluşma mekanizmasında ya da yöneliminde ciddi bir değişmeye neden olmaz. Ancak koruma katmanın varlığı numunelerde oluşan delaminasyon azaltmaktadır. Akımın kompozitin içeri girme miktarını azaltması ana sebep olarak düşünülebilir.

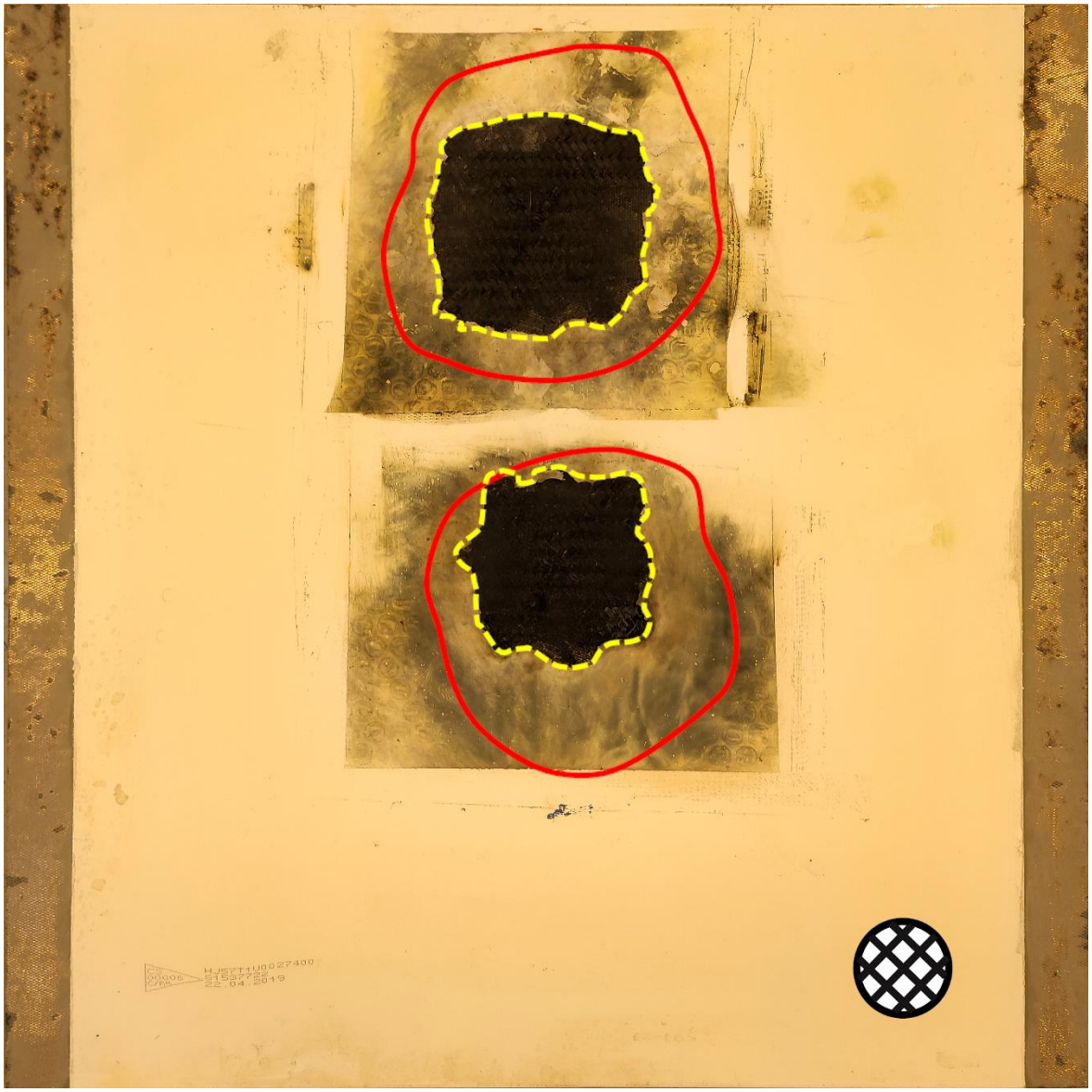


Resim 4.12. Yıldırım testi sonrası Numune 10'de yüzey (sarı kesikli bölge) ve delaminasyon hasarı (kırmızı sürekli bölge)



Resim 4.13. Yıldırım testi sonrası Numune 14'de yüzey (sarı kesikli bölgeler) ve delaminasyon hasarı (kırmızı sürekli bölge)

Resim 4.14'te twill kumaştan üretilen numune 21'de test sonrası meydana gelen hasarlar görülmektedir. Twill kumaşta elyafların aynı katmanda zıt yönlere ilerlemesi nedeniyle hasarın her yönde ilerleyip yuvarlağa yakın delaminasyon alanları oluşturduğu görülmektedir. Mantık tek yönelimli kumaşlarda olduğu gibi düşünebilir. Twill kumaşlı katmanlarda iki yönde de iletkenlik aynıdır ve delaminasyon iki yönde de ilerlemiştir. Ark girişim noktasında başlayarak elyaf yönünde delaminasyon hasarı ilerler. Resim 4.15'te numune 18 üzerindeki hasarlar gösterilmiştir. Numune 18'de yıldırım testi sonrası delik açılmıştır. Delaminasyon şekli twill kumaştan üretilen numune 21 ile benzer şekildedir ancak boyutu daha küçüktür. Burada yıldırım enerjisi alansal hasardan daha çok derinlik olarak ilerleyerek gücünü harcamış gibi görünmektedir.



Resim 4.14. Yıldırım testi sonrası Numune 21'de yüzey (sarı kesikli bölgeler) ve delaminasyon hasarı (kırmızı sürekli bölgeler)

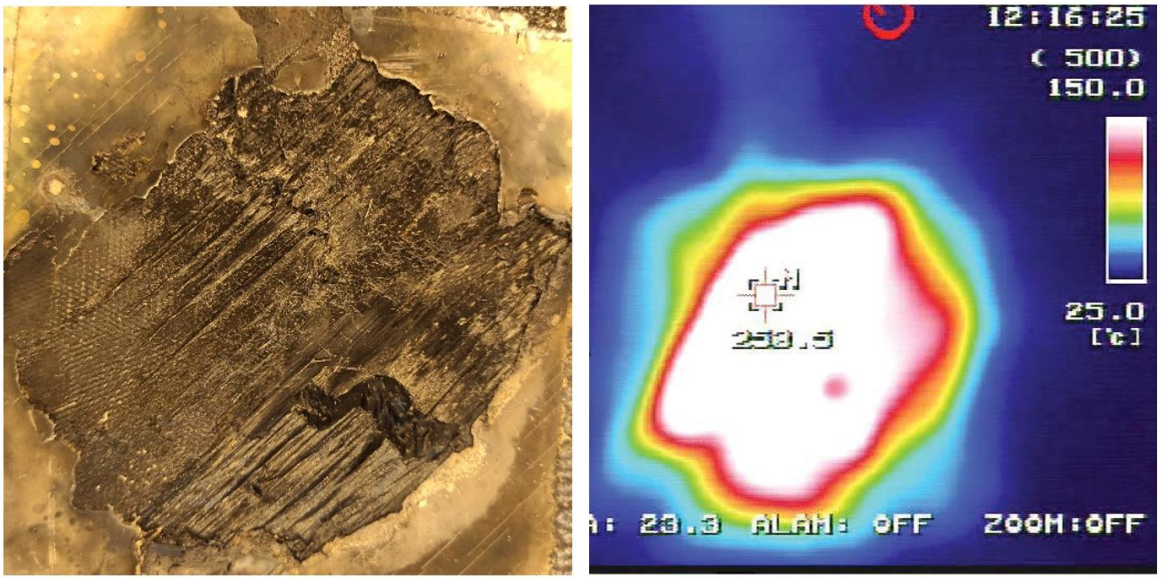


Resim 4.15. Yıldırım testi sonrası Numune 18'de yüzey (sarı kesikli bölge) ve delaminasyon hasarı (kırmızı sürekli bölge)

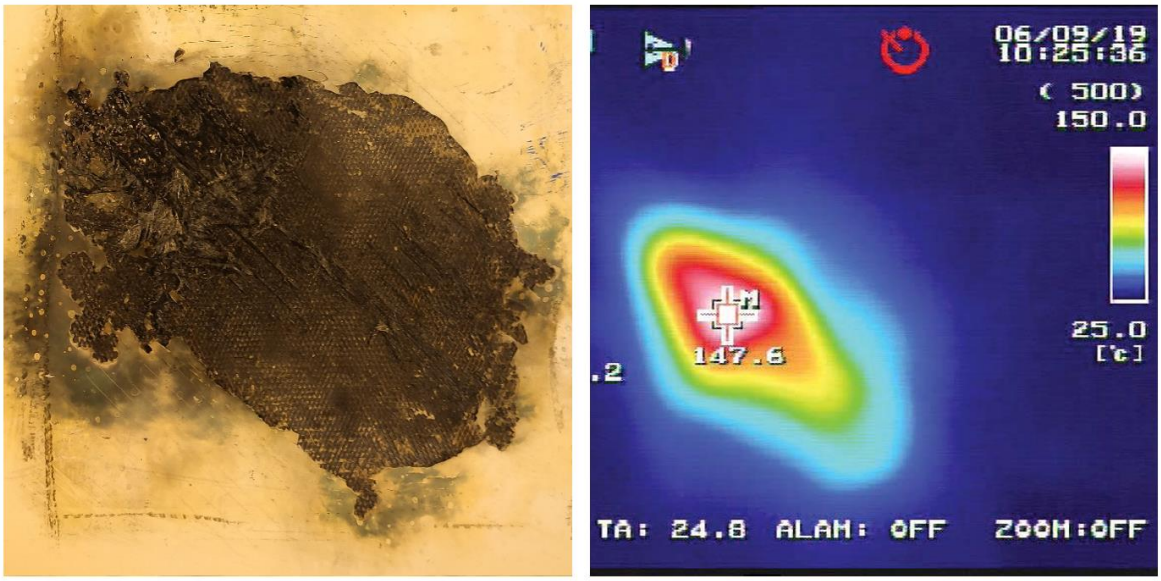
4.1.5. Termal izdüşüm

Numunelerin test esnasında arka yüzeylerinde meyana gelen termal dağılımı görmek amacıyla termal kamerayla ölçümler yapılmıştır. Burada ki ana amaç arka yüzeyde oluşacak maksimum sıcaklığı ölçerek yakıtlı bir durumda sıcaklığın tehlike oluşturup oluşturmayacağını incelemektir. Ancak termal dağılımlar ve numunelerdeki hasarlar incelendiğinde benzerlikler belirgin şekilde görülmektedir. Numune 1'in (Resim 4.16a, Resim 4.16b, Resim 4.16c ve Resim 4.16d), numune 10'un (Resim 4.17a ve Resim 4.17b) ve numune 14'ün (Resim 4.18a ve Resim 4.18b) yıldırım çarpma testi esnasında kayıt edilen termal kayıtlar ve ön yüzeylerinde meydana gelen hasarlar görülmektedir. Termal kayıtlarda

maksimum sıcaklığın meydana geldiği yerler, elyaf kırılması ve katman kalkması gibi güçlü hasarların meydana geldiği yerlerle örtüşmektedir. Ark girişiminin yaşandığı bu bölgelerde termal değişimler reçinenin pirolizi ve elyafları kırılmasına neden olabilecek kadar artmıştır. Bu hasarların tek kaynağı termal artışlar olmasada ana hasar kaynaklarından biri olduğu literatürde de işlenmiştir. Test sonuçları da meydana gelen hasar ve sıcaklık artışındaki ilişkiyi kanıtlar niteliktedir. Numunelerin termal kayıtlarında sıcaklığın düşük okunduğu bölgelere doğru ilerledikçe hasar tipi; elyaf kırılması ve elyaf kırılımı yerine daha çok yüzey erozyonu ve delaminasyon olarak değişmektedir. Kumar ve diğerlerinin 2018 yılında korumasız kompozitlerde gerçekleştirdikleri çalışmayla benzer olarak ark girişim noktasında en yüksek sıcaklık değerleri okunur ve karbon elyafların reçineye göre daha baskın iletken olması sebebiyle termal dağılımı belirler [44]. Gerdirilmiş bakır folyo koruma katmanın kullanılması termal şiddeti azaltırken, termal dağılımın yöneliminde belirgin bir etki yaratmadığı görülmüştür. Numunelerin arkasında oluşan termal harita ve hasar dağılımı arasındaki ilişki özellikle numuneler inceldikçe belirginliğini arttırmaktadır.

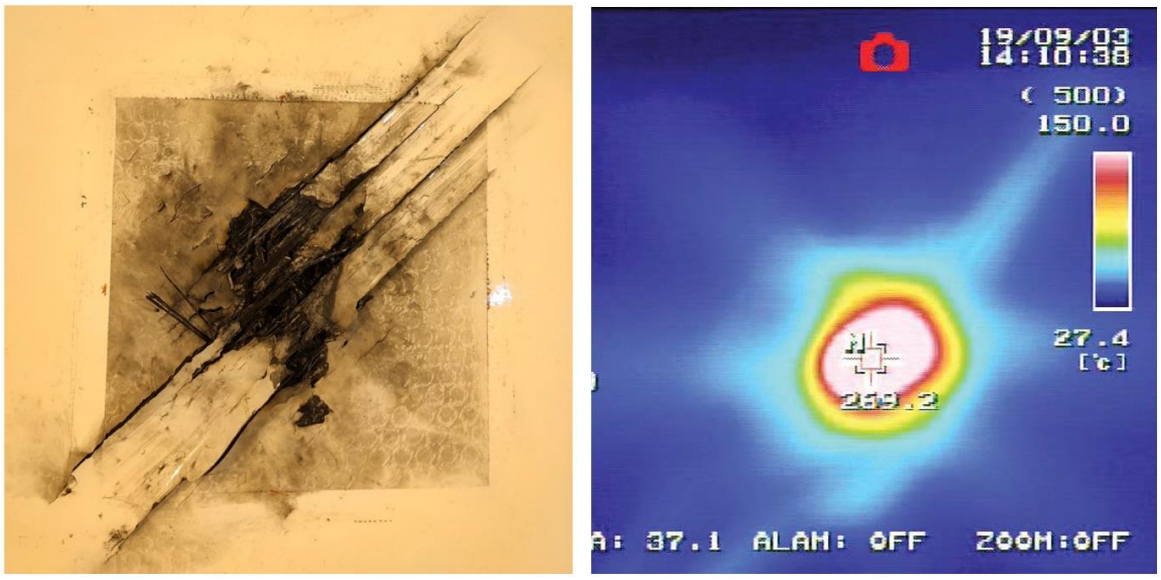


(a) (b)



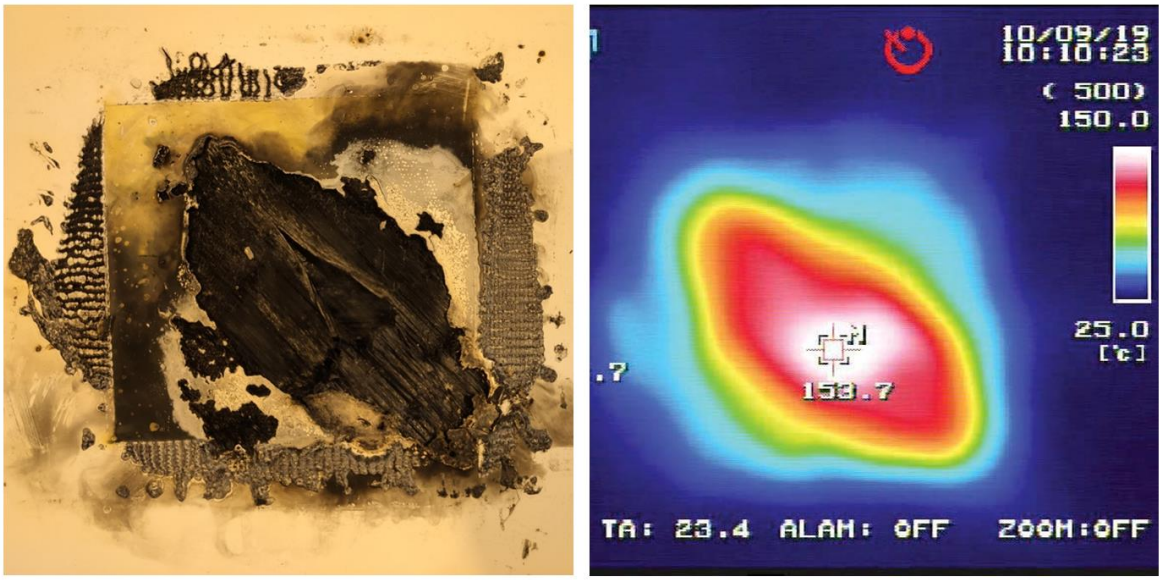
(c) (d)

Resim 4.16. Yıldırım testi sonrası Numune 1'de 2B bölgesi ön yüzey hasarı (a), test esnası 2B bölgesi arka yüzey sıcaklık dağılımı (b), test sonrası 2A bölgesi ön yüzey hasarı (c),), test esnası 2A bölgesi arka yüzey sıcaklık dağılımı (d)



(a) (b)

Resim 4.17. Yıldırım testi sonrası Numune 10'de ön yüzey hasarı (a), test esnası arka yüzey sıcaklık dağılımı (b)



(a) (b)

Resim 4.18. Yıldırım testi sonrası Numune 14'de ön yüzey hasarı (a), test esnası arka yüzey sıcaklık dağılımı (b)

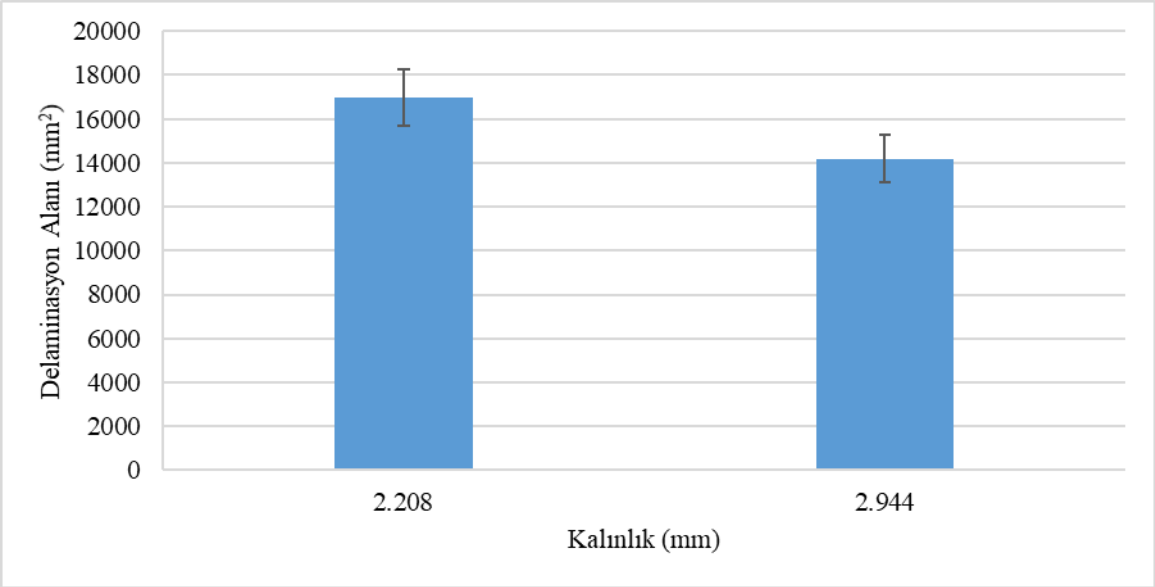
4.2. Kalınlık Etkisi

Çizelge 3.1.'de görüldüğü üzere test matrisi oluşturulurken kalınlıkta farklılıklar yaratılarak, numune kalınlığının yıldırım çarpması sonucu oluşan delaminasyon alanı, yüzey erozyonu, hasar derinliği ve numune arkasında oluşan sıcaklıkla ilişkisini görmek amaçlanmıştır.

4.2.1. Kalınlık-delaminasyon alanı ilişkisi

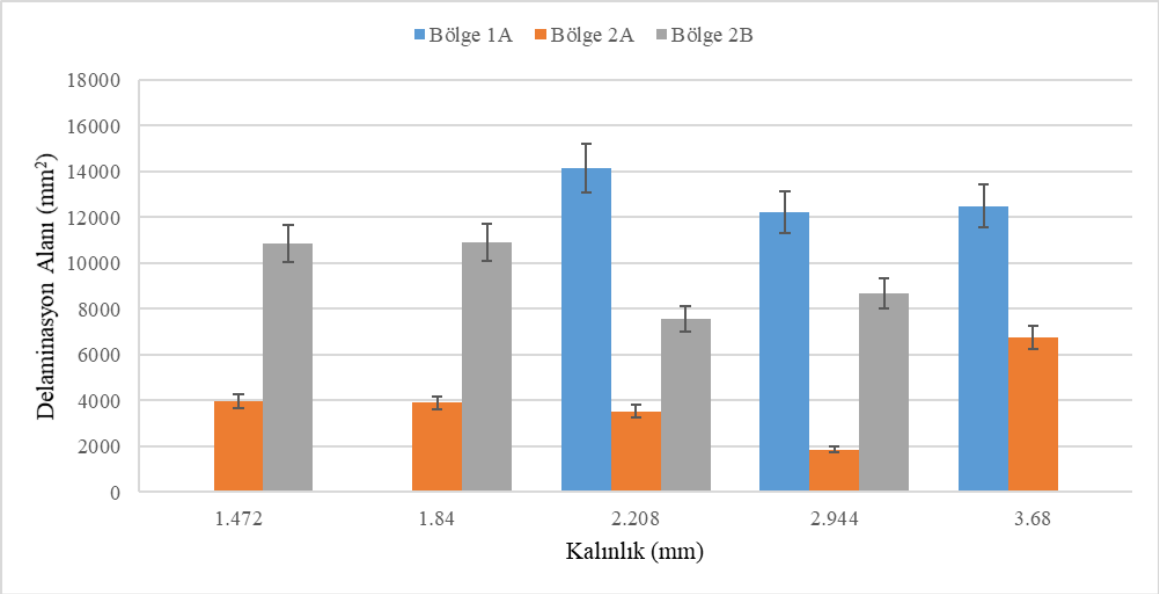
Kalınlık etkisinin delaminasyon alanıyla olan bağlantısını incelemek için, koruma seviyesi ve yıldırım test parametreleri aynı olan ama kalınlıkları farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.1'de herhangi bir koruma katmanı kullanılmayan, Bölge 3 yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 3 ve 11 karşılaştırılmıştır. Bu iki numune için artan kalınlıkla delaminasyon alanının 16963 mm^2'den 14183 mm^2'ye düştüğü görülmüştür.



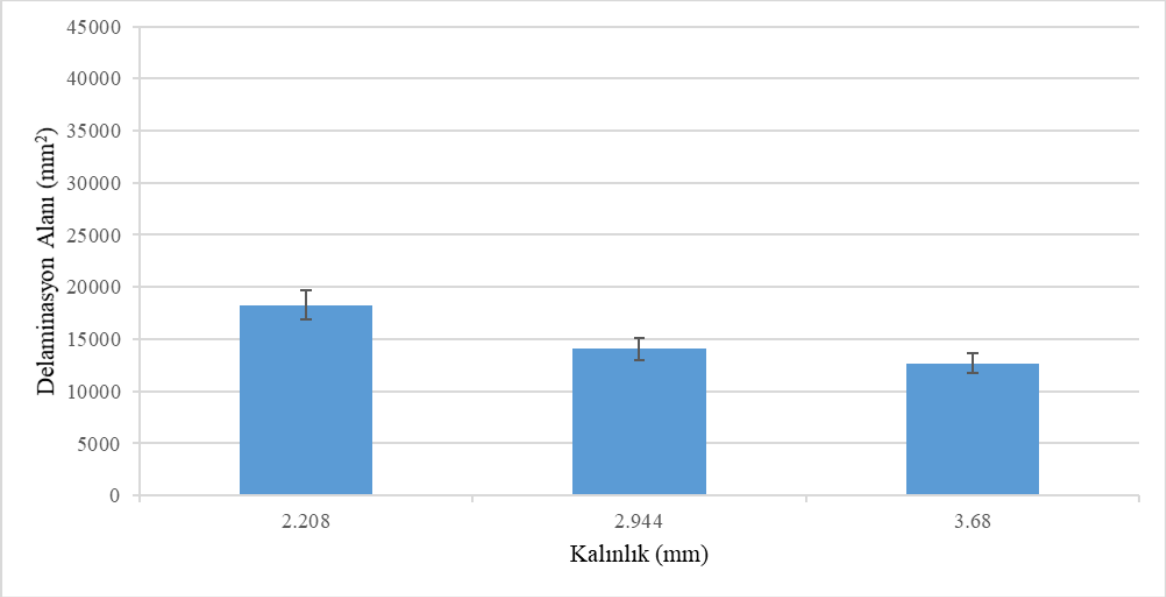
Şekil 4.1. Korumasız - Bölge 3 numuneleri (3 ve 11): kalınlığa karşı delaminasyon alanı

Resim 4.2'de 73 g/m^2 ECF korumalı, Bölge 1A/2A/2B yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16 karşılaştırılmıştır. 1A bölgesi numuneleri; 7, 13 ve 16 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın değişmesi sonucu delaminasyon alanında, 12234 mm^2 ve 14130 mm^2 arasında kısıtlı bir değişim görülmüştür. 2A bölgesi numuneleri; 1, 2, 7, 13 ve 16 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, ortalama yaklaşık 4000 mm^2 delaminasyon alanı elde edilmiştir ancak artan kalınlık ile önce 1865 mm^2 devamında 6476 mm^2 delaminasyon alanı oluşmuştur. Dolayısıyla kalınlığın değişmesi sonucu delaminasyon alanında anlamlı bir değişim görülmemiştir. 2B bölgesi numuneleri; 1, 2, 9 ve 14 gri renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla delaminasyon alanında 14130 mm^2'den 12234 mm^2'ye azalma meydana gelmiştir.



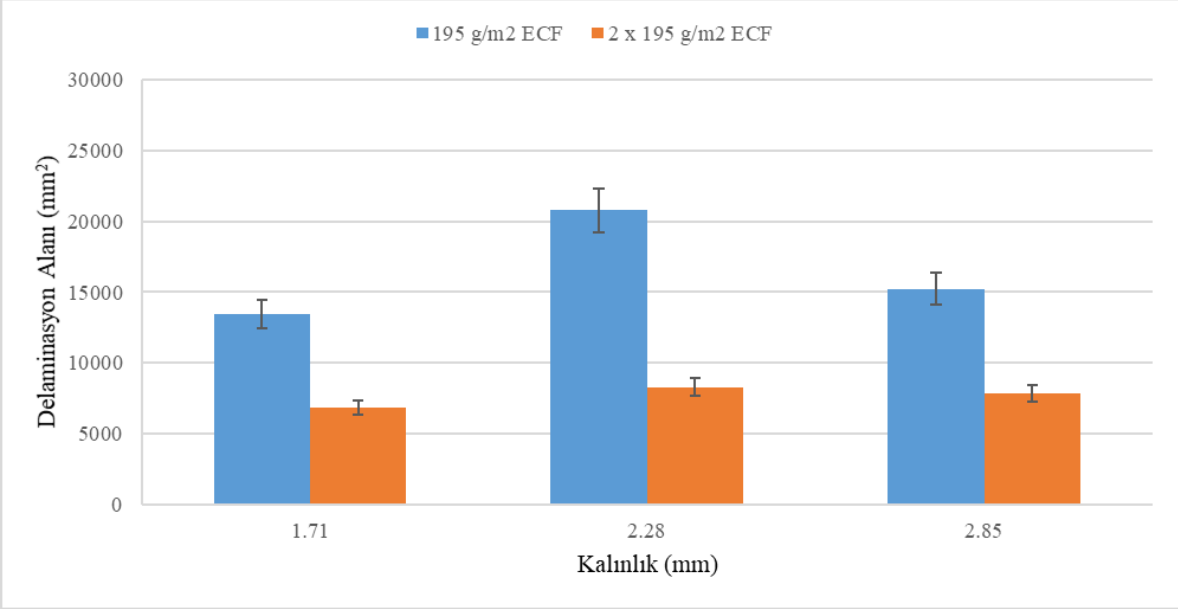
Şekil 4.2. 73 g/m^2 ECF korumalı numuneler (1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16): kalınlığa karşı delaminasyon alanı

Şekil 4.3'te 195 g/m^2 ECF korumalı, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 12 ve 15 karşılaştırılmıştır. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla delaminasyon alanında 18265 mm^2'den 12701 mm^2'ye azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.3. 195 g/m^2 ECF korumalı numuneler (4, 12, ve 15): kalınlığa karşı delaminasyon alanı

Şekil 4.4'te Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen 195 g/m^2 veya 2 × 195 g/m^2 koruma katmanına sahip twill kumaştan üretilen numune 17, 18, 19, 20, 21 ve 22 karşılaştırılmıştır. 195 g/m^2 korumalı numuneler; 17, 19 ve 21 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artması sonucu delaminasyon alanında önce %50 artma sonrasında yaklaşık %40 azalma görülmüştür. 2 × 195 g/m^2korumalı numuneler; 18, 20 ve 22 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artması sonucu delaminasyon alanında belirgin bir değişim yaşanmamıştır.



Şekil 4.4. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21 ve 22): kalınlığa karşı delaminasyon alanı

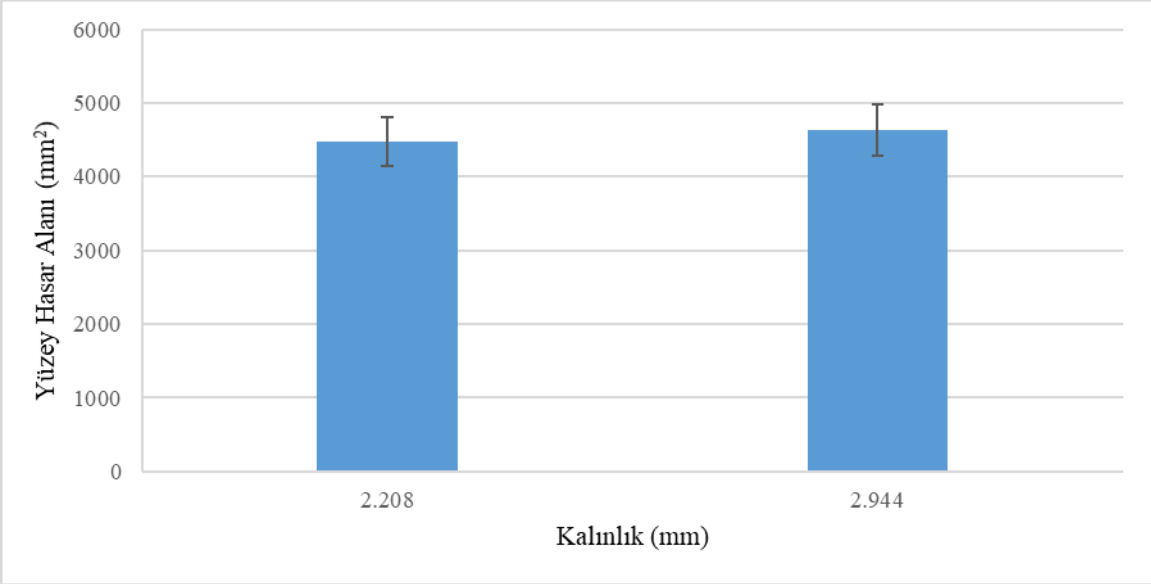
Test sonuçları (Bkz. Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4) birlikte değerlendirildiğinde iki kumaş tipi içinde, farklı koruma katmanları ve farklı yıldırım test parametreleri altında gösterdikleri sonuçlar arasından bir bağlantı kurulamamıştır. Şekil 4.4'e göre artan kalınlık değerleri delaminasyon alanını kısıtlı artırsada; Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'e göre artan kalınlık değerleri delaminasyon alanının hata çubukları dahilinde azalmasına ya da sabit kalmasıyla sonuçlanmıştır. Hirano'nun korumasız KETPK yapılarında bulduğu sonuçla benzer olarak, tez kapsamında çalışılan korumalı KETPK numunelerinin kalınlık değişimi ve delaminasyon alanı arasında kesin bir ilişki bulunamamıştır [34]. Kalınlığın delaminasyon alanını etkilemesinin sebebini, delaminasyonun yaşandığı katmanı düşünerek açıklayabiliriz. Numunelerde gerçekleşen delaminasyon yüzeye yakın katmanlarda gerçekleşmektedir. Twill kumaşta en az altı, tek yönelimli kumaşta ise en az sekiz katman kullanılmıştır. Dolayısıyla en az katmanlı numunelerde dahi en büyük delaminasyon alanı

numunenin derinliklerinde oluşmamıştır. Kalınlığın yıldırım çarpması kaynaklı delaminasyon alanında etkisinin önemsiz olması bu şekilde açıklanabilir.

4.2.2. Kalınlık-yüzey hasar alanı ilişkisi

Kalınlık etkisinin yüzey hasar alanıyla olan bağlantısını incelemek için, koruma seviyesi ve yıldırım test parametreleri aynı olan ama kalınlıkları farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

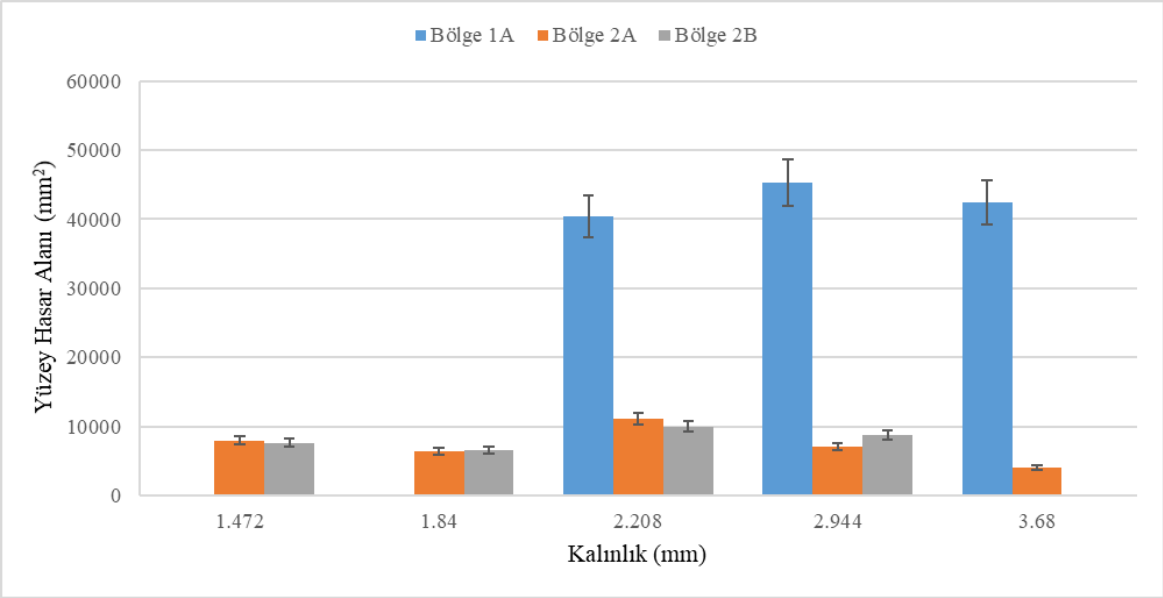
Şekil 4.5'te herhangi bir koruma katmanı kullanılmayan, Bölge 3 yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 3 ve 11 karşılaştırılmıştır. Bu iki numune için artan kalınlıkla yüzey hasar alanında kayda değer bir değişim görülmemiştir.



Şekil 4.5. Korumasız - Bölge 3 numuneleri (3 ve 11): kalınlığa karşı yüzey hasar alanı

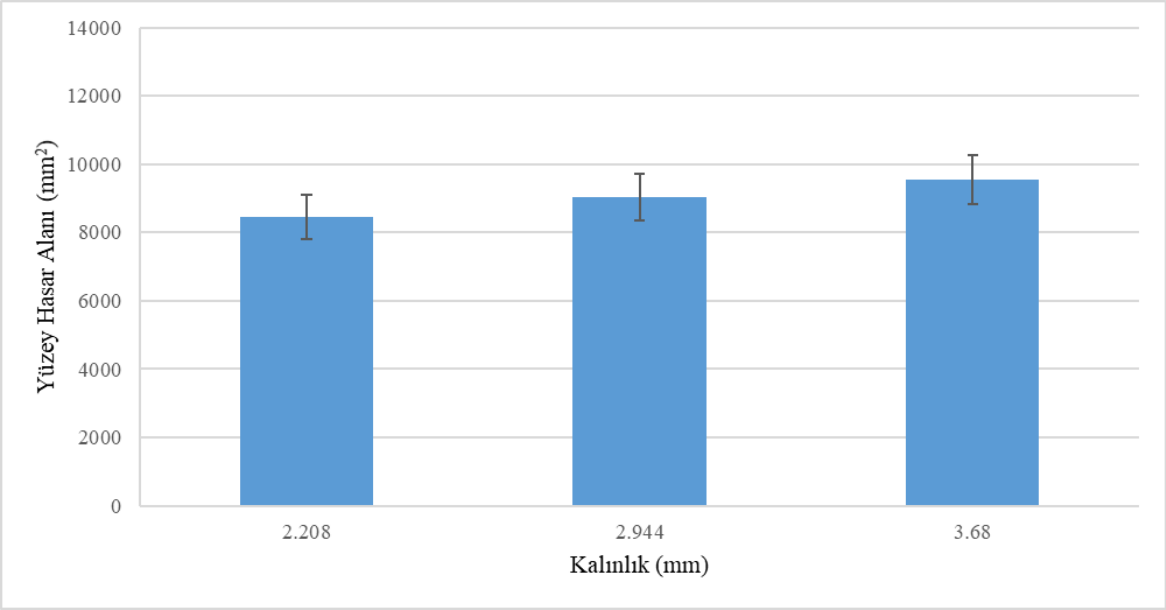
Şekil 4.6'da 73 g/m^2 ECF korumalı, Bölge 1A/2A/2B yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16 karşılaştırılmıştır. 1A bölgesi numuneleri; 7, 13 ve 16 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla yüzey hasar alanında 40334 mm^2 ve 45255 mm^2 seviyeleri arasında belirgin bir farklılaşma görülmemiştir. 2A bölgesi numuneleri; 1, 2, 7, 13 ve 16 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla yüzey hasar alanında dikkate değer değişim görülmemiştir. 2B bölgesi numuneleri; 1, 2, 9

ve 14 gri renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın değişmesi sonucu hasar erozyonu alanında kayda değer bir değişim görülmemiştir.



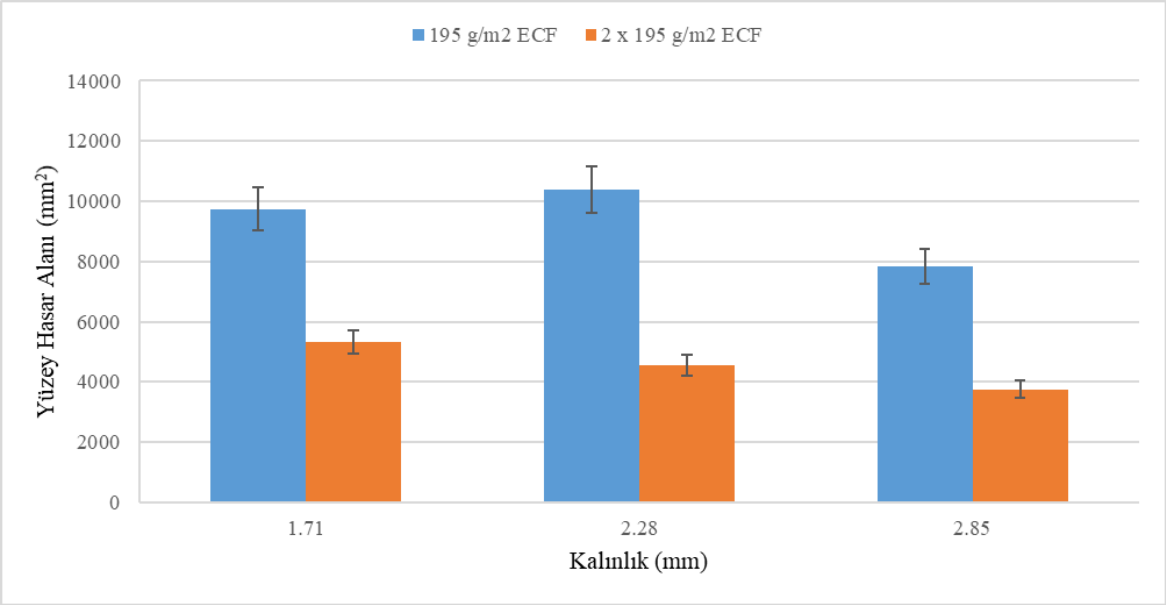
Şekil 4.6. 73 g/m^2 ECF korumalı numuneler (1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16): kalınlığa karşı yüzey hasar alanı

Şekil 4.7'de 195 g/m^2 ECF korumalı, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 12 ve 15 karşılaştırılmıştır. Bu numunelere göre, kalınlığın değişmesi sonucu yüzey hasar alanını 2451 mm^2 ve 9555 mm^2 arasında hata değerleri içinde bir değişim göstermiştir.



Şekil 4.7. 195 g/m^2 ECF korumalı numuneler (4, 12 ve 15): kalınlığa karşı yüzey hasar alanı

Şekil 4.8'de Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen 195 g/m^2 veya 2 × 195 g/m^2koruma katmanına sahip twill kumaştan üretilen numune 17, 18, 19, 20, 21 ve 22 karşılaştırılmıştır. 195 g/m^2 korumalı numuneler; 17, 19 ve 21 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artması sonucu yüzey hasar alanında 10374 mm^2'den 7844 mm^2'ye azalma görülmüştür. 2 × 195 g/m^2korumalı numuneler; 18, 20 ve 22 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın değişmesi sonucu yüzey hasar alanında kayda değer bir değişim görülmemiştir.



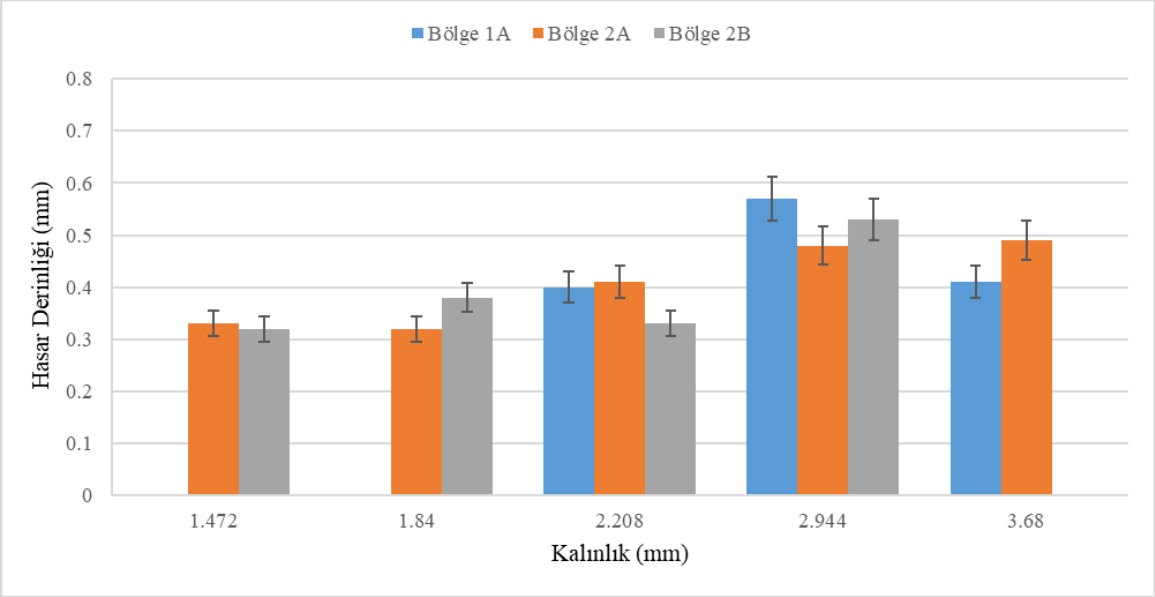
Şekil 4.8. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21 ve 22): kalınlığa karşı yüzey hasar alanı

Test sonuçları (Bkz. Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) birlikte değerlendirildiğinde iki kumaş tipi içinde, farklı koruma katmanları ve farklı yıldırım test parametreleri altında gösterdikleri sonuçlar büyük çoğunlukla kalınlığa bağlı olarak değişiklik göstermemiştir. Sonuçlara göre kalınlık değerleri ve yüzey hasar alanı birbirinden bağımsız düşünebilir. Hirano'nun korumasız KETPK yapılarında bulduğu sonuçla benzer olarak, tez kapsamında çalışılan korumalı KETPK numunelerinin kalınlık değişimi ve yüzey hasar alanı arasında kesin bir ilişki bulunamamıştır [34]. Farklı yıldırım bölgelerinin ve farklı koruma katmanlarının kendi içinde benzer ama birbirleri ile kıyaslandığında, yüzey hasarlarında büyük farkların oluştuğu görülmektedir. Kompozit kalınlık değişiminin yüzey hasar alanını etkilememesinin sebebini, yıldırım arkı ve numune arasındaki etkileşimi düşünerek açıklayabiliriz. Bölüm 2.6.'da değinildiği üzere Bigand ve diğerleri (2019) yıldırım çarpması kaynaklı hasar oluşma sürecini tanımlamıştır. Bu sürece göre yıldırım akımı kaynaklı YKK ya da en dış KETPK katmanı patlaması yüzey hasarı ve delaminasyona neden olmaktadır. Numune yüzeyinde oluşan hasarla KEPTK kalınlığı arasında bir bağlantı görülmemiş, literatürle uyumlu bir sonuç çıkmıştır.

4.2.3. Kalınlık-hasar derinliği ilişkisi

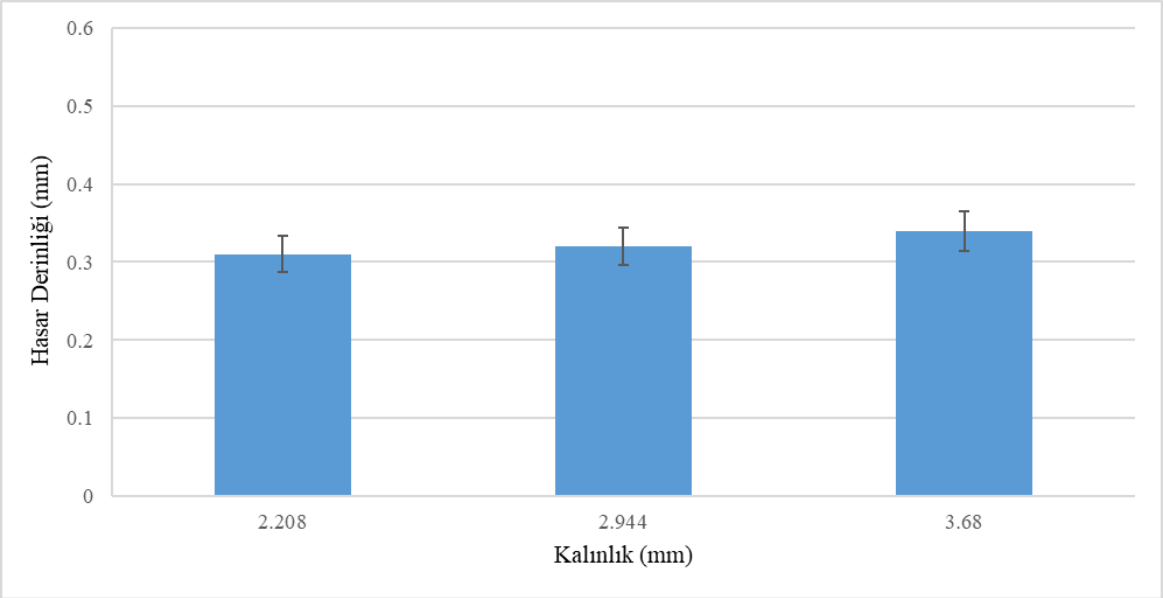
Kalınlık etkisinin hasar derinliği ile olan bağlantısını incelemek için, koruma seviyesi ve yıldırım test parametreleri aynı olan ama kalınlıkları farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.9'da 73 g/m^2 ECF korumalı, Bölge 1A/2A/2B yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16 karşılaştırılmıştır. 1A bölgesi numuneleri; 7, 13 ve 16 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın değişmesi sonucu hasar derinliği başta iki katmandan üç katman derinliğine artış sonrasında tekrar iki katman derinliğine azalış şeklinde meydana gelmiştir. 2A bölgesi numuneleri; 1, 2, 7, 13 ve 16 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla hasar derinliği ikinci katmandan üçüncü katmana artış göstermiştir. 2B bölgesi numuneleri; 1, 2, 9 ve 14 gri renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla hasar derinliği ikinci ve üçüncü kompozit katmanı arasında değişim göstermiştir.



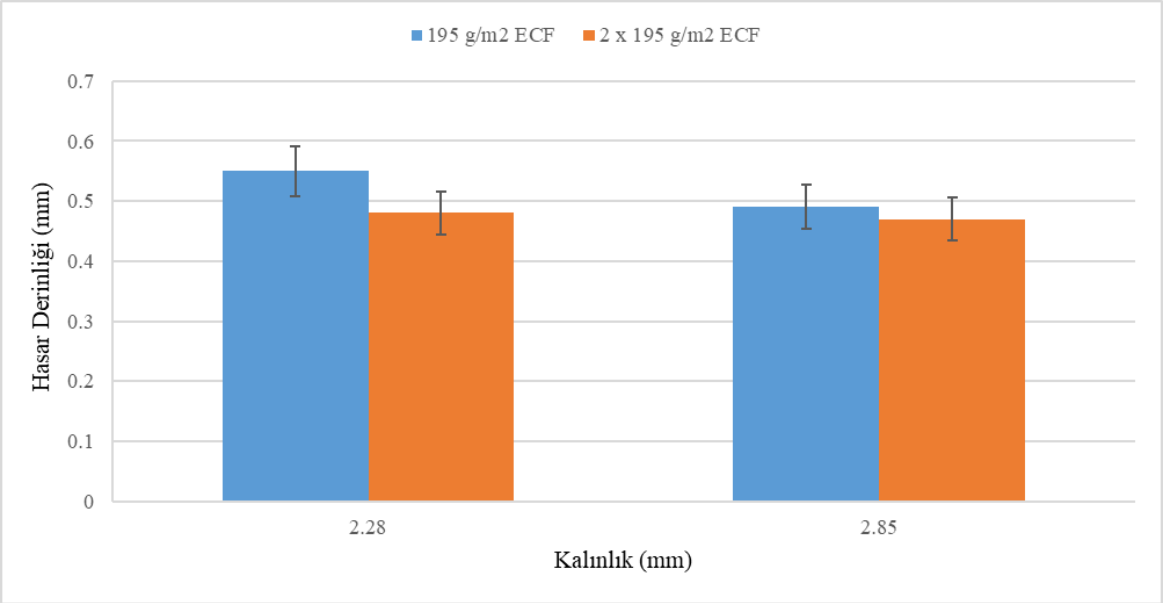
Şekil 4.9. 73 g/m^2 korumalı numuneler (1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16): kalınlığa karşı hasar derinliği

Şekil 4.10'da 195 g/m^2 ECF korumalı, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 12 ve 15 karşılaştırılmıştır. Bu numunelere göre, kalınlığın değişmesi sonucu hasar derinliğinde kayda değer bir değişim görülmemiş aynı katman derinliğine hasar ilerlemiştir.



Şekil 4.10. 195 g/m^2 ECF korumalı numuneler (4, 12 ve 15): kalınlığa karşı hasar derinliği

Şekil 4.11'de Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen 195 g/m^2 veya 2 × 195 g/m^2 koruma katmanına sahip twill kumaştan üretilen numune 19, 20, 21 ve 22 karşılaştırılmıştır. 195 g/m^2 korumalı numuneler; 19 ve 21 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, hasar derinliği üçüncü kompozit katmanında sınırlı kalmıştır. $2 \times 195\ g/m^2$ korumalı numuneler; 20 ve 22 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın değişmesi sonucu hasar derinliğinde bir değişim görülmemiştir.



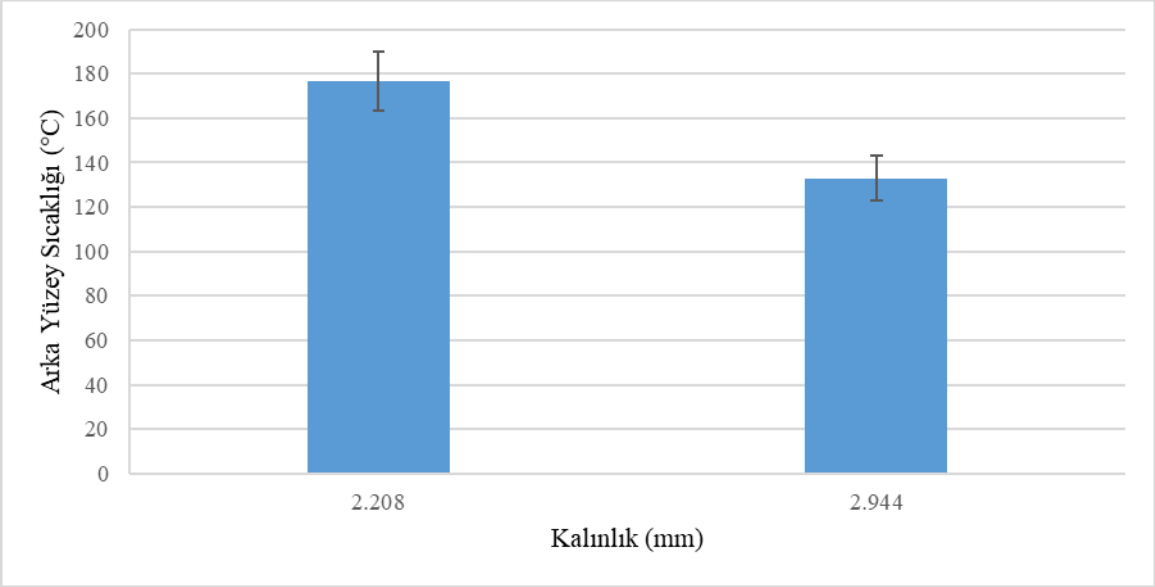
Şekil 4.11. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (19, 20, 21 ve 22): kalınlığa karşı hasar derinliği

Test sonuçları (Bkz. Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11) birlikte değerlendirildiğinde iki kumaş tipi içinde, farklı koruma katmanları ve farklı yıldırım test parametreleri altında gösterdikleri sonuçlar arasından bir bağlantı kurulamamıştır. Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 ifade edilen verilere göre artan kalınlık değerleri hasar derinliğini etkilemesede; Şekil 4.9'a göre artan kalınlık değerleri hasar derinliğinin artmasıyla sonuçlanmıştır. Şekillerde incelenen tüm numunelerde hasar ikinci veya üçücü katmana kadar ilerlemiş, hasar derinliği yaklaşık 0.3mm ve 0.5mm değerleri arasında oluşmuştur. Hirano'nun korumasız KETPK yapılarında bulduğu sonuçla benzer olarak, tez kapsamında çalışılan korumalı KETPK numunelerinin kalınlık değişimi ve hasar derinliği arasında kesin bir ilişki bulunamamıştır [34]. . Kompozit kalınlık değişiminin hasar derinliğini etkilememesinin sebebini, yıldırım arkı ve numune arasındaki etkileşimi düşünerek açıklayabiliriz. Bölüm 2.6.'da değinildiği üzere Bigand yıldırım çarpması kaynaklı hasar oluşma sürecini tanımlamıştır [43]. Bu sürece göre yıldırım akımı kaynaklı olarak YKK ya da en dış KETPK katmanı patlaması yüzey hasarı ve delaminasyona neden olmaktadır. Numunenin tamamının delindiği durumlar dışında, hasar derinlikleri yüzeye yakın oluşmuştur. Bu çalışma kapsamında kullanılan kalınlıklar düşünüldüğünde, KETPK kalınlığının hasar derinliğine etkisi görülmemektedir.

4.2.4. Kalınlık - arka yüzey sıcaklığı ilişkisi

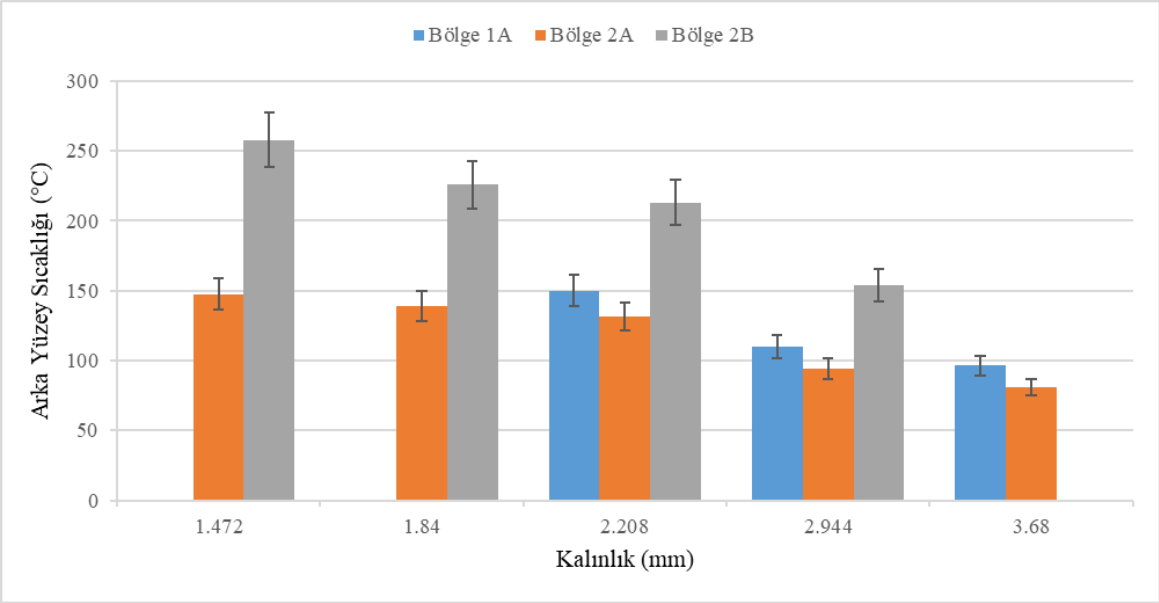
Kalınlık etkisinin arka yüzey sıcaklığıyla olan bağlantısını incelemek için, koruma seviyesi ve yıldırım test parametreleri aynı olan ama kalınlıkları farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.12'de herhangi bir koruma katmanı kullanılmayan, Bölge 3 yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 3 ve 11 karşılaştırılmıştır. Bu iki numune için artan kalınlıkla arka yüzey sıcaklığının 177 °C'den 133 °C'ye düştüğü tecrübe edilmiştir.



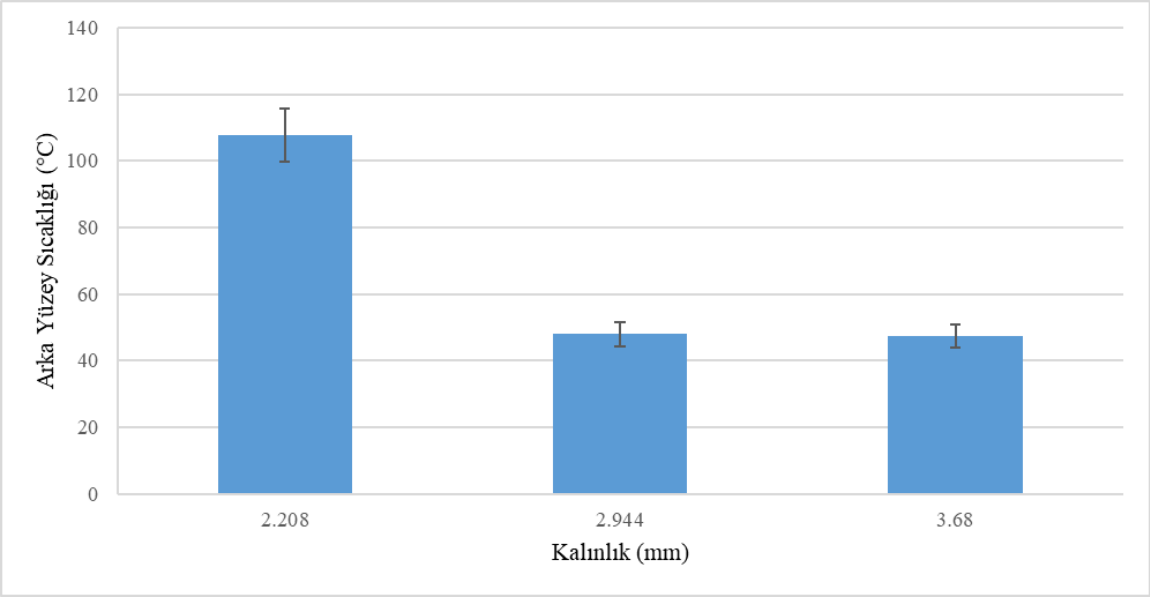
Şekil 4.12. Korumasız - bölge 3 numuneleri (3 ve 11): kalınlığa karşı arka yüzey sıcaklığı

Şekil 4.13'de 73 g/m^2 ECF korumalı, Bölge 1A/2A/2B yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16 karşılaştırılmıştır. 1A bölgesi numuneleri; 7, 13 ve 16 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla arka yüzey sıcaklığının 150,1 °C'den 96,4 °C'ye düştüğü tecrübe edilmiştir. 2A bölgesi numuneleri; 1, 2, 7, 13 ve 16 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla arka yüzey sıcaklığını kademeli olarak 147,6 °C'den 81,1 °C'ye düşmüştür. 2B bölgesi numuneleri; 1, 2, 9 ve 14 gri renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla arka yüzey sıcaklığının 257,7 °C'den 153,2 °C'ye belirgin şekilde düştüğü görülmüştür.



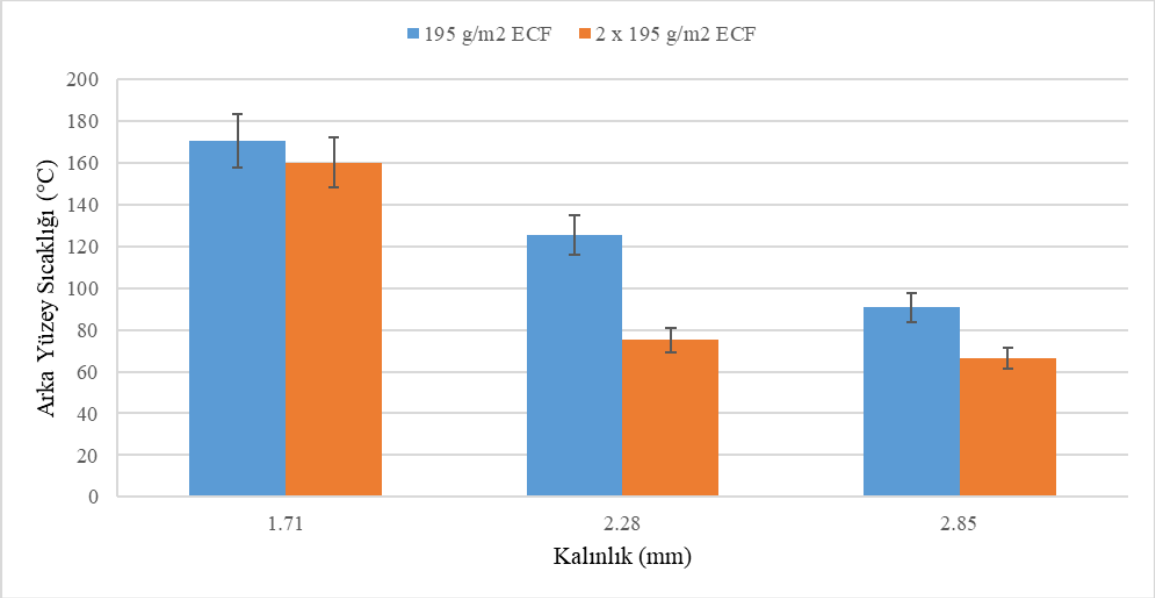
Şekil 4.13. 73 g/m^2 ECF korumalı numuneler (1, 2, 7, 9, 12, 13, 14 ve 16): kalınlığa karşı arka yüzey sıcaklığı

Şekil 4.14'de 195 g/m^2 ECF korumalı, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 12 ve 15 karşılaştırılmıştır. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla arka yüzey sıcaklığının düştüğü gözlemlenmiştir ama 2,94 mm ve 3,68 mm kalınlığındaki numunelerde birbirine çok yakın değerler okunmuştur.



Şekil 4.14. 195 g/m^2 ECF korumalı numuneler (4, 12 ve 15): kalınlığa karşı arka yüzey sıcaklığı

Şekil 4.15'te Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen 195 g/m^2 veya 2 × 195 g/m^2 koruma katmanına sahip twill kumaştan üretilen numune 17, 18, 19, 20, 21 ve 22 karşılaştırılmıştır. 195 g/m^2 korumalı numuneler; 17, 19 ve 21 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla arka yüzey sıcaklığını 170,7 °C'den önce 125,3 °C'ye devamında ise 90,7 °C'ye kadar düştüğü tecrübe edilmiştir. 2 × 195 g/m^2 korumalı numuneler; 18, 20 ve 22 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelere göre, kalınlığın artmasıyla arka yüzey sıcaklığının 160,1 °C'den, 66,3 °C seviyelerine düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21 ve 22): kalınlığa karşı arka yüzey sıcaklığı

Test sonuçları (Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15) birlikte değerlendirildiğinde iki kumaş tipi içinde, farklı koruma katmanları ve farklı yıldırım test parametreleri altında gösterdikleri sonuçlara göre artan numune kalınlığı ile arka yüzey sıcaklığının düştüğü görülmüştür. Karbon elyaf katmanlarının eklenmesi genellikle belirgin sıcaklık düşüşlerine neden olmuştur. Değerler incelendiğinde katman başına ortalama %10 sıcaklık düşüşü olmaktadır ancak bu değer özellikle koruma katmanın varlığı ve çeşidine göre %1-%24 arasında değişkenlik göstermektedir. Karbon elyaflar metaller kadar olmasada termal iletkenlikleri yüksek malzemelerdir. Karbon elyaflar dielektrik bir malzeme olan epoksi matris ile birleşince, özellikle düzlem dışı yönde termal iletkenlikleri önemli ölçüde azalmaktadır. Geleneksel alüminyum metalinin, karbon elyafın, epoksinin ve KETPK'in termal iletkenlik değerleri Çizelge 4.1'de listelenmiştir. KETPK yapıların düşük termal

iletkenlik değerine sahip olmaları, numunelerin dış yüzeyinde yaşanan yıldırım çarpması kaynaklı ısının numunenin arka yüzeyine iletilmesini azaltmaktadır. Dolayısıyla numune kalınlığı arttıkça numune arka yüzeyinde okunan sıcaklık değerinde düşüş görülmektedir. Literatürde (Bkz. Şekil 2.17), artan kompozit kalınlığıyla arka yüzey sıcaklık artışındaki düşüş görülmektedir. Korumasız kompozitlerin kullanıldığı bu sonuçlarla, gerdirilmiş bakır folyonun koruma katmanı olarak kullanıldığı bu çalışmanın sonuçları uyuşmaktadır. 2B bölgesi numuneleri olan 1, 2, 9 ve 14'ün dışında bu bölümde karşılaştırılan numunelerden sıcak yüzey alev alma limiti olan $200\,^{o}C$'yi geçen senaryo olmamıştır. Numune 1, 2, 9 ve 14 incelendiğinde, artan kalınlıkla yüzey arkası sıcaklığının düştüğü görülmüştür. Hatta en kalın numune olan 14 ile beraber yüzey arkası sıcaklığı $153{,}7\,^{o}C$'ye kadar düşürülmüştür. Dolayısıyla numune kalınlığının değiştirilmesiyle yakıtta meydana gelebilecek sıcak yüzey alev alması engellenebilir.

Çizelge 4.1. Bazı malzemelerin termal iletkenlikleri [51, 52]

Malzeme	Termal İletkenlik ($W/m^{-1}K^{-1}$)
Alüminyum	210
Karbon Elyaf	21-180
Epoxy	0,5-1,5
KETPK (Düzlem içi)	5-7
KETPK (Düzlem Dışı)	0,5-0,8

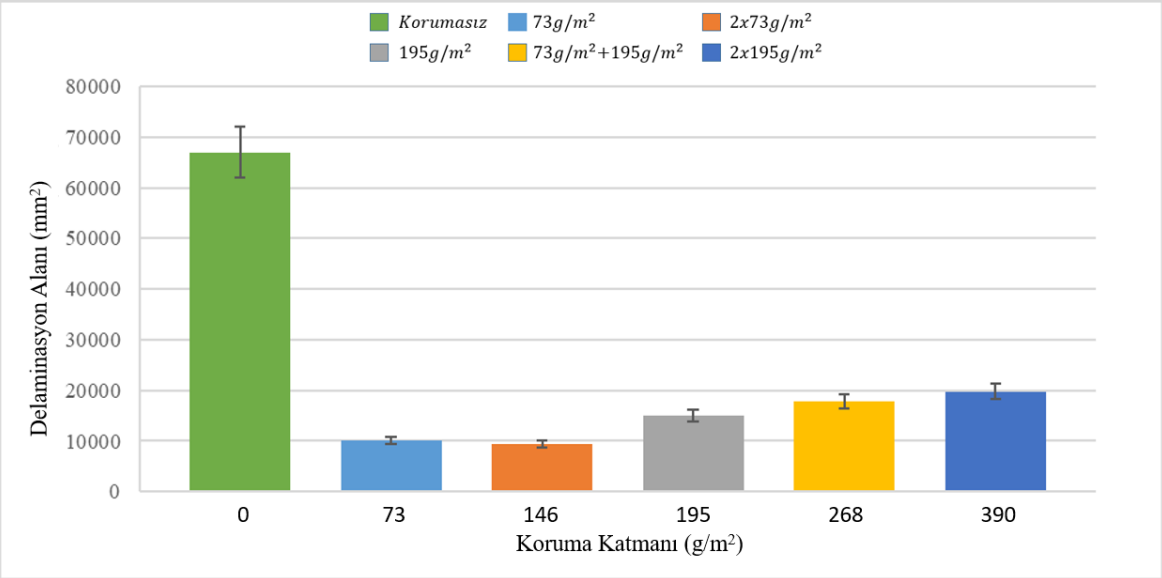
4.3. Koruma Katmanı Etkisi

Çizelge 3.1.'de görüldüğü üzere test matrisi oluşturulurken YKK'de farklılıklar yaratılarak, gerdirilmiş bakır folyo kullanımının yıldırım çarpması sonucu oluşan delaminasyon alanı, yüzey erozyonu, hasar derinliği ve numune arkasında oluşan sıcaklıkla ilişkisini görmek amaçlanmıştır.

4.3.1. ECF - Delaminasyon alanı ilişkisi

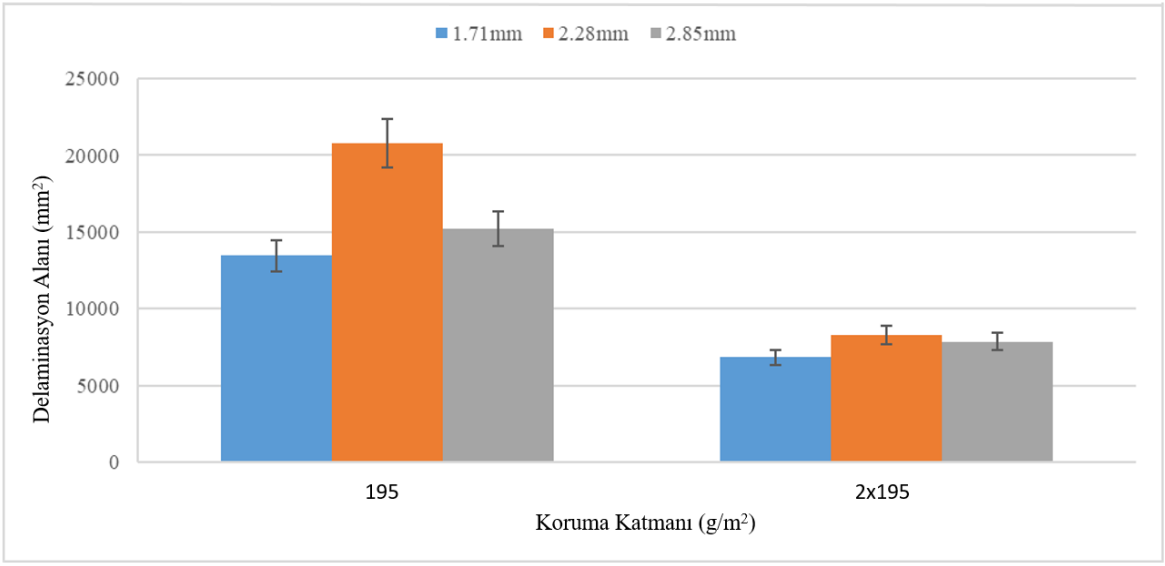
ECF etkisinin delaminasyon alanıyla olan bağlantısını incelemek için, kalınlığı ve yıldırım test parametreleri aynı olan ama ECF kombinasyonları farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.16'da farklı kalınlıkta ki, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15 ve 16 karşılaştırılmıştır. Korumasız numune 10, yeşil renkli verilerle ifade edilmiştir. 73 g/m^2 korumalı numunelerin (7, 13 ve 16) ortalama verileri mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. $2 \times 73\ g/m^2$ korumalı numune 8, turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. 195 g/m^2 korumalı numunelerin (4, 12 ve 15) ortalama verileri gri renkli verilerle ifade edilmiştir. $73\ g/m^2 + 195\ g/m^2$ korumalı numune 5, sarı renkli verilerle ifade edilmiştir. $2 \times 195\ g/m^2$ korumalı numune 6, koyu mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde ECF korumasıyla delaminasyon alanının ortalama beş kat şiddetli azaldığı görülmüştür ancak artan ECF ağırlığı ile delaminasyon alanında kısıtlı bir artış görülmüştür.



Şekil 4.16. Bölge 1A numuneleri (4, 5, 6, 10, 12, 13, 15 ve 16): koruma katmanına karşı delaminasyon alanı

Şekil 4.17'de farklı kalınlıkta ki, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve twill kumaştan üretilen numune 17, 18, 19, 20, 21 ve 22 karşılaştırılmıştır. 1,71 mm kalınlığında ki numuneler: 17 ve18 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde artan ECF korumasıyla delaminasyon alanının yaklaşık %50 oranında azaldığı görülmüştür. 2,28 mm kalınlığında ki numuneler: 19 ve 20 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde artan ECF korumasıyla delaminasyon alanının yaklaşık %40 oranında azaldığı görülmüştür. 2,85 mm kalınlığında ki numuneler: 21 ve 22 gri renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde artan ECF korumasıyla delaminasyon alanının yaklaşık %50 oranında azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.17. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21, 22) koruma katmanına karşı delaminasyon alanı

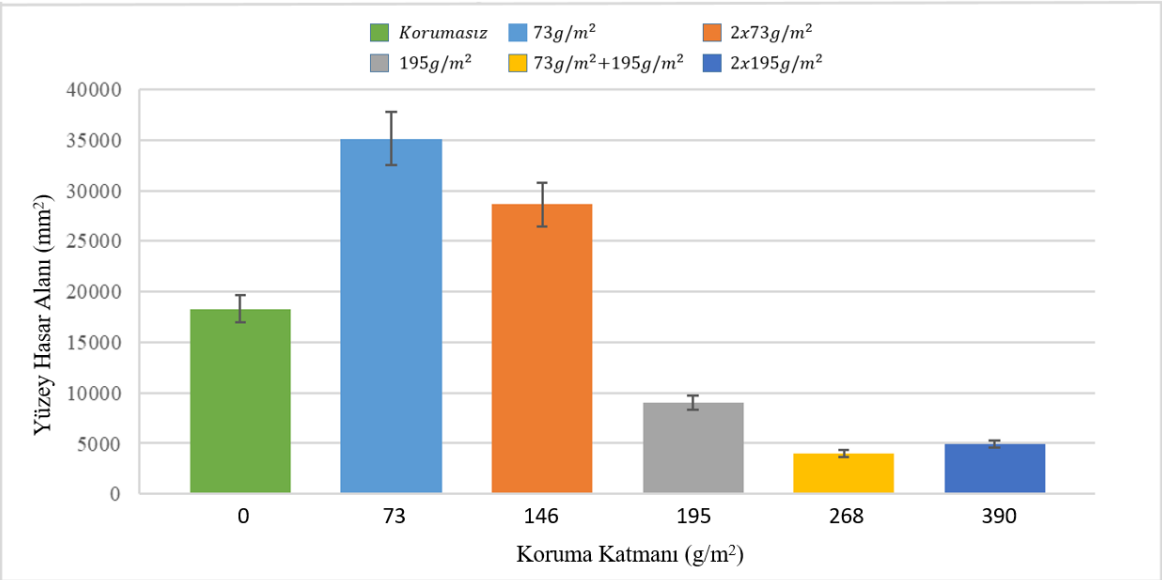
Test sonuçları (Bkz. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17) birlikte değerlendirildiğinde iki kumaş tipi içinde, farklı numune kalıkları ve farklı yıldırım test parametreleri altında gösterdikleri sonuçlara göre artan gerdirilmiş bakır folyo koruma kullanımı ile delaminasyon alanının ortalama beş kat daraldığı görülmüştür. Twill numunelerde ECF'ler beklenen koruma etkisini gösterip, artan yüzey alanınca ağırlık miktarlarıyla yıldırım çarpması kaynaklı delaminasyon hasarında yaklaşık %40 - %50 oranında azalma sağlamıştır. UD numunelerde ise artan ECF ağırlıklarının delaminasyona etkisi sınırlı kalmıştır. Dhanya ve Yerramalli (2018) tarafından gerçekleştirilen bakır ağ koruma katmanındaki kalınlık artışının (Bkz. Şekil 2.13), KETPK'de meydana gelen hasarda azalmaya neden olduğu belirtilmiştir [41]. Bu çalışmada da artan koruma katmanı kalınlığının delaminasyon hasarını düşürmesi, literatürle uyumlu sonuçları göstermektedir. Artan koruma miktarının, KETPK yapıya eklenmiş ekstra bir ağırlık olduğu unutulmadan optimum miktarda YKK kullanılmalıdır.

4.3.2. ECF – Yüzey hasar alanı ilişkisi

ECF etkisinin yüzey hasar alanıyla olan bağlantısını incelemek için, kalınlığı ve yıldırım test parametreleri aynı olan ama ECF kombinasyonları farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

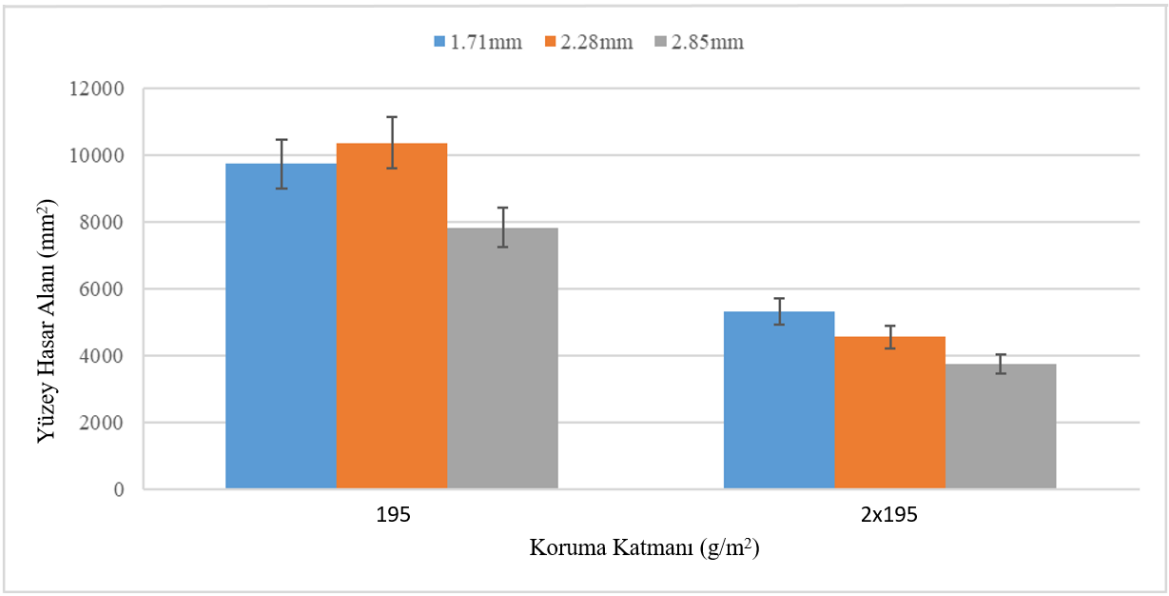
Şekil 4.18'da farklı kalınlıkta ki, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15 ve 16 karşılaştırılmıştır. Korumasız numune 10, yeşil renkli verilerle ifade edilmiştir. 73 g/m^2

korumalı numunelerin (7, 13 ve 16) ortalama verileri mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. $2 \times 73\ g/m^2$ korumalı numune 8, turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. $195\ g/m^2$ korumalı numunelerin (4, 12 ve 15) ortalama verileri gri renkli verilerle ifade edilmiştir. $73\ g/m^2 + 195\ g/m^2$ korumalı numune 5, sarı renkli verilerle ifade edilmiştir. $2 \times 195\ g/m^2$ korumalı numune 6, koyu mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde ECF korumasıyla delaminasyon alanında dikkate değer değişimler görülmüştür. $73\ g/m^2$ ve $2 \times 73\ g/m^2$ korumalı numunlerde meydana gelen hasar korumasız numuden yaklaşık %50 - %100 daha fazla olmuştur. Korumasız numunede düşük yüzey iletkenliği nedeniyle yıldırım akımı numune içine daha rahat nüfuz edebilmiş ve dış hasardan çok iç hasara neden olmuştur. Korumalı numunelerde ise artan ECF miktarı yüzey hasarında azalmaya neden olmuştur.



Şekil 4.18. Bölge 1A numuneleri (4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15, 16): koruma katmanına karşı yüzey hasar alanı

Şekil 4.19'de farklı kalınlıkta ki, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve twill kumaştan üretilen numune 17, 18, 19, 20, 21 ve 22 karşılaştırılmıştır. 1,71 mm kalınlığında ki numuneler: 17 ve18 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. 2,28 mm kalınlığında ki numuneler: 19 ve 20 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. 2,85 mm kalınlığında ki numuneler: 21 ve 22 gri renkli verilerle ifade edilmiştir. Tüm numunelerde artan ECF korumasıyla yüzey hasar alanının ortalama %50 azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.19. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (17, 18, 19, 20, 21 ve 22) koruma katmanına karşı yüzey hasar alanı

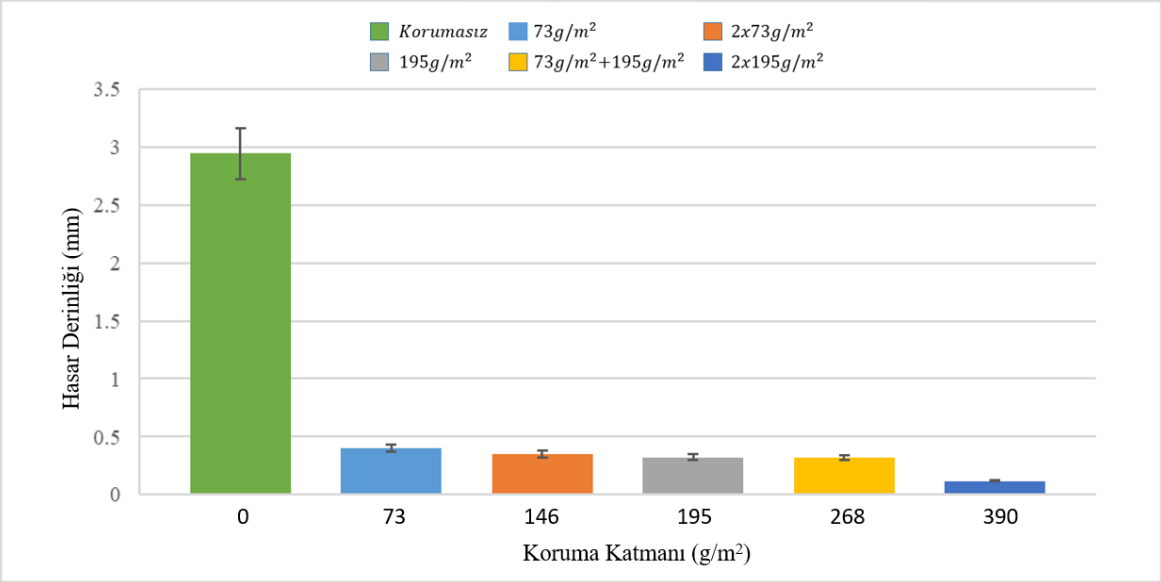
Test sonuçları (Bkz. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19) hep beraber düşünüldüğünde iki kumaş tipi içinde, farklı numune kalıkları ve farklı yıldırım test parametreleri altında gösterdikleri sonuçlara göre artan gerdirilmiş bakır folyo koruması ile yüzey hasar alanının daraldığı görülmüştür. ECF'ler beklenen koruma etkisini gösterip, artan yüzey alanınca ağırlık miktarlarıyla yıldırım çarpması kaynaklı yüzey hasar hasarında azalma sağlamıştır. Artan koruma miktarının, KETPK yapıya eklenmiş ekstra bir ağırlık olduğu unutulmadan optimum miktarda YKK kullanılmalıdır. Korumasız numunenin bazı ECF korumalı numunelere kıyasla daha düşük yüzey kasarı göstersede, yüksek elektriksel enerjinin numune içinde şiddetli hasara neden olduğu dikkat çekicidir.

4.3.3. ECF – Hasar derinliği ilişkisi

ECF etkisinin hasar derinliğiyle olan bağlantısını incelemek için, kalınlığı ve yıldırım test parametreleri aynı olan ama ECF kombinasyonları farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

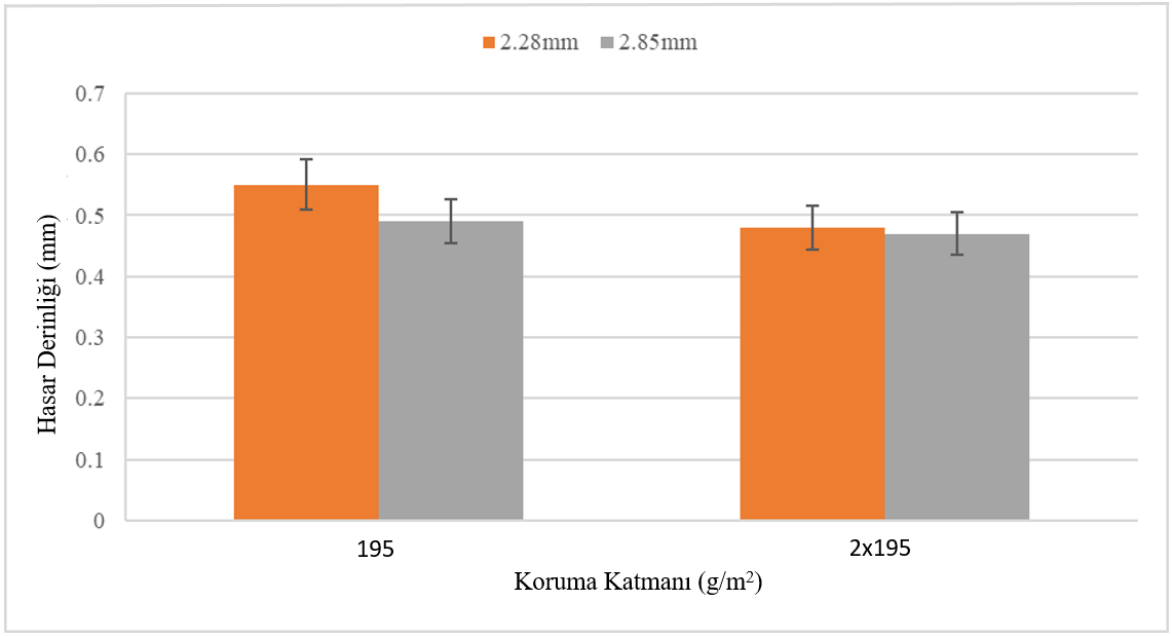
Şekil 4.20'de farklı kalınlıkta ki, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15 ve 16 karşılaştırılmıştır. Korumasız numune 10, yeşil renkli verilerle ifade edilmiştir. 73 g/m^2 korumalı numunelerin (7, 13 ve 16) ortalama verileri mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. 2×73 g/m^2 korumalı numune 8, turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. 195 g/m^2 korumalı numunelerin (4, 12 ve 15) ortalama verileri gri renkli verilerle ifade edilmiştir.

$73\ g/m^2$ + $195\ g/m^2$ korumalı numune 5, sarı renkli verilerle ifade edilmiştir. $2 \times 195\ g/m^2$ korumalı numune 6, koyu mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde ECF korumasıyla hasar derinliği şiddetli azaldığı görülmüştür ancak artan ECF ağırlığı ile hasar derinliğinden kısıtlı bir azalış görülmüştür ve hasar ilk birkaç katmanda sınırlı kalmıştır.



Şekil 4.20. Bölge 1A numuneleri (4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15, 16): koruma katmanına karşı hasar derinliği

Şekil 4.21'de farklı kalınlıkta ki, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve twill kumaştan üretilen numune 19, 20, 21 ve 22 karşılaştırılmıştır. 2,28 mm kalınlığında ki numuneler: 19 ve 20 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde artan ECF korumasıyla hasar derinliğinin bir miktar azaldığı görülmüştür. 2,85 mm kalınlığında ki numuneler: 21 ve 22 gri renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde artan ECF korumasıyla hasar derinliğinin aynı katmanda yaşandığı görülmüştür.



Şekil 4.21. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (19, 20, 21 ve 22) koruma katmanına karşı hasar derinliği

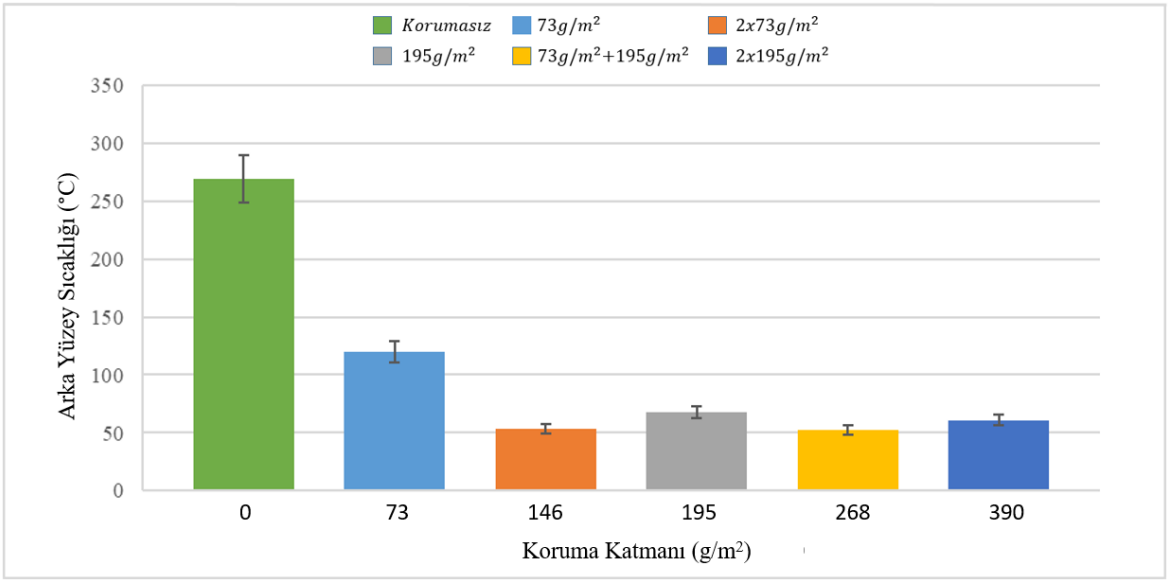
Test sonuçları (Bkz. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21) hep beraber düşünüldüğünde iki kumaş tipi içinde, farklı numune kalıkları ve farklı yıldırım test parametreleri altında gösterdikleri sonuçlara göre artan gerdirilmiş bakır folyo koruması ile hasar derinliğinin düştüğü görülmüştür. ECF'ler beklenen koruma etkisini gösterip, artan yüzey alanınca ağırlık miktarlarıyla yıldırım çarpması kaynaklı hasar derinliğinde azalma sağlamıştır. Özellikle korumasız numunenin yıldırım kaynaklı yükler nedeniyle boydan boya delinirken, ECF korumalı numunelerde hasar ilk katmanlardan öteye geçememiştir. Dhanya ve Yerramalli (2018) tarafından gerçekleştirilen bakır ağ koruma katmanındaki kalınlık artışının (Bkz. Şekil 2.13), KETPK'de meydana gelen hasarda azalmaya neden olduğu belirtilmiştir [41]. Bu çalışmada da artan koruma katmanı kalınlığının hasar derinliğini düşürmesi, literatürle uyumlu sonuçları göstermektedir.

4.3.4. ECF – Arka yüzey sıcaklığı ilişkisi

ECF etkisinin numunelerin arka yüzey sıcaklığıyla olan bağlantısını incelemek için, kalınlığı ve yıldırım test parametreleri aynı olan ama ECF kombinasyonları farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

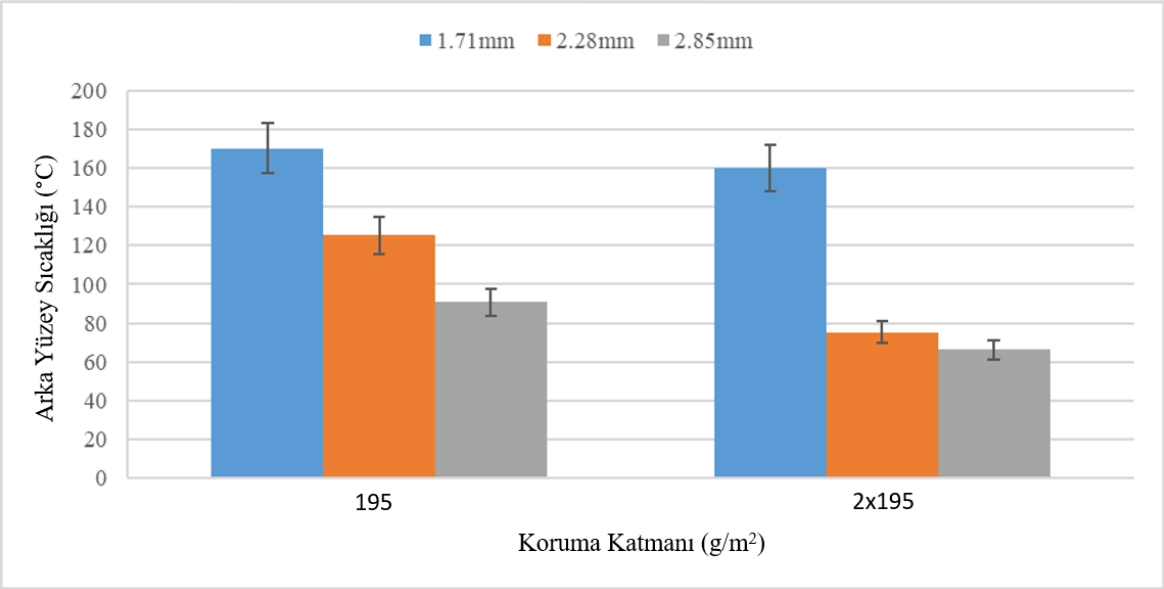
Şekil 4.22'de farklı kalınlıkta ki, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15 ve 16

karşılaştırılmıştır. Korumasız numune 10, yeşil renkli verilerle ifade edilmiştir. 73 g/m^2 korumalı numunelerin (7, 13 ve 16) ortalama verileri mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. $2 \times 73\ g/m^2$ korumalı numune 8, turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. 195 g/m^2 korumalı numunelerin (4, 12 ve 15) ortalama verileri gri renkli verilerle ifade edilmiştir. $73\ g/m^2 + 195\ g/m^2$ korumalı numune 5, sarı renkli verilerle ifade edilmiştir. $2 \times 195\ g/m^2$ korumalı numune 6, koyu mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde ECF korumasıyla arka yüzey sıcaklığının 269,2 °C'den 50 – 120 °C seviyesine şiddetli düştüğü görülmüştür ancak artan ECF ağırlığı ile arka yüzey sıcaklığında kısıtlı bir değişim meydana gelmiştir.



Şekil 4.22. Bölge 1A numuneleri (4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 15 ve 16): koruma katmanına karşı arka yüzey sıcaklığı

Şekil 4.23'de farklı kalınlıkta ki, Bölge 1A yıldırım dalga formları altında testi gerçekleşen ve twill kumaştan üretilen numune 17, 18, 19, 20, 21 ve 22 karşılaştırılmıştır. 1,71 mm kalınlığında ki numuneler: 17 ve 18 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. 2,28 mm kalınlığında ki numuneler: 19 ve 20 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. 2,85 mm kalınlığında ki numuneler: 21 ve 22 gri renkli verilerle ifade edilmiştir. Tüm numunelerde artan ECF korumasıyla arka yüzey sıcaklığının azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.23. Bölge 1A twill kumaş numuneleri (19, 20, 21, 22) koruma katmanına karşı arka yüzey sıcaklığı

Test sonuçları (Bkz. Şekil 4.22 ve Şekil 4.23) birlikte değerlendirildiğinde iki kumaş tipi içinde, farklı numune kalıkları ve farklı yıldırım test parametreleri altında gösterdikleri sonuçlara göre artan gerdirilmiş bakır folyo koruması ile arka yüzey sıcaklığının genellikle düştüğü görülmüştür. Özellikle korumasız numune ve ECF korumalı numuneler arasında arka yüzey sıcaklığında %100 - %400 oranında fark görülmüştür. ECF'ler beklenen koruma etkisini gösterip, artan yüzey alanınca ağırlık miktarlarıyla yıldırım çarpması kaynaklı arka yüzey sıcaklığında azalma sağlamıştır. Bu azalma gerdirilmiş bakır folyonun, yıldırım enerjisinin kompozitin içine nüfus etmesini azaltmasıyla açıklanabilir.

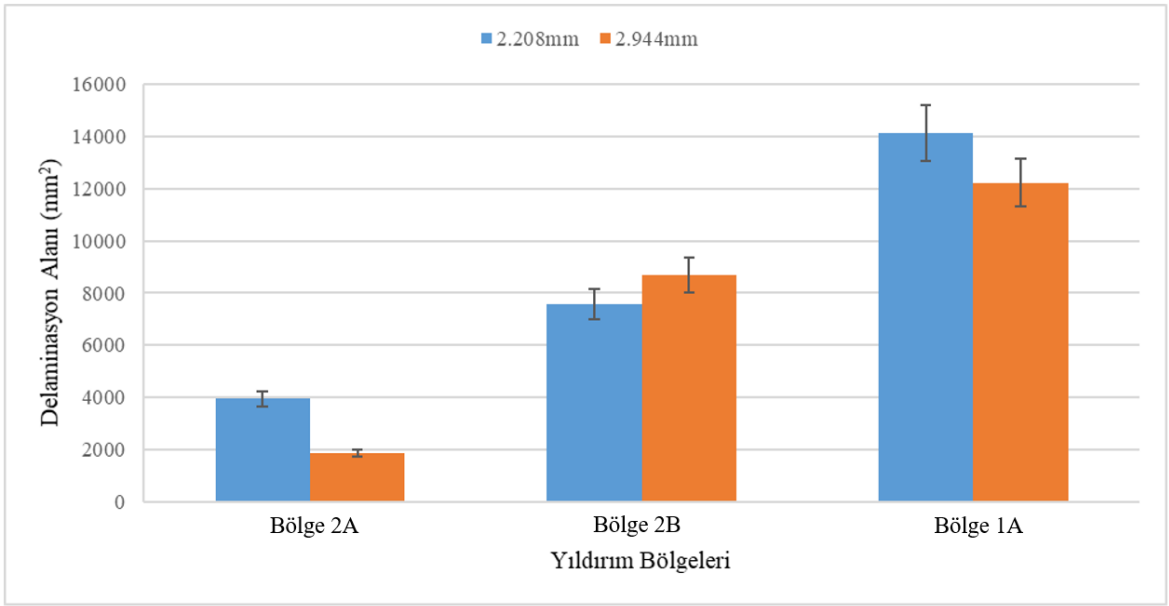
4.4. Yıldırım Bölgesi Etkisi

Çizelge 3.1.'de görüldüğü üzere test matrisi oluşturulurken numuneler farklı yıldırım bölgeleri düşünülerek, yıldırım parametrelerinin yıldırım çarpması sonucu oluşan delaminasyon alanı, yüzey erozyonu, hasar derinliği ve numune arkasında oluşan sıcaklıkla ilişkisini görmek amaçlanmıştır. Yıldırım bölgelerinin farklı tepe akım, verilen enerji ve yük transferi gibi farklı yıldırım kaynaklı parametreleri ifade edişini önceki bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

4.4.1. Yıldırım bölgesi - delaminasyon alanı ilişkisi

Yıldırım bölgesi etkisinin delaminasyon alanıyla olan bağlantısını incelemek için, kalınlığı ve ECF koruması aynı olan ama yıldırım bölgesi farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.24'de farklı kalınlıkta ki, 73 g/m^2 korumaya sahip ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 7, 9, 13 ve 14 karşılaştırılmıştır. 2,208 mm kalınlığında ki numuneler: 7 ve 9 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde azalan yıldırım parametreleri şiddetiyle delaminasyon alanının 3940 mm^2'den önce 7576 mm^2'ye sonra ise 14130 mm^2'ye arttığı görülmüştür. 2,944 mm kalınlığında ki numuneler: 13 ve 14 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. . Bu numunelerde azalan yıldırım parametreleri şiddetiyle delaminasyon alanının 1865 mm^2'den önce 8691 mm^2'ye sonra ise 12234 mm^2'ye belirgin artışı görülmektedir. Literatürde artan elektriksel parametrelerin gücüyle hasarlarda meydana gelen artış birçok defa gösterilmiştir [31, 32, 34, 35]. Dolayısıyla sonuçlar önceki çalışmalarla uyumludur.

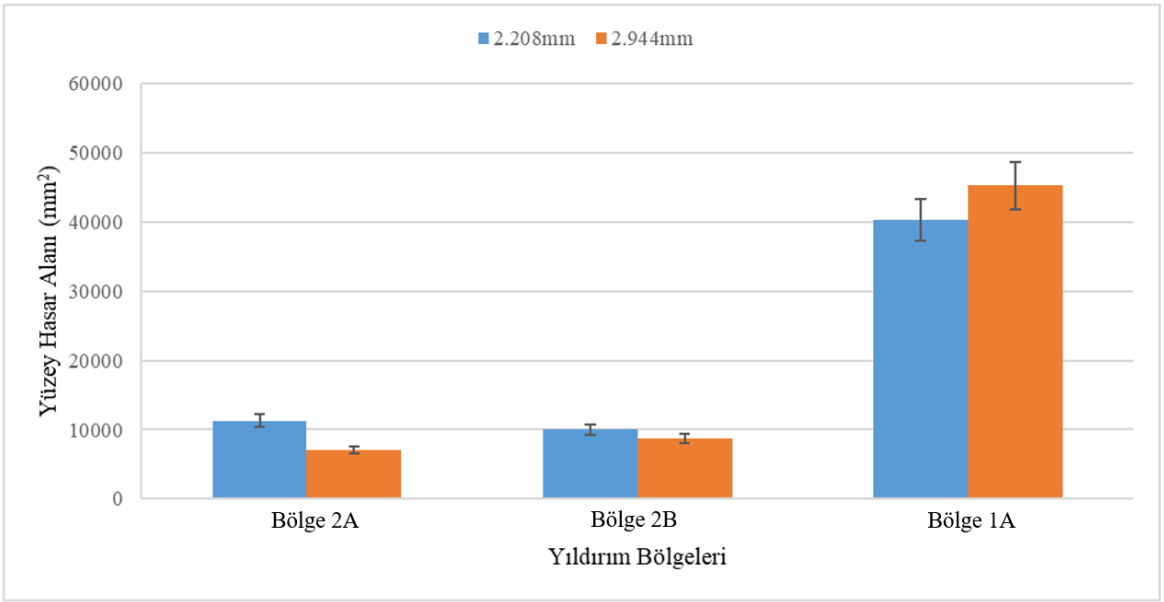


Şekil 4.24. 73 g/m^2 korumalı numuneler (7, 9, 13 ve 14): yıldırım bölgesine karşı delaminasyon alanı

4.4.2. Yıldırım bölgesi – yüzey hasar alanı ilişkisi

Yıldırım bölgesi etkisinin yüzey hasar alanıyla olan bağlantısını incelemek için, kalınlığı ve ECF koruması aynı olan ama yıldırım bölgesi farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.25'da farklı kalınlıkta ki, 73 g/m^2 korumaya sahip ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 7, 9, 13 ve 14 karşılaştırılmıştır. 2,208 mm kalınlığında ki numuneler: 7 ve 9 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde azalan yıldırım parametreleri şiddetiyle yüzey hasar alanının arttığı görülmüştür. 2,944 mm kalınlığında ki numuneler: 13 ve 14 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde artan yıldırım parametreleri şiddetiyle yüzey hasar alanının arttığı görülmüştür. Bölge 2A ve Bölge 2B benzer yüzey hasar alanları vermiştir. Bu bölgenin aynı tepe akım değerini ifade etmesi yüzey hasarının tepe akım değeriyle doğrudan orantılı olduğunu göstermektedir. Yıldırım dalga parametrelerinden elektriksel yük transferinin yüzey erozyonunun oluşmasında daha baskın olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar korumasız numuneler üzerinde yapılan bir çalışmada da elde edilmiştir [34]. Literatürde artan elektriksel parametrelerin gücüyle hasarlarda meydana gelen artış birçok defa gösterilmiştir [31, 32, 34, 35]. Dolayısıyla sonuçlar önceki çalışmalarla uyumludur.



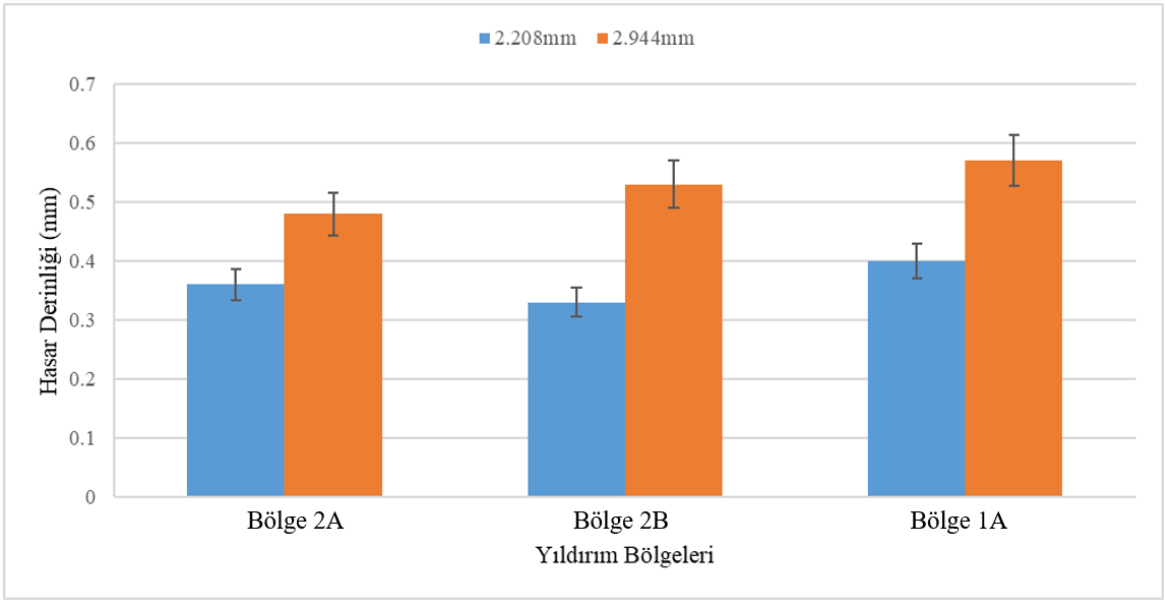
Şekil 4.25. 73 g/m^2 korumalı numuneler (7, 9, 13 ve 14): yıldırım bölgesine karşı yüzey hasar alanı

4.4.3. Yıldırım bölgesi - hasar derinliği ilişkisi

Yıldırım bölgesi etkisinin hasar derinliğiyle olan bağlantısını incelemek için, kalınlığı ve ECF koruması aynı olan ama yıldırım bölgesi farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.26'da farklı kalınlıkta ki, 73 g/m^2 korumaya sahip ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 7, 9, 13 ve 14 karşılaştırılmıştır. 2,208 mm kalınlığında ki numuneler: 7 ve

9 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde azalan yıldırım parametreleri şiddetiyle hasar derinliğinin bir miktar arttığı görülmüştür. 2,944 mm kalınlığında ki numuneler: 13 ve 14 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde azalan yıldırım parametreleri şiddetiyle hasar derinliğinin arttığı görülmüştür. Bölge 2A ve Bölge 2B benzer hasar derinliği değerleri vermiştir. Bu bölgenin aynı tepe akım değerini ifade etmesi hasar derinliğinin tepe akım değeriyle doğrudan orantılı olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar korumasız numuneler üzerinde yapılan bir çalışmada da elde edilmiştir [34]. Literatürde artan elektriksel parametrelerin gücüyle hasarlarda meydana gelen artış birçok defa gösterilmiştir [31, 32, 34, 35]. Dolayısıyla sonuçlar önceki çalışmalarla uyumludur.



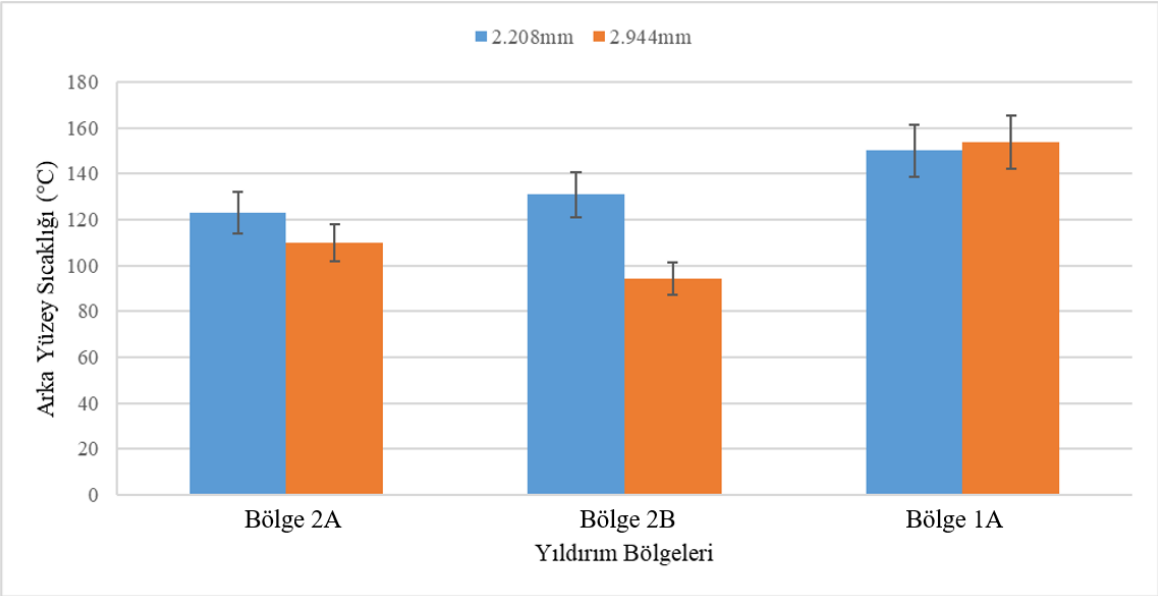
Şekil 4.26. 73 g/m^2 korumalı numuneler (7, 9, 13 ve 14): yıldırım bölgesine karşı hasar derinliği

4.4.4. Yıldırım bölgesi – arka yüzey sıcaklığı ilişkisi

Yıldırım bölgesi etkisinin arka yüzey sıcaklığıyla olan bağlantısını incelemek için, kalınlığı ve ECF koruması aynı olan ama yıldırım bölgesi farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.27'de farklı kalınlıkta ki, 73 g/m^2 korumaya sahip ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 7, 9, 13 ve 14 karşılaştırılmıştır. 2,208 mm kalınlığında ki numuneler: 7 ve 9 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde azalan yıldırım parametreleri şiddetiyle arka yüzey sıcaklığının 122,9 °C'den 150,1 °C'ye arttığı görülmüştür. 2,944 mm kalınlığında ki numuneler: 13 ve 14 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Bu numunelerde azalan yıldırım parametreleri şiddetiyle arka yüzey sıcaklığının 109,8 °C'den 153,7 °C'ye

arttığı görülmüştür arttığı görülmüştür. Bölge 2A ve Bölge 2B benzer arka yüzey sıcaklık değerlerini vermiştir. Bu bölgenin aynı tepe akım değerini ifade etmesi arka yüzey sıcaklığının tepe akım değeriyle doğrudan orantılı olduğunu göstermektedir. 1 numaralı yıldırım bölgesi 2 numaralı yıldırım bölgelerinden %20 - %30 arası daha fazla arka yüzey sıcaklığına neden olmuştur.



Şekil 4.27. 73 g/m^2 korumalı numuneler (7, 9, 13 ve 14): yıldırım bölgesine karşı arka yüzey sıcaklığı

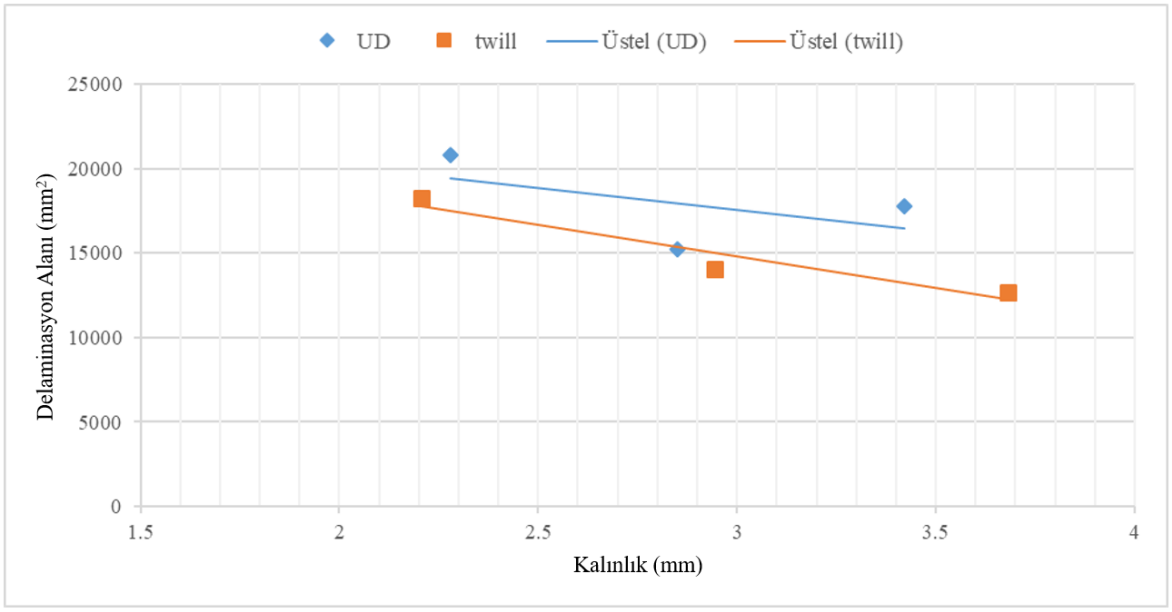
4.5. Kumaş Tipi Etkisi

Çizelge 3.1.'de görüldüğü üzere test matrisi oluşturulurken numuneler farklı karbon kompozit malzemeleri kullanılarak, kumaş tipinin yıldırım çarpması sonucu oluşan delaminasyon alanı, yüzey erozyonu, hasar derinliği ve numune arkasında oluşan sıcaklıkla ilişkisini görmek amaçlanmıştır.

4.5.1. Kumaş tipi - delaminasyon alanı ilişkisi

Kumaş tipinin delaminasyon alanıyla olan bağlantısını incelemek için, yıldırım bölgesi ve ECF koruması aynı olan ama kumaş tipi farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.28'de farklı kalınlıkta ki, 195 g/m^2 korumaya sahip ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 12 ve 15; ve twill kumaştan üretilen 17, 19 ve 23 karşılaştırılmıştır. UD numuneler: 12 ve 15 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Twill kumaştan üretilen numuneler: 17, 19 ve 23 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde UD kumaştan üretilen numuneler özelinde gerçekleşen delaminasyon eğiliminin, twill kumaştan üretilen numunelerde gerçekleşen delaminasyon alanının üstünde yer aldığı ve benzer bir eğilim oluşturduğu görülmüştür. Twill kumaşın dokuma sonucu oluşan kenetli yapısı, tek yönelimli kumaşa göre delaminasyonu ortalama %10 oranında azaltmaktadır.



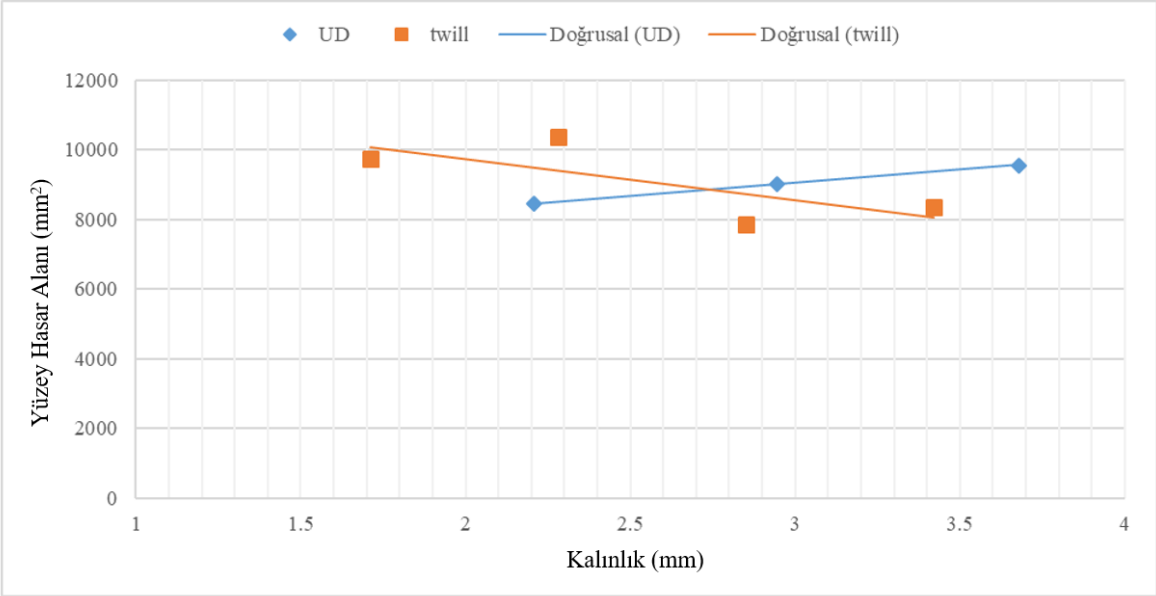
Şekil 4.28. 195 g/m^2 korumalı numuneler (12, 15, 17, 19 ve 23): kumaş tipinin delaminasyona etkisi

4.5.2. Kumaş tipi – yüzey erozyonu alanı ilişkisi

Kumaş tipinin yüzey erozyonu alanıyla olan bağlantısını incelemek için, yıldırım bölgesi ve ECF koruması aynı olan ama kumaş tipi farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.29'de farklı kalınlıkta ki, 195 g/m^2 korumaya sahip ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 12 ve 15; ve twill kumaştan üretilen 17, 19, 21 ve 23 karşılaştırılmıştır. UD numuneler: 4, 12 ve 15 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Twill kumaştan üretilen numuneler: 17, 19, 21 ve 23 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde UD kumaştan üretilen numuneler özelinde gerçekleşen yüzey erozyon alanının, twill kumaştan üretilen numunelerde gerçekleşen yüzey erozyon alanıyla benzer

olduğu görülmüştür. Buda kumaş tipiyle yüzey erozyonu arasında bir ilişki olmadığının göstergesi sayılabilir. Yüzey erozyonunun daha çok koruma katmanına ve yıldırım bölgesine bağlı olduğuna önceki bulgularda bahsedilmiştir.



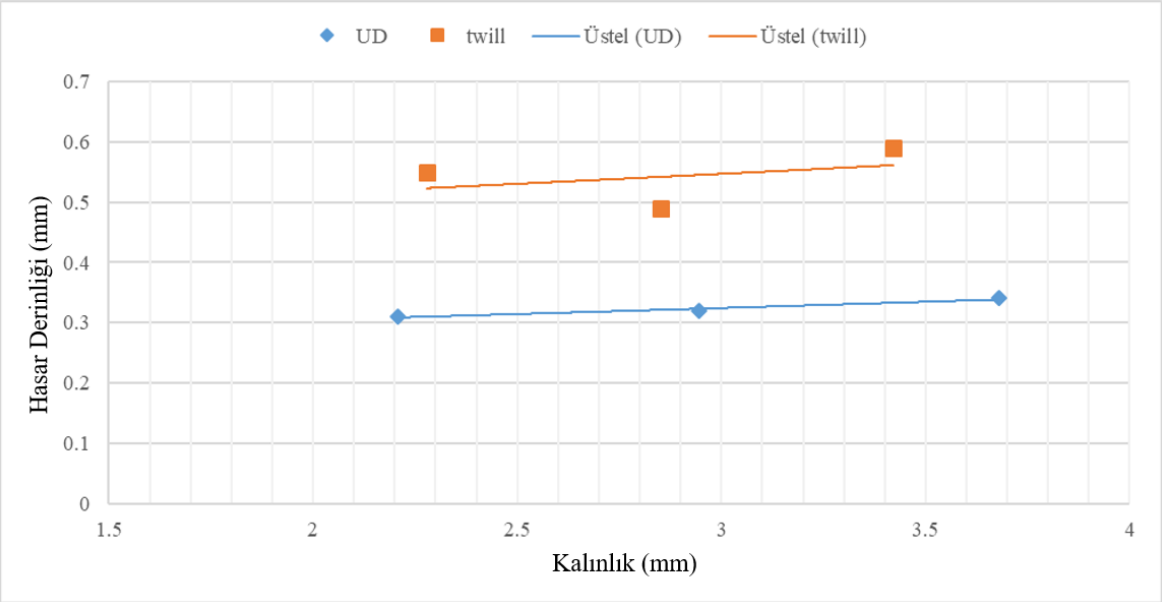
Şekil 4.29. 195 g/m^2 korumalı numuneler (4, 12, 15, 17, 19, 21 ve 23): kumaş tipinin yüzey hasar alanına etkisi

4.5.3. Kumaş tipi - hasar derinliği ilişkisi

Kumaş tipinin hasar derinliğiyle olan bağlantısını incelemek için, yıldırım bölgesi ve ECF koruması aynı olan ama kumaş tipi farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.30'de farklı kalınlıkta ki, 195 g/m^2 korumaya sahip ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 12 ve 15; ve twill kumaştan üretilen 17, 19 ve 23 karşılaştırılmıştır. UD numuneler: 12 ve 15 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Twill kumaştan üretilen numuneler: 17, 19 ve 23 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde UD kumaştan üretilen numuneler özelinde gerçekleşen hasar derinliği eğiliminin, twill kumaştan üretilen numunelerde gerçekleşen hasar derinliği eğiliminin ortalama %40 oranında altında yer aldığı görülmüştür. Twill kumaşlarda delaminasyonun, tek yönelimli kumaşa kıyasla daha az yaşandığını daha önce görmüştük. Buda aynı yıldırım koşulları altında, twill kumaşlı numunelerde yıldırım enerjisinin fazla yayılmadan daha derinlemesine

hasarlar vermesiyle, tek yönelimli kumaştan üretilen numunelerde ise daha geniş yüzeylere dağılıp daha az derinlemesine hasarlar oluşturmasıyla açıklanabilir.

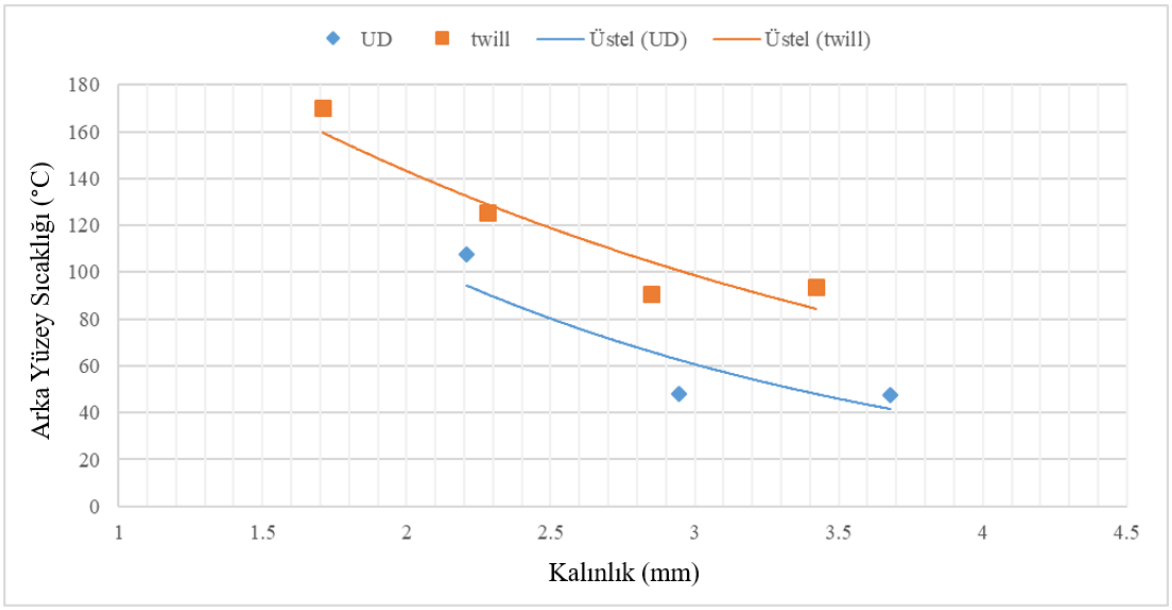


Şekil 4.30. 195 g/m^2 korumalı numuneler (12, 15, 17, 19 ve 23): kumaş tipinin hasar derinliğine etkisi

4.5.4. Kumaş tipi – arka yüzey sıcaklığı ilişkisi

Kumaş tipinin arka yüzey sıcaklığıyla olan bağlantısını incelemek için, yıldırım bölgesi ve ECF koruması aynı olan ama kumaş tipi farklı olan numuneler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.31'te farklı kalınlıkta ki, 195 g/m^2 korumaya sahip ve tek yönelimli kumaştan üretilen numune 4, 12 ve 15; ve twill kumaştan üretilen 17, 19, 21 ve 23 karşılaştırılmıştır. UD numuneler: 4, 12 ve 15 mavi renkli verilerle ifade edilmiştir. Twill kumaştan üretilen numuneler: 17, 19, 21 ve 23 turuncu renkli verilerle ifade edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde UD kumaştan üretilen numuneler özelinde gerçekleşen arka yüzey sıcaklığı eğiliminin, twill kumaştan üretilen numunelerde gerçekleşen arka yüzey sıcaklığı davranışının birbirine benzediği görülmektedir ancak benzer kalınlık değerlerinde UD kumaştan üretilen numunelerin daha düşük arka yüzey sıcaklığı değerleri gösterdiği görülmektedir. Arka yüzey sıcaklığının twill numunelerde daha yüksek olması, hasar derinliğinin twill kumaşta daha fazla olmasıyla ve twill kumaşın kenetli yapısı kaynaklı katmanlarda ısının daha yavaş yayılmasıyla açıklanabilir.



Şekil 4.31. 195 g/m^2 korumalı numuneler (4, 12, 15, 17, 19, 21 ve 23): kumaş tipinin arka yüzey sıcaklığına etkisi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, KETPK'nin yıldırıma karşı koruma yöntemlerinden biri olan gerdirilmiş bakır folyo kullanılacak ve yapıların yapay yıldırıma maruz bırakılması sonucu oluşan hasar mekanizmaları incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, kompozit yapıların kalınlıkları, malzemeleri ve boya katmanları dikkate alınarak, olabildiğince gerçeğe yakın senaryolar oluşturulmuştur. Uçakların maruz kaldığı olası yıldırım koşulları altında ve farklı koruma seviyelerine sahip aday yapısalların performansları incelenmiştir. Deneyler sonrasında kompozitlerde yıldırım çarpması sonucu oluşacak hasar tipleri ve bu hasar tiplerinin kompozitin farklı özelliklerine göre nasıl etkilendiği araştırılmıştır.

Yıldırım çarpması sonucu elde edilen hasar tipleri; elyaf kırılması, katman kalkması, yüzey erozyonu ve delaminasyon şeklinde sınıflandırılmıştır. Bu hasar tiplerinin yanında numunenin arka yüzeyinde kayıt edilen numune termal izdüşümü ile yıldırım kaynaklı hasarlar arasındaki ilişki incelenmiştir. Termal, elektriksel değişimler ve yüksek şok basıncı sonrası ark girişim bölgelerinde meydana gelen elyaf kırılmaları, korumasız kompozitlerle benzer şekilde olarak elyaf yönelimine dik yönde meydana gelmiştir. Tek yönelimli kumaş ve dokuma kumaş malzemeleri içinde geçerli olan bu hasar tipi, koruma katmanının artmasıyla azalma göstermiştir. Elyaf kırılması ve delaminasyon sonucu meydana gelen katman kalkmaları yine ark girişim bölgelerinde görülmüştür. Koruma katmanın varlığı hasar oluşma mekanizmasını değiştirmemiştir. Dokuma kumaşlar yapıları gereği tek yönelimli kumaşlara göre daha az katman kalkması hasarı sergilemişlerdir. Özellikle yıldırım çarpması sonrası yapı üzerinde akımın dağılımına ve şiddetine bağlı değişen yüzey erozyonu gerdirilmiş bakır folyo koruma katmanın varlığıyla kompozit yapıya daha az nüfuz etmiş ve yüzey erozyonu genellikle koruma katmanında sınırlandırılmıştır. Yıldırım çarpması sonucu numunelerin iç bölgelerinde meydana gelen delaminasyon hasarları ark girişim noktasını merkezleyerek hem elyaf yöneliminde hem de elyaf yönelimine dik yönde ilerleyerek oluşur. Akım iletkenliğinin elyaf yönünde fazla olması hasarın bu yönde daha fazla yol almasına neden olmuştur ve gerdirilmiş bakır folyo koruma katmanının kullanımı delaminasyon hasarını azaltsada, hasar oluşma yönelimini etkilememiştir. Yıldırım çarpma testi esnasında numunelerin arka yüzeylerinden ölçülen termal dağılım ve numunede meydana gelen hasarlar arasında korelasyon elde edilmiştir. Sıcaklığın en fazla okunduğu bölgeler ark girişiminin yaşandığı ve dolayısıyla elyaf kırılması gibi yüksek enerji gerektiren

hasar tiplerinin yaşandığı bölgelerdir. Sıcaklık dağılımının daha düşük okunduğu bölgelere doğru ise yüzey erozyonları ve delaminasyon hasar tiplerinin meydana geldiği görülmüştür.

Kompozit kalınlığının, yıldırımdan koruma katmanının, kumaş tipinin ve çeşitli yıldırım bölgelerinin yıldırım çarpması kaynaklı delaminasyon, hasar derinliği, yüzey hasarı ve arka yüzeyde oluşturdukları sıcaklık dağılımlarını nasıl etkilediği incelenmiştir. Testler sonrasında yüzey hasarının, hasar derinliğinin ve delaminasyonun kompozit kalınlığından etkilenmediği görülmüştür. Artan kompozit kalınlığıyla arka yüzey sıcaklığında belirgin düşüş elde edilmiştir. Artan gerdirilmiş bakır folyo kullanımı numunelerde yıldırım kaynaklı delaminasyon alanında, yüzey hasarı alanında, hasar derinliğinde ve arka yüzeyde ölçülen en yüksek sıcaklıkta düşüş görülmüştür. Artan yıldırım bölgesi şiddetiyle literatürle uyumlu olarak yıldırım kaynaklı hasarlarda artış olmuştur. Karbon elyaf olarak tek yönelimli ve dokuma olarak iki farklı kumaş tipi kullanılmıştır. Dokuma kumaşın delaminasyon alanında daha az delaminasyona uğradığı görülürken hasar derinliği açısından tek yönelimli kumaşın daha düşük değerler sağladığı tecrübe edilmiştir. Arka yüzey sıcaklığında ise dokuma kumaş tipininin, hasar derinliğinin daha fazla olması kaynaklı olarak tek yönelimli kumaşla benzer bir eğilimde ama daha yüksek değerler gösterdiği görülmüştür.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler, kompozit uçak parçalarının yıldırıma karşı optimum şekilde korunmasında ağırlık ve maliyet açısından faydalı tasarımlara yön verebilecektir. Havacılık sektöründe yıldırım koruma yöntemi olarak sıkça kullanılan gerdirilmiş bakır folyo malzemesinin testlerle doğrulanmış ve farklı yıldırım parametreleri altında anlamlı sonuçlar verebilen analiz yöntemlerinin geliştirilmesi bundan sonraki çalışmalarda işlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Smith, F. (2013). The use of composites in aerospace: past, present and future challenges; Avalon Consultancy Services ltd, N963AS. *UK*, 11-12.

2. Roeseler, W. G., Sarh, B., Kismarton, M. U., Quinlivan, J., Sutter, J. and Roberts, D. (2007). *Composite structures: the first 100 years.* 16th International Conference on Composite Materials (1-41). Japan Society for Composite Materials Kyoto, Japan.

3. Plumer, J. A. and Robb, J. D. (1982). The direct effects of lightning on aircraft. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 24(2), 158-172.

4. Board, C. A. (2000). Aircraft accident report; Continental Airlines, Inc., NTSB/AAR-02/01. *Anacapa Island, California*, 2-10.

5. Lenning, F. E. (2003). *Analysis of Lightning Current Flow in Anisotropic CFRP using Finite Differencing Methods.* In I03-50 CEM Proceedings, International Conference on Lightning and Static Electricity.

6. Gabrielson, B. C. (1988). *The aerospace engineer's handbook of lightning protection* (First edition). California, USA: Interference Control Technologies, 30-32.

7. S.A.E. (2005). *ARP5412 Aircraft lightning environment and related test waveforms* (Second edition). Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, 14-24.

8. Uman, M. A. and Rakov, V. A. (2003). The interaction of lightning with airborne vehicles. *Progress in Aerospace Sciences,* 39(1), 61-81.

9. Harrison, H. T. (1965). *UAL turbojet experience with electrical discharges* (First edition). US: United Air Lines, 39-40.

10. Fisher, F. A., Plumer, J. A. and Perala, R. A. (1989). *Aircraft lightning protection handbook* (First edition). Pittsfield, MA: Lightning Technologies, 61-68.

11. Blohm, H. (2007). *Lufthansa Perspectives on Safe Composite Maintenance Practices*. Presented at the FAA Damage Tolerance and Maintenance Workshop, Amsterdam.

12. Nakayama, N. (2009). *Field experience: Lightning strike damage of ANA B767*. 4th FAA/EASA/Boeing/Airbus Joint Workshop on Safety and Certification, Tokyo.

13. Yamanaka, J. (2009). *JAL Perspective on Application & Field Experiences for Composite Structure.* In 3rd FAA/EASA/Industry Composite Damage Tolerance and Maintenance Workshop.

14. Bazelyan, E. M. and Raizer, Y. P. (1997). *Spark discharge*. Moscow, Russia: CRC press, 20.

15. S.A.E. (2018). *ARP5414 Aircraft Lightning* Zoning (Second edition). Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, 9-11.

16. Hoole, P. R. P., Thirukumaran, S., Ramiah, H., Kanesan, J. and Hoole, S. R. H. (2014). Ground to Cloud Lightning Flash Currents and Electric Fields: Interaction with Aircraft and Production of Ionosphere Sprites. *Journal of Computational Engineering.* 10.1155/2014/869452.

17. Reid, G. W. (1993). Mechanical damage to aircraft structures from lightning strikes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 207(1), 1-14.

18. Rupke, E. (2002). *Lightning direct effects handbook*. Pittsfield, MA: Lightning Technologies, 21-27.

19. Tudor, D. (2001). A review of the severe lightning threat. *SAE transactions*, 3(2), 339-346.

20. Uman, M. A. (2001). *The lightning discharge*. London: Courier Corporation, 21-29.

21. Heidler, F., Zischank, W., Flisowski, Z., Bouquegneau, C. and Mazzetti, C. (2008). *Parameters of lightning current given in IEC 62305-background, experience and outlook.* 29th International Conference on Lightning Protection (23, 26).

22. Rachidi, F. (2004). The quandary of direct measurement and indirect estimation of lightning current parameters. *Impulse*, 7(24), 11.

23. Moreau, J. P., Alliot, J. C. and Mazur, V. (1992). Aircraft lightning initiation and interception from in situ electric measurements and fast video observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), 15903-15912.

24. Sweers, G., Birch, B. and Gokcen, J. (2012). Lightning strikes: protection, inspection, and repair. *Aero Magazine*, 4, 19-28.

25. S.A.E. (2005). *ARP5416 Aircraft lightning test methods* (Second edition). Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, 16-24.

26. Federal Aviation Administration. (1999). *Certification of Transport Airplane Structure*. US: US Department of Transport, 657-658.

27. Fawcett, A. J., and Oakes, G. D. (2006, July). *Boeing composite airframe damage tolerance and service experience.* In Composite damage tolerance & maintenance workshop.

28. Gagné, M. and Therriault, D. (2014). Lightning strike protection of composites. *Progress in Aerospace Sciences*, 64, 1-16.

29. İnternet: P.P.G.E. (n.d.). Expanded Metal Foils: Dexmet MicroGrid®. Web: https://www.dexmet.com/expanded-metals adresinden 15 Ağustos 2019'da alınmıştır.

30. Kelly, L. G. and Schwartz, H. S. (1969). Investigation of Lightning Strike Damage to Epoxy Laminates Reinforced with Boron and High Modulus Graphite Fibers; NASA, AFAL-TR-68-290, Part II. *Washington, DC, ABD*, 20-45.

31. McClenahan, D. H. and Plumer, J. A. (1983). Protection Against the Direct Effects of Lightning Strikes for a Carbon Fiber Composite Aircraft; SAE, 830724. *Michigan*, 4-7.

32. Gammon, L. M. and Falcone, A. (2003). Lightning strike damage in polymer composites. *Advanced materials & processes*, 161(8), 61-62.

33. Feraboli, P. and Miller, M. (2009). Damage resistance and tolerance of carbon/epoxy composite coupons subjected to simulated lightning strike. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(6-7), 954-967.

34. Hirano, Y., Katsumata, S., Iwahori, Y. and Todoroki, A. (2010). Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1461-1470.

35. Fisher, F., and Fassell, W. (1972*)*. Lightning Effects Relating to Aircraft. Part 1. Lightning Effects on and Electromagnetic Shielding Properties of Boron and Graphite Reinforced Composite Materials; General Electric, AFAL-TR-72-5-Pt-1. *Pittsfield, MA USA*.

36. Heidlebaugh, D. L., Avery, W. B., and Uhrich, S. T. (2001). Effect of Lightning Currents on Structural Performance of Composite Material; SAE, 2001-01-2885. *Troy, USA*, 7-8.

37. Clark, H. T. (1972*)*. Advanced Development on Vulnerability/Survivability of Advanced Composite Structures; Mcdonnell Aircraft Cop., MDC-A1791. *St Louis MO*.

38. Drumm, F., Baeuml, G., Zischank, W., Brocke, R. and Schoenau, J. (1999). Temperature rise on the rear side of CFC panels due to lightning continuing currents; SAE, 1999-01-2321. *Warrendale, USA*, 2-8.

39. Lee, J., Gharghabi, P., Boushab, D., Ricks, T. M., Lacy Jr, T. E., Pittman Jr, C. U., ... and Velicki, A. (2018). Artificial lightning strike tests on PRSEUS panels. *Composites Part B: Engineering*, *154*, 467-477.

40. Li, Y., Li, R., Lu, L. and Huang, X. (2015). Experimental study of damage characteristics of carbon woven fabric/epoxy laminates subjected to lightning strike. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 79*, 164-175.

41. Dhanya, T. M., and Yerramalli, C. S. (2018). Lightning strike effect on carbon fiber reinforced composites–effect of copper mesh protection. *Materials Today Communications*, 16, 124-134.

42. Yamashita, S., Hirano, Y., Sonehara, T., Takahashi, J., Kawabe, K. and Murakami, T. (2017). Residual mechanical properties of carbon fiber reinforced thermoplastics with thin-ply prepreg after simulated lightning strike. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 185-194.

43. Bigand, A., Espinosa, C., Bauchire, J. M., Flourens, F. and Lachaud, F. (2019). *Lightning damage assessment into composite based on surface explosion and fiber breakage*. 22nd International Conference On Composite Materials (ICCM22) (1-11), Melbourne.

44. Kumar, V., Yokozeki, T., Okada, T., Hirano, Y., Goto, T., Takahashi, T. and Ogasawara, T. (2018). Effect of through-thickness electrical conductivity of CFRPs on lightning strike damages. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 114, 429-438.

45. Penton, A. P., Perry, J. L. and Lloyd, K. J. (1972). The effects of high intensity electrical currents on advanced composite materials; Philco-Ford Corp, U-5018. *Newport Beach CA*, 11-14.

46. İnternet: Preimregnated. (2018, December 13). Web: https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg adresinden 10 Ağustos 2019'da alınmıştır.

47. İnternet: Aircraft Lightning Strike Protection. (n.d.). Aerospace Lightning Protection. Web: https://www.dexmet.com/applications/aerospace?hsCtaTracking=766ad303-518a-4bcf-91bb-96c925cbcdc2|d09c03db-56f1-4ac4-a5f6-b46320c929f0 adresinden 5 Haziran 2019'da alınmıştır.

48. Kassapoglou, C. (2013). *Design and analysis of composite structures: with applications to aerospace structures* (Second edition). The Netherlands: John Wiley & Sons, 343-349.

49. Agencies of the Department of Defense. (2009). Performance Specification Coating: Polyurethane, Aircraft and Support Equipment; ADD, MIL-PRF-85285E. *Lakehurst, NJ, USA*, 22-23.

50. Hughes, W. J. (1998). *A Review of the Flammability Hazard of Jet A Fuel Vapor in Civil Transport Aircraft Fuel Tanks.* Columbus, USA: Federal Aviation Administration Office of Aviation Research, 15-16.

51. Powell, R. W., Ho, C. Y. and Liley, P. E. (1966*). Thermal conductivity of selected materials*. Washington, DC: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 19.

52. Rolfes, R. and Hammerschmidt, U. (1995). Transverse thermal conductivity of CFRP laminates: a numerical and experimental validation of approximation formulae. *Composites Science and Technology*, 54(1), 45-54.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KİÇECİ, Eren Can
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 07.09.1993, Kızılcahamam
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (506) 562 78 18
e-mail : erencan.kiceci@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	ODTÜ / Havacılık ve Uzay Mühendisliği	2016
Lise	Gazi Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Türk Havacılık Uzay Sanayii	Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Yayınlar

1. Kiçeci, E. C. (2018), Havacılık Sektöründe 3 Boyutlu Dokuma Kumaş Kullanarak Polimer Matriksli Kompozit Parça Üretimi ve Muhtemel Uygulama Uygulamaları: Eğitim Uçağı Basamak Uygulaması. VII. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK2018), Samsun.

2. Kiçeci, E. C. and Salamcı, E. (2020). Uçak Yıldırım Etkileşimi. *European Journal of Science and Technology*, (Özel Sayı), 177 187.

Hobiler

Nümismatik



GAZİ GELECEKTİR..