



**TERMOPLASTİK MATRİSLİ KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN KAYNAK İLE BİRLEŞTİRMESİNDE KULLANILAN
ISITMA ELEMAN BOYUTLARININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Hakan ÖZTÜRKMEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2023

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Hakan ÖZTÜRKMEN

27/10/2023

TERMOPLASTİK MATRİSLİ KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN KAYNAK İLE BİRLEŞTİRMESİNDE KULLANILAN ISITMA
ELEMEN BOYUTLARININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hakan ÖZTÜRKMEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2023

ÖZET

Bu çalışmada, PPS matrisli karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemenin direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kullanılan farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının kaynaklanan malzemelerin mekanik dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk olarak, termoplastik malzemelerin direnç kaynağı ile birleştirilmesine imkân sağlayan direnç kaynağı düzeneği tasarlanmıştır. Kullanılacak ısıtma elemanlarına kaynak sağlanması için verilmesi gerekli güç değerleri, tel karakterizasyonu çalışmalarıyla belirlenmiştir. Yapılan tel karakterizasyonu çalışmaları sonlu elemanlar analizi modeli ile doğrulanmıştır. Mekanik özelliklerin karşılaştırılması için termoplastik kompozit malzemeler bindirmeli kesme testi ve çift konsol kiriş testine uygun ölçülerde su jetinde kesilmiştir. Numunelerin direnç kaynağında birleştirilmesi için 33, 45, 61, 91, 109 ve 154 mikron örgü aralığında paslanmaz çelik malzemeden üretilen ısıtma elemanları kullanılmıştır. Numuneler ve ısıtma elemanları 2 farklı akım değerinde kaynak işlemi yapılmıştır. Numunelerin kaynak ile birleştirilmesinde kaynak süresi olarak 60 saniye sabit tutulmuştur. Ayrıca kaynak sırasında, bindirmeli kesme test numunelerinde 1 bar, çift konsol kiriş test numunelerinde 6 bar kaynak basıncı kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, 91 mikron örgü aralığında 15,6A akım değerinde yapılan kaynak numunesinin bindirmeli kesme mukavemeti değerinin 27,17 MPa olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar analizi ile tel karakterizasyonu çalışmaları arasında %10'luk bir fark gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91417

Anahtar Kelimeler : Kompozit, termoplastik, direnç kaynağı, ısıtma elemanı

Sayfa Adedi : 87

Danışman : Prof. Dr. Yusuf USTA

İkinci Danışman : Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HEATING ELEMENT DIMENSIONS USED
ON WELDING OF THERMOPLASTIC MATRIXED CARBON FIBER REINFORCED
COMPOSITE MATERIALS

(M. Sc. Thesis)

Hakan ÖZTÜRKMEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2023

ABSTRACT

In this study, the investigation focused on examining the impact of heating elements with varying mesh spacing on the mechanical strength of welded materials in the joining process of PPS matrix carbon fiber reinforced thermoplastic composite materials through resistance welding. Initially, a resistance welding fixture was meticulously designed to facilitate the joining of thermoplastic materials using resistance welding techniques. The necessary power values to facilitate welding for the selected heating elements were determined through wire characterization studies. The wire characterization studies were verified with a finite element analysis model. The thermoplastic composite materials were precisely cut using a water jet, in accordance with the lap shear test and the double cantilever beam test standards. To accomplish the welding process, stainless-steel heating elements with mesh spacings of 33, 45, 61, 91, 109 and 154 microns were employed. Two different current values were utilized for welding the specimens. The welding duration was maintained at a constant value of 60 seconds throughout the welding procedure. Furthermore, a welding pressure of 1 bar was applied to the lap shear test specimens, while 6 bar was applied to the double cantilever beam test specimens. The results of the study revealed that the lap shear strength of the welding specimen fabricated using a current value of 15.6A and a mesh spacing of 91 microns reached 27.17 MPa. A 10% difference was observed between the finite element analysis and wire characterization studies.

Science Code : 91417

Key Words : Composite, thermoplastic, resistance welding, heating element

Page Number : 87

Supervisor : Prof. Dr. Yusuf USTA

Co-Supervisor : Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca yol göstererek çalışmalarında bana destek olan, birlikte çalışmaktan onur ve mutluluk duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Yusuf USTA'ya teşekkürlerimi sunarım. Eş danışman hocam, sayın Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK'e tez çalışmam boyunca engin tecrübesiyle, rehberlik, değerli bilgi ve her türlü desteği sayesinde çalışmama yön verdiği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmam esnasında her zaman yanımda olan ve bana daima yol gösteren Doç. Dr. Serkan TOROS hocama da en kalbi duygularıyla teşekkür ederim. Ayrıca tez sürecim boyunca katkılarını esirgemeyen Dr. Mete BAKIR, Doç. Dr. Yahya ÖZ ve Dr. Remzi Ecmel ECE'ye de teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımın kapsamında, tüm imkanlarını sunan Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'ne ve Gazi Üniversitesine teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde vesile olan her zaman her koşulda yanımda olan değerli babam Mustafa ÖZTÜRKMEN'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında yanımda olan ve elinden gelen bütün desteği veren hayat arkadaşım, değerli eşim Mahide Betül ÖZTÜRKMEN'e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Polimer Matrisli Kompozitler	3
2.1.1. Termoset matrisli kompozitler	3
2.1.2. Termoplastik matrisli kompozitler.....	4
2.2. Kompozit Birleştirme Yöntemleri.....	9
2.3. Kaynak (Füzyon Bağlama) Yöntemi	10
2.3.1 Termal kaynak.....	11
2.3.2. Sürtünme kaynağı	15
2.3.3. Elektromanyetik kaynak	21
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	25
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
4.1. Malzemeler.....	39
4.2. Direnç Kaynağı Düzeneginin Tasarımı.....	41
4.3. Mekanik Testler	43
4.3.1. Bindirmeli kesme testi	43
4.3.2. Çift konsol kiriş testi (DCB)	45

	Sayfa
5. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR.....	49
5.1. Tel Karakterizasyonu Çalışmaları.....	49
5.2. Mekanik Test Sonuçları	54
5.2.1. Bindirmeli kesme testi sonuçları.....	54
5.2.2. Çift konsol kiriş testi	59
6. DİRENÇ KAYNAĞI ANALİZLERİ.....	65
6.1. Kompozit plakalarda sıcaklık dağılımı	67
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
7.1. Sonuç.....	77
7.2. Öneriler	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ	87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Numune malzemesinin özellikleri.	39
Çizelge 4.2. Isıtma elemanları ile ilgili detaylı bilgiler.	39
Çizelge 4.3. LSS deney parametreleri.....	44
Çizelge 4.4. DCB deney parametreleri.	47
Çizelge 5.1. Isıtma elemanlarının akım, sıcaklık ve genişliğine göre regresyon analizi.	53
Çizelge 5.2. Bindirmeli kesme testi numunelerinin eriyen polimer yoğunluğu yüzdesi.	56
Çizelge 5.3. Bindirmeli kesme numunelerinde eriyen katman sayıları.	58
Çizelge 5.4. Çift konsol kiriş testi numunelerinin eriyen polimer yoğunluğu yüzdesi... ..	61
Çizelge 5.5. Çift konsol kiriş testi numunelerinin eriyen katman sayıları.....	62
Çizelge 5.6. Çift konsol kiriş testi numunelerinin kristallenme yüzdesi.	63
Çizelge 6.1. Termoplastik malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Termoplastik malzemelerin sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.2. Termoplastik polimer kompozitlerden üretilen braketler	9
Şekil 2.3. Takviyeli ve takviyesiz termoplastik kompozitlerin birleştirme teknikleri....	10
Şekil 2.4. Füzyon bağlama yöntemleri	11
Şekil 2.5. Sıcak alet kaynağı şematik gösterimi	12
Şekil 2.6. Sıcak alet kaynağında zaman ile basınç değişimi.....	12
Şekil 2.7. İnfrared kaynağında zaman ile basınç değişimi.....	13
Şekil 2.8. İnfrared kaynağının şematik gösterimi.	13
Şekil 2.9. Sıcak gaz kaynağı şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.10. Lazer kaynağı şematik gösterimi.	15
Şekil 2.11. Titreşim kaynağı şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.12. Spin kaynağının şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.13. Spin kaynağı prosesi	18
Şekil 2.14. Enerji yönlendiricilerinin farklı tasarımı	18
Şekil 2.15. Farklı bağlantı tasarımları.....	19
Şekil 2.16. Ultrasonik kaynak şematik gösterimi	20
Şekil 2.17. İndüksiyon kaynağı kullanılarak bindirmeli kesme kaynağının şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.18. İndüksiyon kaynağı için tasarlanan farklı bobin çeşitleri	22
Şekil 2.19. Dielektrik kaynağının şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.20. Mikrodalga kaynağı şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.21. Direnç kaynağı şematik gösterimi	24
Şekil 4.1. Farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının 1x1 mm ² uzunluğundaki ısıtma elemanlarının modeli a) 33 µm b) 45 µm c) 61 µm d) 91 µm e) 109 µm f) 154 µm.	40

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Güç besleyici temsili görüntüsü.....	41
Şekil 4.3. Pistonlar açık durumda kaynak düzeneğinin modeli.....	41
Şekil 4.4. Pistonlar kapalı durumda kaynak düzeneğinin modeli.....	42
Şekil 4.5. LSS deney numuneleri ve ısıtma elemanlarının ölçüleri.....	43
Şekil 4.6. LSS deney numuneleri.....	44
Şekil 4.7. Bindirmeli kesme test tezgâhı görseli.....	45
Şekil 4.8. DCB kaynak numunesi ve ısıtma elemanı.....	46
Şekil 4.9. Çift konsol kiriş testinden bir görsel.....	47
Şekil 5.1. Farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının akım-genişlik-sıcaklık grafikleri a) 33 µm, b) 45 µm, c) 61 µm, d) 91 µm, e) 109 µm, f) 154 µm...	50
Şekil 5.2. Farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının akım-genişlik-direnç grafikleri a) 33 µm, b) 45 µm, c) 61 µm, d) 91 µm, e) 109 µm, f) 154 µm...	52
Şekil 5.3. Bindirmeli kesme mukavemet değerleri.....	54
Şekil 5.4. Bindirmeli kesme testi numunelerinin yüzey görüntüleri a) 33 µm - 11A, b) 33 µm - 12A, c) 45 µm - 16,5A, d) 45 µm - 18A, e) 61 µm - 13,2A, f) 61 µm -14,4A, g) 91 µm - 14,3A, h) 91 µm - 15,6A, i) 109 µm - 13,2A, j) 109 µm - 14,4A, k) 154 µm - 19,8A, l) 154 µm - 21,6A.....	55
Şekil 5.5. Bindirmeli kesme testi numunelerinin kesit görüntüleri a) 33 µm - 11A, b) 33 µm - 12A, c) 45 µm - 16,5A, d) 45 µm - 18A, e) 61 µm - 13,2A, f) 61 µm -14,4A, g) 91 µm - 14,3A, h) 91 µm - 15,6A, i) 109 µm - 13,2A, j) 109 µm -14,4A, k) 154 µm - 19,8A, l) 154 µm - 21,6A.....	57
Şekil 5.6. Tabakalar arası kırılma tokluğu değerleri.....	59
Şekil 5.7. Çift konsol kiriş testi numunelerinin yüzey görüntüleri a) 33 µm - 48A, b) 33 µm - 56A, c) 45 µm - 60A,d) 45 µm - 70A, e) 61 µm - 60A, f) 61 µm - 70A, g) 91 µm - 67,2A, h) 91 µm - 78,4A, i) 109 µm - 60A, j) 109 µm - 70A, k) 154 µm -96A.....	60
Şekil 5.7. Çift konsol kiriş testi numunelerinin kesit görüntüleri a) 33 µm - 48A, b) 33 µm - 56A, c) 45 µm - 60A, d) 45 µm - 70A, e) 61 µm - 60A, f) 61µm - 70A, g) 91 µm - 67,2A, h) 91 µm - 78,4A, i) 109 µm - 60A, j) 109 µm - 70A, k) 154 µm -96A.....	61
Şekil 5.8. Diferansiyel taramalı kalorimetre temsili görüntüsü.....	62
Şekil 5.9. DSC çevrim grafiği.....	63

Şekil	Sayfa
Şekil.6.1. Analizlerde kullanılan ısıtma elemanı geometrisi (w=20).....	65
Şekil 6.2. Isıtma elemanına ait ağ yapısının görseli.....	66
Şekil 6.3. Farklı tel sayılarına bağlı olarak elde edilen sıcaklıklar.	67
Şekil 6.4. Kompozit ve ısıtma elemanlarının tasarım ve genel ağ yapısı.	69
Şekil 6.5 Tel ve kompozit plakanın sıcaklık dağılımları.	71
Şekil 6.6. Kesit boyunca oluşan sıcaklık dağılımlarının isosurface görüntüleri.....	72
Şekil 6.7. Merkezde kalınlık boyunca oluşan sıcaklık seviyesi.....	72
Şekil 6.8. Farklı güç değerleri için kompozit plakalardaki sıcaklık dağılımları.....	74
Şekil 6.9. Farklı akım değerleri için kompozit plakalardaki sıcaklık değerleri.	75
Şekil 7.1. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan mesoscale modeli.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

A

Amper

F

Kuvvet

kJ

Kilojul

m

Metre

mm

Milimetre

MPa

Megapaskal

m²

Metrekare

µm

Mikrometre

G_{1c}

Mod 1 Kırılma Tokluğu

°C

Santigrat Derece

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM

Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

CF

Karbon Fiber

DCB

Çift Konsol Kiriş

LSS

Bindirmeli Kesme Mukavemeti

PEEK

Polietereterketon

PPS

Polifenilensülfid

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla farklı bileşenin, kendi bileşenlerine kıyasla geliştirilmiş özelliklere sahip yeni bir malzeme oluşturmak üzere bir araya getirilmesiyle üretilen bir malzemedir. Matris ve takviye elemanı olarak bilinen bu bileşenler, bir araya getirilerek yeni bir malzeme elde edilir. Matris malzemesi, takviye malzemesini çevreler ve esneklik katar, takviye malzemesi ise mukavemet ve sertlik gibi istenen mekanik özellikleri sağlar.

Kompozit malzemeler, havacılık, inşaat, spor malzemeleri ve biyomedikal cihazlar dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı, dayanıklılık, korozyona ve aşınmaya karşı direnç gibi özelliklere sahiptirler. Yaygın olarak kullanılan kompozit malzeme türleri arasında polimer matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitler sıralanabilir.

Polimer malzemeler özelliklerine, kimyasal yapılarına ve sentez yöntemlerine göre birkaç kategoriye ayrılmaktadır. Genel anlamda polimerler doğal ve sentetik polimerler olarak sınıflandırılabilir gibi ısıtma davranışlarına göre de termoset, termoplastik ve elastomerler olarak sınıflandırılmaktadır. Termoplastik malzemeler, ısı ile hiçbir kimyasal değişikliklere uğramadan birçok kez eritilip yeniden şekillendirilebilen bir polimer türüdür. Aynı zamanda, endüstriyel çalışmalarda kullanım kolaylığı sağlaması, kolay şekillendirilebilen, hafif, dayanıklı ve uygun maliyetli bir malzeme olmasından dolayı da günümüzde hem akademik çalışmalarda hem de üretim faaliyetlerinde diğer polimerlere kıyasla kullanımı yaygınlaşmıştır. Geri dönüşümünün olması çok büyük bir avantajdır.

Günümüzde kullanılan bazı yaygın termoplastikler arasında polietilen (PE), polikarbonat (PC), polipropilen (PP) ve poliamid (nylon, PA) bulunur. Bunlara ek olarak, poliarileterketon (PAEK) ailesi ve polifenilen sülfür (PPS) de yüksek performanslı termoplastik polimerler grubunda yer almaktadır. Termoplastikler, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termoform gibi teknikler kullanılarak işlenmektedir.

Kompozit malzemelerin kaynaklanması, daha büyük bir yapı oluşturmak için iki veya daha fazla kompozit malzemenin birleştirilmesi için kullanılmaktadır. Kompozit kaynak işlemi, yapışkanlı bağlama, füzyon kaynağı ve mekanik tutturma dahil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Füzyon kaynağı, bir bağ oluşturmak için malzemeleri birlikte eritmeyi içeren başka bir kompozit kaynak yöntemidir. Bu işlem tipik olarak, kompozit malzemeleri eriten ve bunları bir araya getiren bir lazer veya başka bir ısı kaynağı kullanılarak yapılır. Füzyon kaynağı, yüksek derecede hassasiyet ve güç gerektiren malzemeler için iyi bir seçenektir. Mekanik bağlantı, malzemeleri birleştirmek için cıvata, vida veya diğer bağlantı elemanlarının kullanılmasını içeren başka bir kompozit kaynak yöntemidir. Bu yöntem tipik olarak yüksek derecede mukavemet ve dayanıklılık gerektiren malzemeler için kullanılır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Bilindiği üzere polimerler doğal ve sentetik polimerler olarak sınıflandırılabilir gibi ısıtma davranışlarına göre de termoset, termoplastik ve elastomerler olarak sınıflandırılmaktadır. Özellikle son yıllarda geri dönüşüme verilen önem ve kaynakların daha etkin kullanımına yönelik çalışmalar kapsamında termoplastik malzemeler büyük önem kazanmıştır. Kullanım alanları hızla artmaktadır.

Günümüzde en yaygın kullanılan termoplastikler arasında polietilen (PE), polikarbonat (PC), polipropilen (PP) ve poliamid (nylon, PA) yer almaktadır. Bunlara ek olarak, poliarileterketon (PAEK) ailesi ve polifenilensülfid (PPS) de yüksek performanslı termoplastik polimerler arasındadır. Bu geri dönüşüm özelliğine sahip kompozitlerden farklı imalat yöntemleri kullanılarak üretimler yapılmaktadır. En yaygın kullanılan yöntemler enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termoform veya termoplastik şekillendirme yöntemleridir. Her bir yöntemin kendine has özellikleri mevcuttur. İyi sonuçlar elde edebilmek için prosese etki eden parametrelerin çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

2.1.1. Termoset matrisli kompozitler

Termoset reçineler, sertleşme üzerine kimyasal bir dönüşüme uğrayarak katı, çapraz bağlı bir ağ oluşturan bir polimer malzeme sınıfıdır. Bu reçineler tipik olarak sıvı formda sağlanır ve sertleşmeden önce kolay kullanım ve işleme uygundur. Kütleme işlemi, ısıtma, kimyasal katalizör kullanımı veya radyasyona maruz bırakma (kızılötesi, ultraviyole veya elektron ışını gibi çeşitli yöntemlerle başlatılabilir).

Isıyla sertleşen reçinelerin temel özelliklerinden biri geri döndürülemez olmalarıdır. Kütleme işlemi tamamlandıktan sonra malzeme eritilemez veya yeniden şekillendirilemez. Yani tekrar kullanımları mümkün değildir. Bunun nedeni, polimer zincirleri arasında meydana gelen ve katı ve eriyemez bir malzeme ile sonuçlanan tersinmez çapraz bağlanmalarıdır.

Isı ile sertleşen reçinelerin bir diğer avantajı da işleme kolaylığı ve ısı veya basınç gerektirmeden lamine edilebilmeleridir. Bu, onları kaplamalar, yapıştırıcılar ve kompozitler dahil olmak üzere bir dizi uygulama için çok uygun hale getirir.

Termoset reçineler ayrıca genellikle termoplastiklerden daha ucuzdur ve yüksek mukavemet ve sertlik gibi üstün mekanik özellikler sergiler. Ayrıca daha yüksek sıcaklıklara daha iyi dayanabilmeleri, onları yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanım için ideal hale getirir.

Bununla birlikte, ısıyla sertleşen reçineler, doğal kırılma noktaları da dahil olmak üzere bazı dezavantajlara sahiptir. Tersinmez sertleşme süreçlerinden dolayı termoplastiklere kıyasla geri dönüştürülmeleri daha zordur.

2.1.2. Termoplastik matrisli kompozitler

Termoplastikler yapısal olarak amorf ve yarı kristal termoplastikler olarak iki kısımda incelenir. Amorf yapı esneklik sağlarken, kristal yapı sağlamlık ve rijitlik sağlar. Termoplastikler, oda sıcaklığında katı olan malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklarda yumuşamaya ve eriyik hale gelmeye başlarlar. Termoplastik malzemeler ısıtıldıklarında yumuşayıp eridikleri için kolay şekil alabilirler. İç zincir yapılarının incelendiğinde, termoplastiklerin birbirine çok kuvvetli olmayan Van der Waals bağları ile bağlanmış zincirlere sahip olduğu görülmüştür. Termoplastikler çok rijit bir yapıya sahip değildir, bu nedenle ısıtıldıklarında viskoziteleri düşer, atom zincirleri parçalanır ve akışkan faza geçer. Soğutulduğunda kırılan zincirler tekrar katılarak malzemenin rijit yapıya gelmesini sağlar.

Bu özellikler nedeniyle, termoplastikler tekrar tekrar ısıtılıp soğutularak yeniden şekillendirilebilir ve geri dönüştürülebilir. Bu özellikleri termosetlere göre en büyük avantajlarıdır. Termoplastikler için birçok şekillendirme yöntemi vardır; ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, kaplama işlemleri, sıkıştırma ve transfer kalıplama, şişirme, rotasyonel kalıplama, termoform, döküm bu yöntemlerdendir. Termoplastik kompozit malzemelerin özellikleri, elyaf tipi ve takviye malzemesi, dizilişi, uzunluğu gibi birçok etkiye göre değişir.

Örneğin, kompozit malzemelerin sertliği, elyaf yerleştirme oryantasyonu ve tipi, elyaf oranı yüzdesi, baz reçine sertliği ve elyaflar ile ana malzeme arasındaki bağ gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Termoplastik kompozit malzemelerin özellikleri birçok faktöre göre farklılık gösterse de genel özelliklerinden bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Sertlikleri ve darbe dayanımları yüksektir.
- Türüne göre düşük sıcaklıklarda bile basınç altında şekil değiştirebilirler.
- Termoplastiklerin yoğunlukları, metaller ve diğer birçok malzemeye göre hafiflik açısından büyük avantaj sağlar.
- Termal genişleme katsayısı, malzemenin bağ kuvveti ve dolayısıyla malzemenin erime noktası ile ters orantılıdır. Bu nedenle, metallere kıyasla moleküller arası zayıf bağlara ve düşük erime noktalarına sahip olan termoplastikler, yüksek termal genişleme katsayısına sahiptir.
- Metallerden farklı atomik yapıya sahip olmaları nedeniyle korozyon direnci metallere göre daha yüksektir.

Termoplastik malzemelerin avantajları

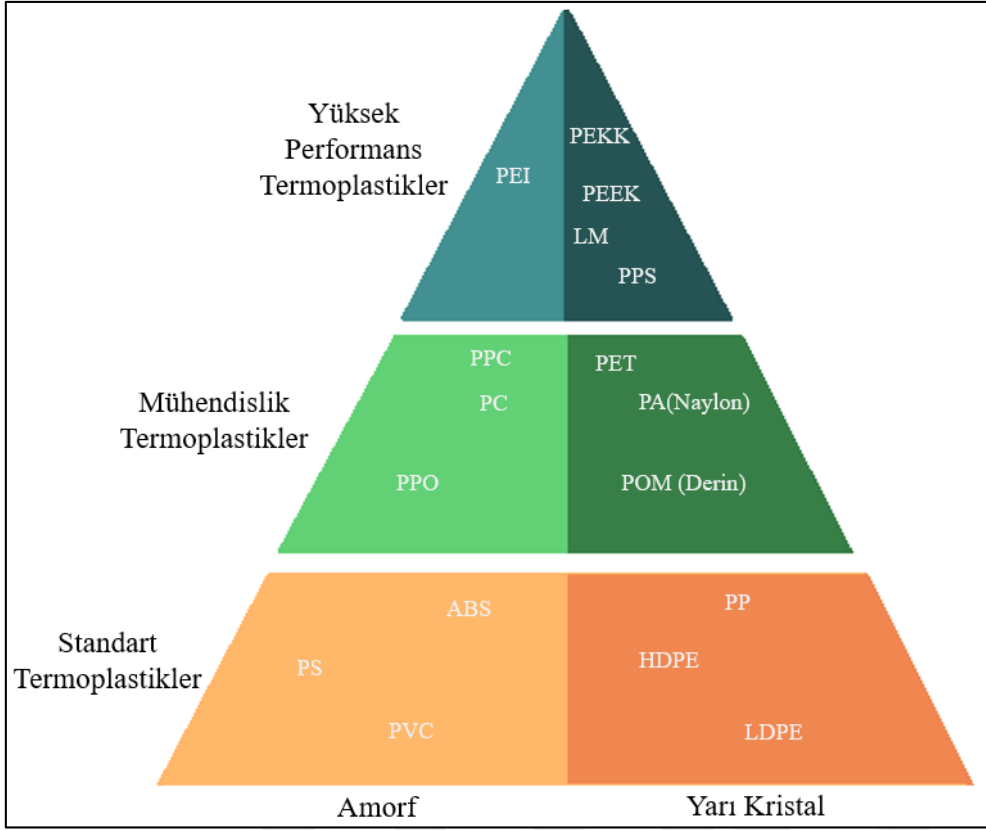
Havacılık endüstrisinde, önemli avantajları nedeniyle termoplastik polimer kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Yakıt maliyetleri, uçakların en büyük işletme maliyetlerinden birini oluşturmakta ve bu maliyetlerin düşürülmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca yakıt miktarını azaltmak CO₂ emisyonlarını azaltır. Bu nedenle havacılıkta yüksek mukavemetli ancak hafif malzemeler büyük önem taşımaktadır. Zaman tasarrufu sağlayan üretimleri ve hafiflikleri, termoplastik polimer kompozit malzemeleri geleneksel malzemelere göre daha tercih edilebilir kılmaktadır. Termoplastik reçineler kimyasal yapı itibarıyla termosetlerden farklıdır, termosetler için kütleme reaksiyonundan sonra meydana gelen çapraz bağlama işlemi termoplastikler için geçerli değildir. Bu, termosetler gibi konsolidasyondan sonra bir kütleme döngüsü gerektirmedikleri ve uygulama yoluyla hiçbir kimyasal reaksiyon meydana gelmediği anlamına gelir [1]. Kompozit imalatında, yüksek maliyet ve zaman kayıplarının ana nedenlerinden biri kütleme çevrimleridir, ancak termoplastik reçineler yapıları gereği kimyasal reaksiyonlar sergilemek için kütleme çevrimlerine ihtiyaç duymazlar, ısı ve basınçla kolayca katılarak maliyet ve zaman tasarrufu sağlarlar. Bu, termoplastik polimer kompozitlere çok sayıda avantaj sağlar.

Daha az zaman kaybı, daha fazla otomatik üretim hattının tasarlanabileceği anlamına gelir. Özellikle gelişen hava taşımacılığı ile üretim oranlarının arttığı sektörde termoplastik polimer kompozitler diğer malzemeleri geride bırakmaktadır. Termoplastik malzemeler için farklı üretim yöntemlerinin uygulanabilmesi, bunların daha kolay ve daha hızlı üretilmesini sağlamakta ve birçok endüstri için cazip hale getirmektedir. Termoplastiklerin bir diğer avantajı da ürün ömürleridir. Termoplastikler uygulama sürecinde kimyasını değiştirmedikleri için termoset gibi özel koşullarda saklanmasını gerektirmez. Havacılık endüstrisinde, termoset esaslı kompozitler, üretim için temiz oda koşulları gerektirir. Temiz oda gereksinimleri genellikle üretimleri daha pahalı ve daha yavaş hale getirir. Bununla birlikte, termoplastikler temiz oda gereksinimi olmaksızın kolayca üretilir. Dondurucular ve temiz oda koşulları enerji, zaman ve para gerektirdiğinden, bozulmaz yapılarının yanı sıra bu onlara maliyet tasarrufu açısından bir avantaj sağlar. Ayrıca çevre denetiminde, özel depolama koşullarının olmamasından elde edilen enerji tasarrufu bile önemlidir. Bozulmaz olmaları, malzemelerin son kullanma tarihi nedeniyle israf olması gibi raf ömrü ile ilgili sorunları da ortadan kaldırır. Termoplastiklerin bir diğer önemli avantajı, uygulamalardan sonra geri dönüşümün mümkün olabilmesidir. Bu termoplastik malzemeler için yeni bir sayfa açar ve geri dönüştürülebilir hale getirir. Günümüzde geri dönüşümün önemi çevre ve ekonomi açısından bilinçlenmekte ve bu bağlamda termoplastik polimer kompozit malzemelerin geri dönüştürülebilirliği ile önem kazanmaktadır. Çeşitli zamanlarda tekrar şekil verilebilmektedir. Buna bağlı olarak, termoplastikler kaynaklanabilir, bu da tamir ve yapıştırma uygulamalarını kolay ve daha az zaman alıcı hale getirir. Bilindiği üzere kompozit malzemeler nemden dolayı bozulma eğilimi gösterirler, havacılık sektöründe özellikle hava şartlarından dolayı neme maruz kalan uçak parçalarında bu sorun ön plana çıkmaktadır. Ancak termoplastik malzemelerin su emmeleri zayıf olduğu için bu alanda avantajlı olduğu söylenebilir. Nemli ortamlarda gelişmiş mekanik aktivite gösterirler. Ayrıca işlenmemiş termoplastik reçineler darbeye karşı direnci arttıran termoset reçinelere göre daha tok malzemelerdir [2]. Termoplastik polimer kompozitlerin kristal yapılarından dolayı genellikle kimyasal etkenlere karşı daha iyi direnç gösterdikleri söylenebilir [3]. Korozyon dirençleri yüksektir. Birçok avantajına rağmen, termoplastik polimer kompozitlerin bazı dezavantajları da vardır. En önemlileri; yüksek hammadde maliyetleri ve uygulamalar için gerekli olan yüksek sıcaklık ve basınç gerektirmeleridir. Dezavantajlarına yüksek sıcaklık ve basınç sağlamak için gereken masraflar ve enerji çıkışları da eklenebilir.

Termoplastik kompozit malzemelerin uygulama alanları

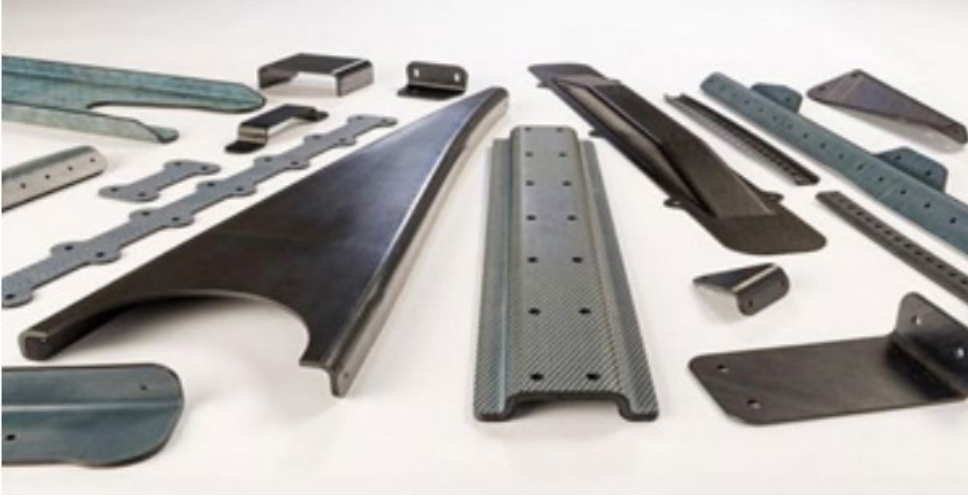
Sıklıkla kullanılan termoplastikler belirtilen özellikleri, avantajları ve dezavantajları dikkate alınarak Şekil 1'deki gibi sınıflandırılabilir. Piramidin yukarısına çıkıldıkça yüksek sıcaklıklara, aşınmaya ve kimyasallara karşı direnç artar. Havacılık ve uzay endüstrisinde cam elyafı (Glass Fiber, GF) veya karbon elyafı (Carbon Fiber, CF) ile güçlendirilmiş PEI, PEEK, PEKK, LM PAEK, PPS ve ABS termoplastikler gibi kompozitlerin matris malzemesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay endüstrisinde termoplastik kompozitlerin uygulamaları sivil havacılık üretimlerinde, askeriye ile ilgili savunma uygulamalarında, uzay ve ilgili araştırma çalışmalarında görülmüştür. Günümüzde ticari havacılık uygulamalarının sektörde büyük bir paya sahip olduğu ve termoplastik kompozitlerin havacılıkta kullanımı Ar-Ge çalışmalarıyla artırılmaya çalışıldığı söylenebilir.

Havacılık sektörü hızla geliştiği için kısa sürelerde uçak üretimine olan talep sektör için önemli bir konu haline geldi. Ayrıca uçakları daha hafif hale getirmek için büyük yapılarda perçin ve bağlantı elemanları gibi montaj malzemelerinin azaltılması da günümüz havacılık şirketlerinin temel konularıdır. Termoplastik kompozitler, yüksek üretim hızları, geri dönüştürülebilirlikleri ve kaynak yapma özellikleri nedeniyle, geleneksel malzemelerle yapılan parçaları geliştirmek isteyen şirketlerin ilgili alanındadır. Bu sebepler ışığında, havacılık şirketlerinin ve enstitülerinin çoğu, araştırma konusu olarak termoplastik kompozitleri içeren farklı projeler gerçekleştirdiler. 1980'lerden bu yana, havacılık endüstrisinde termoplastik kompozit malzemelerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Şekil 2.1'de Termoplastik kompozitlerin havacılık ve savunma endüstrisindeki bazı temel uygulamaları verilmektedir. Karbon fiber takviyeli PPS termoplastik malzemesinden üretilen J-burun bileşenlerinin üretimi olan Airbus için yapılan geliştirme, ticari havacılık iş uygulamalarında termoplastik kompozitlerin önünü açmıştır [4].



Şekil 2.1. Termoplastik malzemelerin sınıflandırılması [5].

Uçaklarda yapısal ve yapısal olmayan parçalarda termoplastik kompozitler kullanılmaktadır. Termoplastik kompozitlerin önemli uygulamaları, 1990'larda zemin panellerini takiben alt takım kapılarının nervürleri ve direkleri ile başlamıştır. Büyük bir tüketici olarak Airbus, A340-600 ve A380 uçaklarında termoplastik kaplamalar, paneller ve ön kenarlar kullandı. Termoplastik kompozitlerin tüketimini ticari uçaklar, jetler ve askeri helikopterler için klipsler, takozlar, braketler ve zemin panelleri gibi küçük boyutlu parçalar takip etmektedir. Termoplastik kompozitlerden yapılmış bir dümen ve kuyruk kullanan Gulfstream G650, önemli örneklerden biridir. En çok kullanılan termoplastik iç parçalar tavalalar, sırtlıklar, tepsiler ve oturma çerçeveleridir. Airbus A330 ve A340 için yanak ve tavan bağlantı rayı üretimi kabin uygulamalarının önemli bir örneğidir [6]. Şekil 2.2'de termoplastik polimer kompozitten üretilen braketler gösterilmiştir.



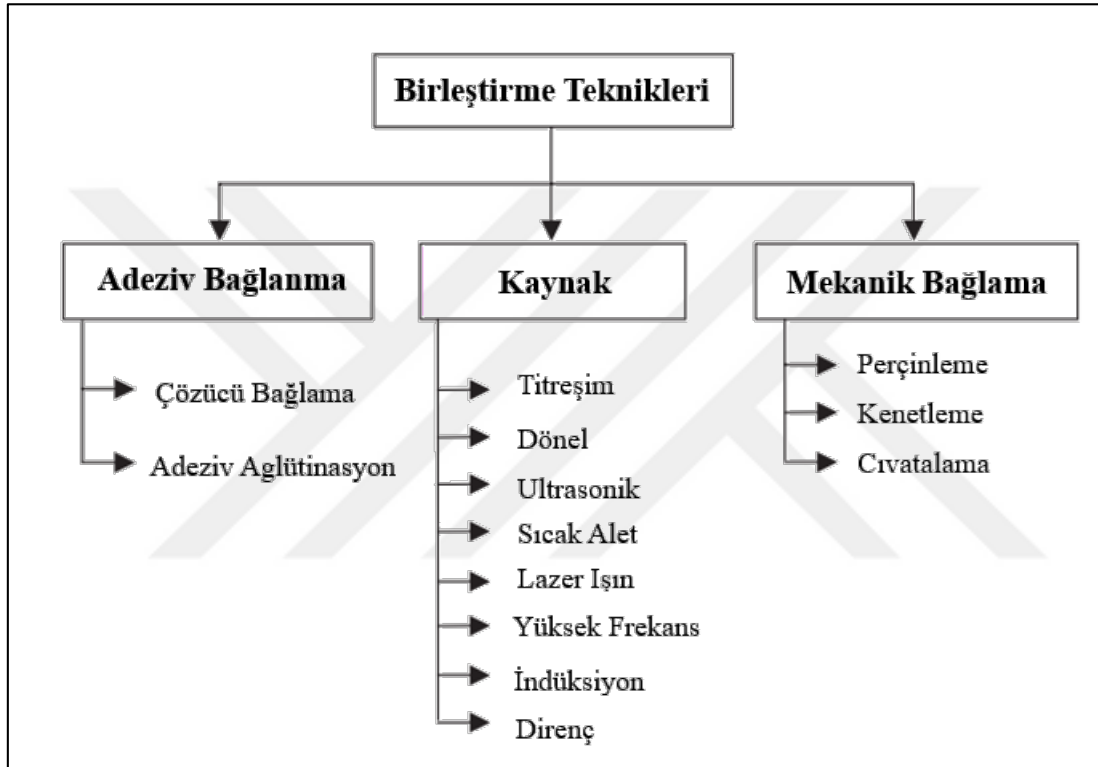
Şekil 2.2. Termoplastik polimer kompozitlerden üretilen braketler [7].

2.2. Kompozit Birleştirme Yöntemleri

Kompozit malzemeler üretim yöntemlerine bağlı olarak kompleks yapıların tek parça üretilmesine imkân sağlamasının yanında, üretim hataları, kalıp masrafı vs. gibi olumsuzlukların getirdiği dezavantajlarla birlikte birleştirme yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte polimer matrisli kompozitlerde termoplastik matrisli kompozitler tersinir özelliği sahip olduğu için termoset malzemelere göre kaynaklanabilirlik özelliği taşımaktadır.

Havacılık, otomotiv ve denizcilik endüstrilerinde statik ve yorulma yüklerine daha iyi dayanmak için termoplastik matrisli kompozit malzemelerin, metalik veya termoset matrisli kompozit malzemelerin yerini almak için giderek daha fazla kullanılması nedeniyle, termoplastik kompozit yapıların birleştirilmesi daha önemli hale gelmektedir. Takviyesiz ve takviyeli termoplastik polimerleri kaynaklamak için birçok birleştirme tekniği geliştirilmiştir [8]. Kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerini Şekil.2.3'te görüldüğü gibi 3 kategoriye ayırabiliriz [9]. Bununla birlikte, her tekniğin sınırlı uygulamaları vardır. Termoplastik kompozitleri birleştirmek için geleneksel birleştirme yöntemlerini kullanmak zor ve maliyetlidir. Boeing Şirketinin Savunma ve Uzay Grubu, bir maliyet karşılaştırması çalışması gerçekleştirmiş ve bir kompozit kanat yapısının cıvatalı bir yapıya kıyasla füzyonla birleştirilmesi (kaynaklanması) ile %61'den daha fazla işçilik tasarrufu elde edilebileceğini bildirmiştir [10].

Termoplastik adeziv bağlanması, adeziv malzemelerin termoplastik polimerlere yapıştırılmasının zorluğu nedeniyle sorunludur. Mekanik birleştirme yöntemleri, gerilim konsantrasyonlarından, galvanik korozyondan, termal genişleme katsayısının uyumsuzluğundan ve delmeden kaynaklanan takviye liflerinin hasar görmesinden kaynaklanan problemlere sahiptir. Termoplastik kompozit kaynak veya füzyonla birleştirme bu sorunları büyük ölçüde ortadan kaldıracaktır [11].



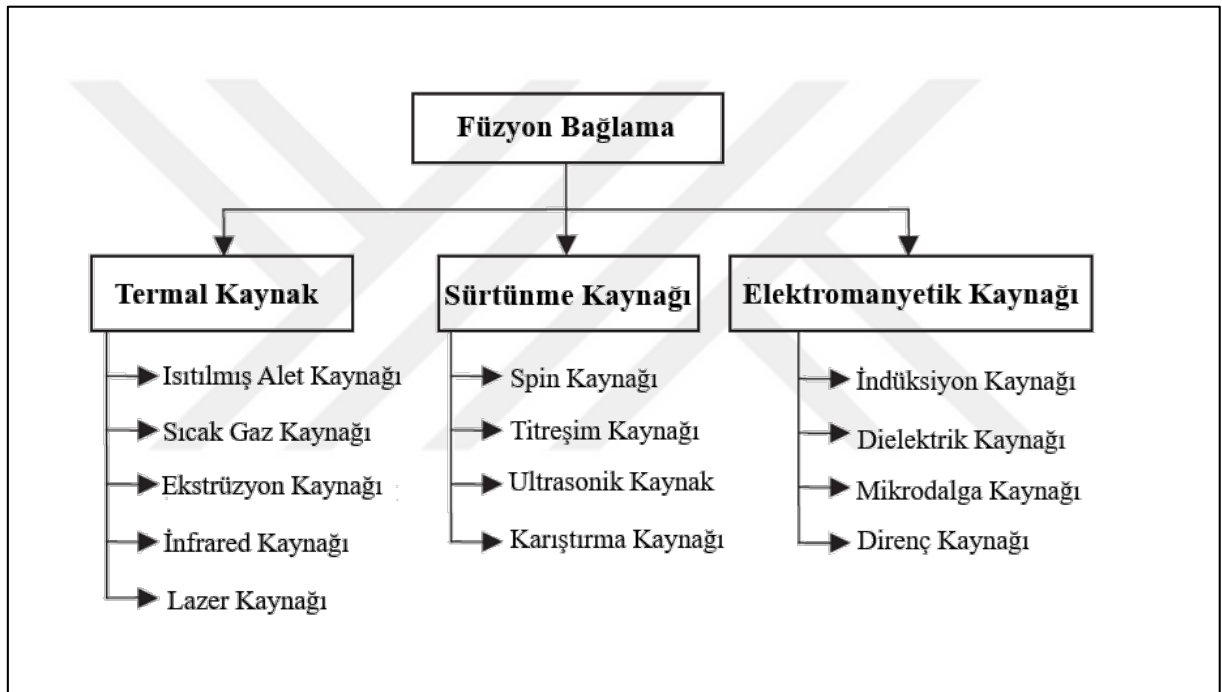
Şekil 2.3. Takviyeli ve takviyesiz termoplastik kompozitlerin birleştirme teknikleri [9].

2.3. Kaynak (Füzyon Bağlama) Yöntemi

Füzyonla bağlama, kaynaklanacak parçaların yüzeylerinin hazırlanması, temas eden polimerlerin viskoz duruma getirmek amacıyla ısıtılması, fiziksel olarak polimer malzemeler üzerine baskı kuvveti oluşturularak polimer zincirlerinin birbirine difüzyon ile kaynaştırılması ve konsolidasyonu için polimerlerin soğutulmasından oluşur [7,11]. Genellikle kaynaklı parçaların kalitesi, otoklavla birleştirilmiş veya basınçla kalıplanmış parçaların kalitesiyle karşılaştırılır.

Otoklavla birleştirilmiş veya basınçla kalıplanmış parçalara benzer şekilde, polimer zincirleri kaynak sırasında bir arayüz boyunca karıştırılır, bu da bağlantı yüzeylerinin kaybolmasına ve kaynaklı alan boyunca yük aktarma yeteneğinin gelişmesine neden olur [12].

Şekil 2.4'te füzyonla birleştirme teknikleri, birleştirme hattındaki ısı üretim mekanizmalarının türüne göre, yani sürtünme kaynağı, termal kaynak ve elektromanyetik kaynak olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.4. Füzyon bağlama yöntemleri [13].

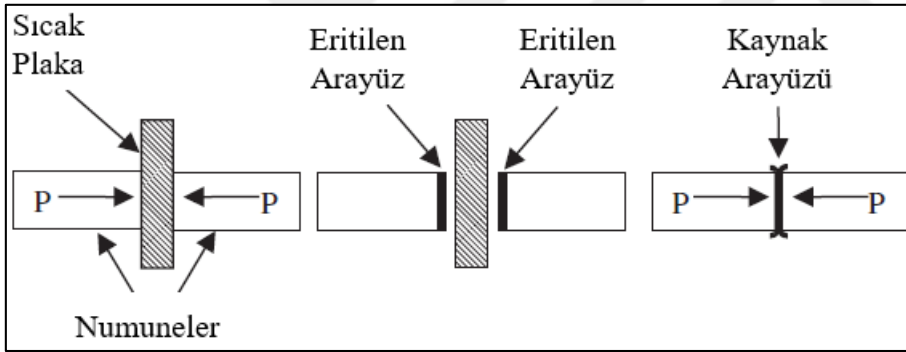
2.3.1. Termal kaynak

Füzyon bağlamanın ikinci alt sınıfı termal kaynaktır. Bu iki aşamalı teknik, harici bir ısıtma aşaması ve bir dövme aşamasından oluşur. Harici bir ısı kaynağı, matrisi eritmek için doğrudan bağlantı yüzeylerine ısı uygular. Daha sonra ısı kaynağı uzaklaştırılır ve yapıştırma yüzeyleri dövme basıncı altında temas ettirilir. Termal kaynak, sıcak alet (plaka) kaynağı, infrared kaynak, sıcak gaz kaynağı, ekstrüzyon kaynağı ve lazer kaynağı yöntemleri olarak ayrılabilir.

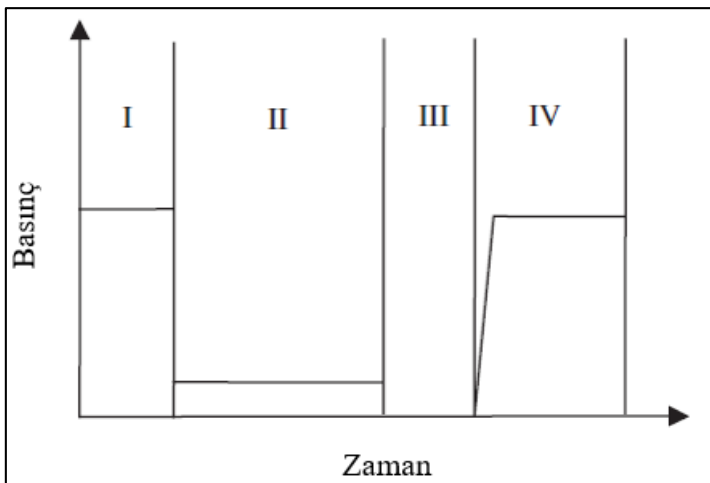
Sıcak gaz kaynağı

Sıcak gaz (plaka) kaynağında, arayüzleri eritmek için kaynak yapılacak yüzey arasına ısıtılmış bir plaka sıkıştırılır. Daha sonra, sıcak alet geri çekilir ve yüzeyler, termoplastik polimer katılaşana kadar uygulanan basınç altında bir araya getirilir.

Şekil 2.4, sıcak alet kaynağının bir şeması gösterilmiştir. Kaynak işlemi sırasında basıncın zamanla değişimi Şekil 2.6'de verilmiştir. Birleştirilecek yüzeyler, basınç uygulaması altında ısıtılmış aletle doğrudan temas ettirilerek erime sıcaklığına kadar ısıtılır. Basınç, termoplastik polimer yumuşamaya ve yanal olarak akmaya başlayana kadar korunur (Faz I). Ardından, birleştirilecek yüzeylerde artan bir erimiş film elde etmek için basınç düşürülür (Faz II). Yeterli bir erimiş film kalınlığı elde edildiğinde, parçalar sıcak aletten ayrılır (Faz III) ve katılaşma için kaynak basıncı kontrol edilerek tekrar bir araya getirilir (Faz IV) [14].



Şekil 2.5. Sıcak alet kaynağı şematik gösterimi [13].



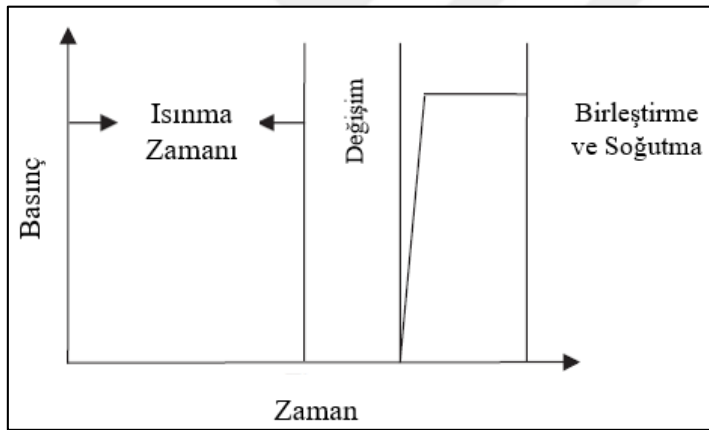
Şekil 2.6. Sıcak alet kaynağında zaman ile basınç değişimi [14].

İnfrared (kızılötesi) kaynağı

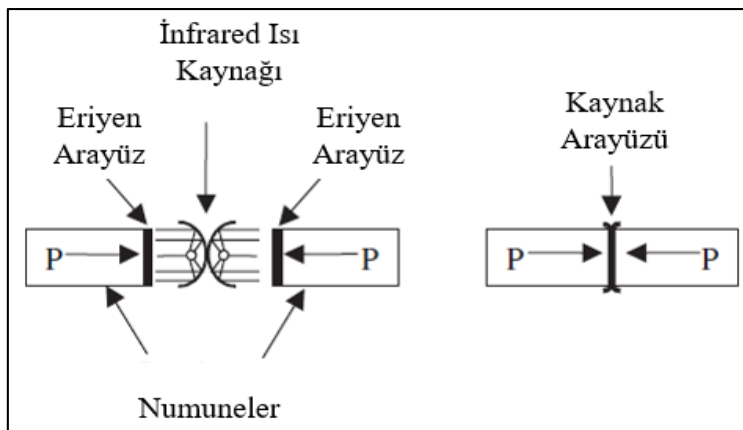
Sıcak alet kaynağının aksine, infrared kaynak temassız bir kaynak tekniğidir. İnfrared kaynak üç işleme adımına ayrılabilir [15]:

- Arayüzün kızılötesi ısıtılması,
- Değişim
- Basınç altında birleştirme ve soğutma (bkz. Şekil 2.7).

Bağlanacak yüzeyler, yüksek yoğunluklu kuvars lambalar tarafından üretilen yoğun kızılötesi radyasyona maruz kalarak ısıtılır. Polimer eritildikten sonra, infrared ısıtıcı çıkarılır ve parçalar polimer katılaşana kadar birlikte bastırılır [8]. Şekil 2.8’de kızılötesi kaynak tekniğinin bir şemasını göstermektedir.



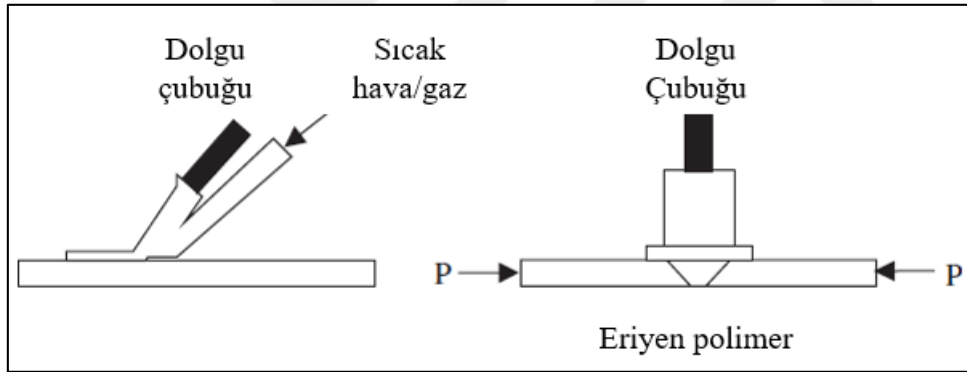
Şekil 2.7. İnfrared kaynağında zaman ile basınç değişimi [16].



Şekil 2.8. İnfrared kaynağının şematik gösterimi [15].

Sıcak gaz ve ekstrüzyon kaynağı

Termoplastiklerin sıcak gaz kaynağı, açık alevin bir sıcak gaz akışı ile değiştirilmesi dışında, metallerin gaz kaynağına benzerdir [16,17]. Bu teknikte, bağ yüzeyleri sıcak hava/gaz akışı ile eritilir, termoplastik dolgu çubuğu, bir alın kaynağında olduğu gibi iki termoplastik plaka arasında kesilmiş bir oluğa itilir ve basınç altında yüzeyleri kaynaştıracak kadar yumuşayana kadar ısıtılır. Şekil 2.9'da sıcak gaz kaynak tekniğinin bir şemasını göstermektedir. Bu teknik, tur kesme derzleri için uygun olmayabilir. Ekstrüzyon kaynağı, erimiş dolgu malzemesinin bağlantı içine ekstrüde edilmesi dışında sıcak gaz kaynağı gibidir [19]. Arayüzleri ısıtmak için hala sıcak gaza ihtiyaç vardır. Sıcak gaz ve ekstrüzyon kaynağı esnek tekniklerdir ve her biri basit ve taşınabilir ekipman gerektirir. Büyük ve karmaşık parçaların üretilmesi için kullanılabilir. Bununla birlikte, bu teknikler yavaş proseslerdir, kontrol edilmesi zordur ve yüksek üretim oranları için uygun değildir.

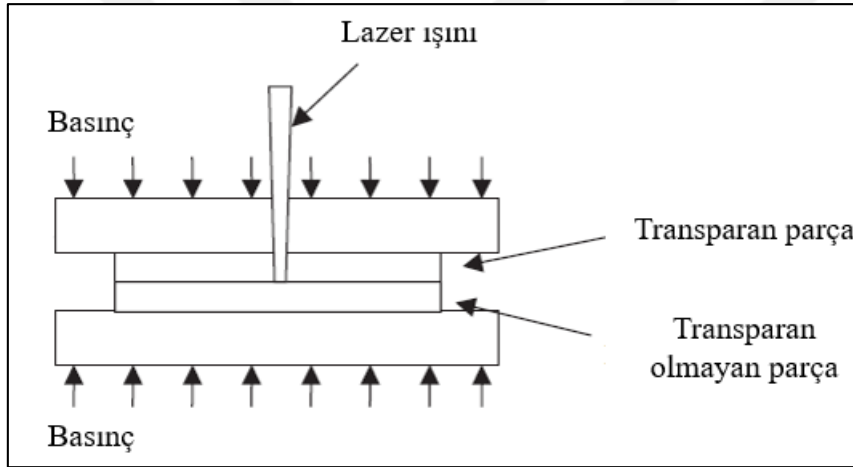


Şekil 2.9. Sıcak gaz kaynağı şematik gösterimi [13].

Lazer kaynağı

İki termoplastik malzeme arasından lazer ışını geçirilir ve lazer ışını malzemeleri kaynak arayüzü boyunca eritir. Termoplastik malzemeler üzerine baskı kuvveti uygulanarak kaynaştırma sağlanır. Malzemeler soğutulurken kaynak elde edilir. Malzeme özellikleri, lazer özellikleri ve kaynak süresi lazer kaynak işlemini etkileyen parametrelerdir. Termoplastik polimerlerin lazer kaynağı, polimerin radyasyon emilim özelliklerine bağlıdır [20]. Lazer radyasyonunun ısıya dönüşümünü kontrol etmek için pigmentler veya katkı maddeleri kullanılabilir.

Örneğin, lazer iletim kaynağında, birleştirme parçaları sabitlenir ve birbirine sıkıca basılır [21]. Lazer ışını, genellikle transparan bir malzemeden iletilir ve transparan olmayan malzemeden emilir. Isı iletimi ile arayüz ısıtılır ve termoplastik polimer eritilir. Şekil 2.10.'da görüldüğü gibi ardından, parçalar birbirine basılır ve kaynaklanır. Bu teknik, bindirme tipi kaynaklar için kullanılabilir. Lazer kaynağı hızlı, temiz ve temassız bir işlem olarak bilinir [22]. Termoplastik polimerlerin kaynaklanması için lazer kullanmanın önündeki en büyük engel, düşük lazer güç seviyelerinde bile termoplastik polimerlerde çok hızlı bir şekilde yanma oluşmasıdır. Polimerlerin termomekanik davranışı metallere farklıdır [23]. Metaller, katıdan sıvı faza ve daha sonra sıvı fazdan bir buhar fazına giden belirli sıcaklıklarda net faz dönüşümlerine sahiptir.



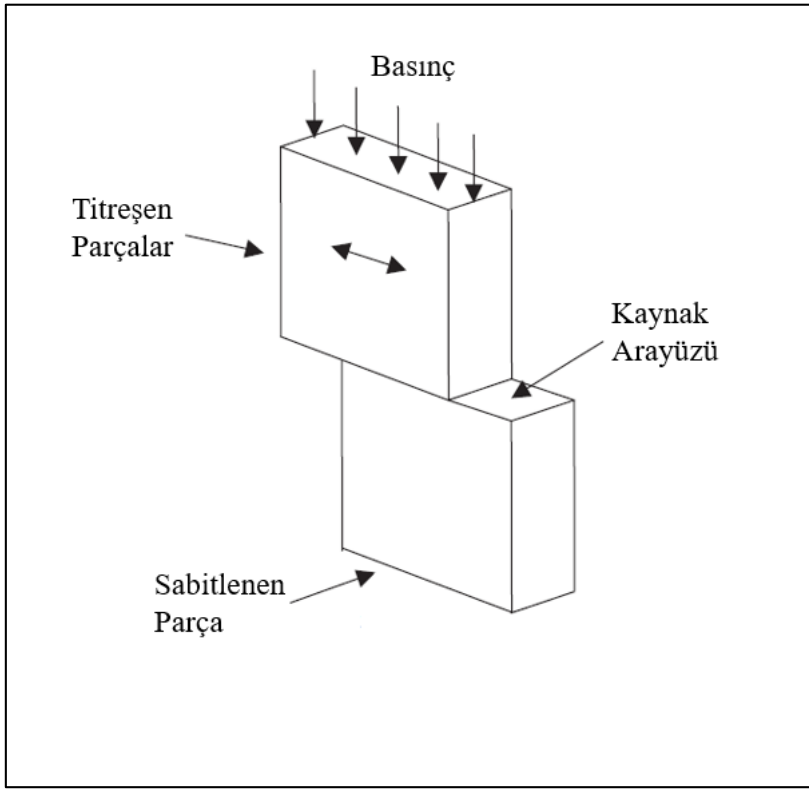
Şekil 2.10. Lazer kaynağı şematik gösterimi [13].

2.3.2. Sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağı, birleştirilecek polimer malzemeler arasında polimerler arasında sürtünme oluşturularak birleşme arayüzünde ısı üretilmesi ve ısı üretilen polimer malzemelere basınç uygulanması, birbirine kaynayan polimerin soğutulması ve konsolidasyonudur. Sürtünme işinden birleşme arayüzünde ısı üretmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Sürtünme kaynağı yöntemleri, ısıtma yöntemine göre doğrusal titreşim kaynağı, spin kaynağı, ultrasonik kaynak ve sürtünme karıştırma kaynağı olarak sınıflandırılabilir [13].

Titreşim kaynağı

Titreşim kaynağında birleştirilecek iki parça basınç altında temas ettirilir. Bir parça sabitlenir ve diğeri, termoplastik polimeri eritmek ve karıştırmak için arayüzde mekanik sürtünme ve kayma gerilmeleri ile yeterli ısı üretilene kadar uygun bir frekansta arayüze paralel olarak titreşir [7,23]. Doğrusal titreşim hareketi durdurulduktan sonra parçalar hizalanır ve erimiş polimer uygulanan basınç altında birleşerek bir kaynakla sonuçlanır [10,17-24]. Şekil 2.11’de doğrusal titreşimli kaynak tekniğinin bir şemasını göstermektedir.

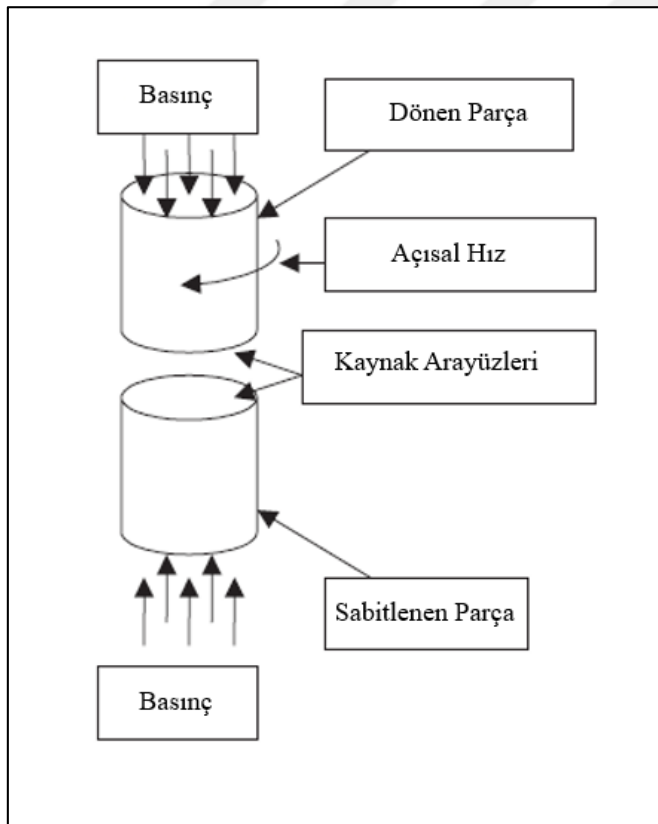


Şekil 2.11. Titreşim kaynağı şematik gösterimi [13].

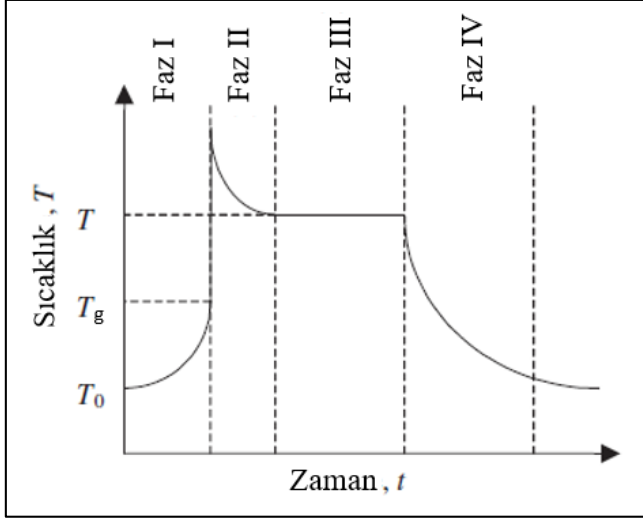
Döndürmeli (Spin) kaynaklama

Spin kaynağı, dairesel birleşme yüzeyleri boyunca termoplastikleri ve dolgu takviyeli termoplastik kompozit bileşenleri kaynaklamak için kullanılan en yaygın sürtünme kaynağı tekniklerinden biridir. Şekil 2.12’de gösterildiği gibi bu işlemde, parçalardan biri sabitlenirken diğeri sabit parçaya belirli bir açisal hız ve aksel basınç altında erime meydana gelene kadar dönerek sürtünür, ardından polimerin soğuması ve katılaşması gelir.

Şekil 2.13'de gösterildiği gibi doğrusal titreşim kaynağına benzer şekilde, bu işlem dört aşamadan oluşur: I) ilk ısıtma, II) kararsız erime ve akış, III) sabit durum akışı ve IV) katılaşma [25-28]. Faz I 'de ısı, ara yüzeydeki malzeme sıcaklığını artıran sürtünme ile üretilir. Polimerin tipine, yani amorf, yarı kristal ve kristale bağlı olarak, ara yüzeydeki sıcaklık erime veya camsı geçiş sıcaklığına, T_g ulaştığında polimer erir. Faz II 'de, ısıtma mekanizması erimiş bölge içinde katı sürtünmeden kesme dağılımına değişir. Kesme ve ısı üretim oranları çok yüksek olduğundan sıcaklık hızla yükselir. Erimiş film, kararsız durum sürtünme fazında çok incedir. Erimiş film kalınlığı arttıkça, erimiş malzemenin bazı kısımları aksel basınçla kayma bölgesinden dışarı doğru sıkıştırılır. Kararlı durum akış fazı, ara yüzeydeki ısı üretimi ve kaybı bir denge durumuna ulaştığında meydana gelir. Bu faz sırasında, erimiş tabaka, kalınlık boyunca önemli bir sıcaklık gradyanı ile sabit bir kalınlığa ve sıcaklığa, T sahiptir. İyi kalitede bir kaynak için yoğun bir akış gerekli olduğundan, kararlı durum rejimine ulaşmak yüksek kaynak mukavemeti sağlar. Faz IV'te dönme hareketi aniden veya kademeli olarak durdurulur. Polimer zincirlerinin difüzyonunu kolaylaştırmak için dövme basıncı uygulanır, ardından polimer katılaşır [25-28].



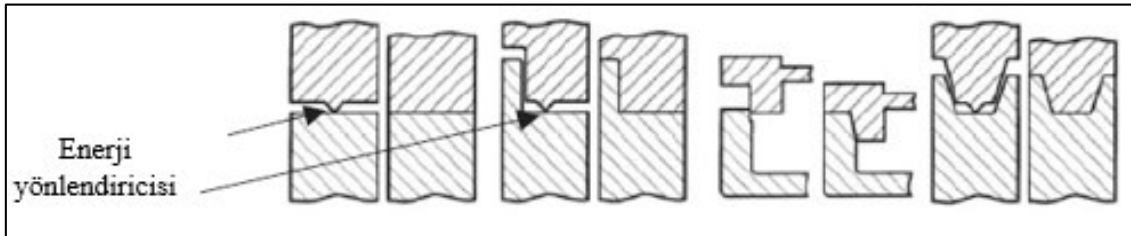
Şekil 2.12. Spin kaynağının şematik gösterimi [25–28].



Şekil 2.13. Spin kaynağı prosesi [25–28].

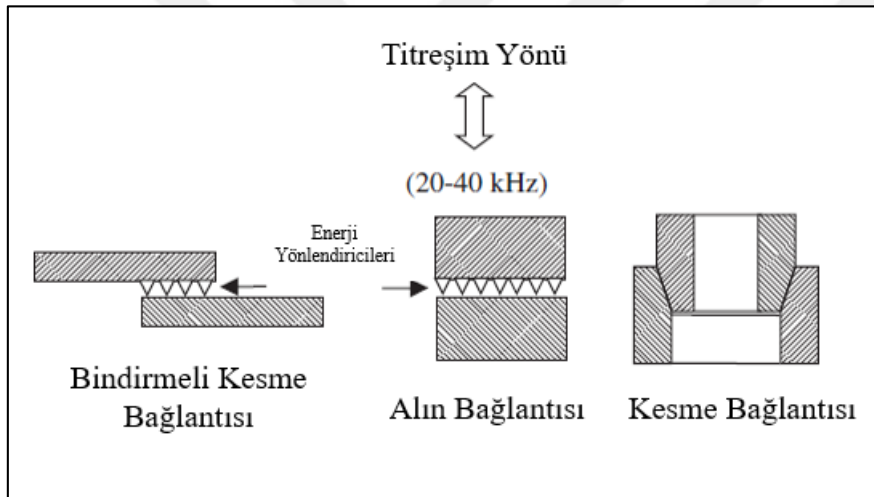
Ultrasonik kaynak

Ultrasonik kaynak, parçaları kaynaklamak için yüksek frekanslı mekanik titreşim kullanılan bir işlemdir. Kaynak yapılacak parçalar, basınç altında bir arada tutulur ve ardından, titreşimleri malzeme boyunca iletmek için bağlantı geometrisine bağlı olarak yüksek frekanslı dikey veya paralel salınıma tabi tutulur. Isı, malzemedeki yüzey ve moleküller arası bir çeşit sürtünme oluşturulur. Titreşim enerjisi polimer malzemeler yoğunlaştığından, enerji yönlendiricileri olarak bilinen pürüzler, bağlantı arayüzünde ısıtmayı başlatmak için parçaya önceden kalıplanır. Şekil 2.14'te enerji yönlendiricileri için farklı tasarımları göstermektedir. Enerji yönlendiricilerindeki sıcaklık erime sıcaklığına ulaştığında, baskı kuvveti altında akar. Akan polimer arayüzü ıslatır ve arayüz boyunca polimer zincirlerinin difüzyonu ve meydana gelir. Böylece polimer malzemelerin kaynaklanması sağlanır [30].



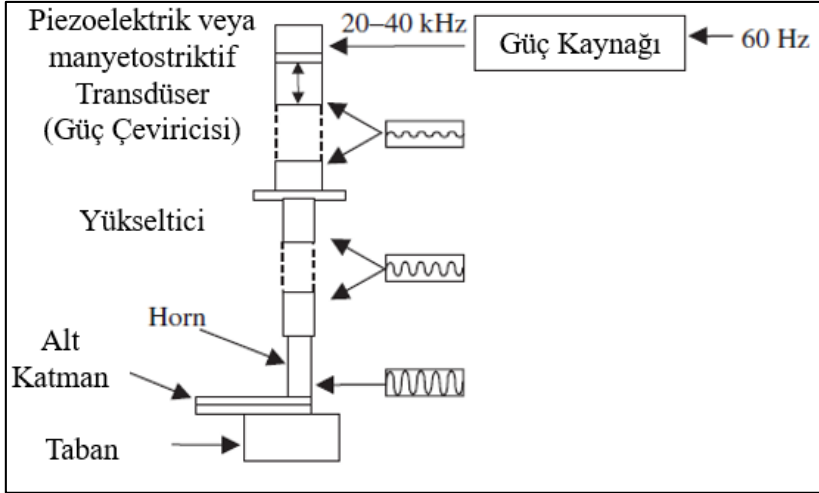
Şekil 2.14. Enerji yönlendiricilerinin farklı tasarımı [25].

Ultrasonik kaynak kullanarak iki polimerin kaynaklanabilirliği malzeme özelliklerine, bağlantı tasarımına, kaynak frekansına ve kaynak genliğine bağlıdır [30,31]. Ultrasonik kaynak, amorf veya yarı kristalli termoplastik polimerlere, kristalli polimerlere göre daha etkili bir şekilde uygulanabilir. Amorf ve yarı kristal termoplastik polimerler için kaynak, camsı geçiş sıcaklığı ile erime sıcaklığı arasında gerçekleşirken, kristalin termoplastik polimerler için kaynak erime noktasında gerçekleşir. Bir kristalin polimerin, termoplastik polimerin sıcaklığı sırasıyla erime noktasının altına veya üstüne geldiğinde hızla katılaştığı veya eridiği bilinmektedir. Kristalin polimerlerin ortaya çıkan hızlı katılaşması, kaynaklanan polimerlerin arayüzlerinin ıslanmasını önleyerek kırılgen kaynaklara neden olur [32]. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi alın bağlantı ve bindirmeli kesme bağlantıları, ultrasonik titreşim temas alanlarına dik olarak meydana gelir [7,31,32].



Şekil 2.15. Farklı bağlantı tasarımları [13].

Şekil 2.16'da ultrasonik kaynak makinesinin şematik bir gösterimi yer almaktadır. Sistem bir güç kaynağı, bir piezoelektrik veya manyetostriktif transdüser, bir yükseltici, bir horn, bir alt katman ve bir destek tabanından oluşur. Salınımlar, iki metal blok (transdüser) arasına monte edilmiş piezoelektrik veya manyetostriktif malzemeye yüksek frekansta elektrik gücü uygulanarak üretilir. Bu salınımlar çok küçük olduğu için yükseltici, genliği artırmak için bir dönüştürücüye bağlanır. Artırılmış titreşim, kaynak alanı üzerindeki alt tabakanın üst yüzeyi ile temas halinde olan horna [32] ve horn ile kaynak arayüzüne aktarılır. Basınç, horn aracılığıyla alt katmana uygulanır. Ultrasonik sistem nispeten kolayca otomatikleştirilir ve özellikle yüksek hacimli üretim için uygundur. Uygun fiykir tasarımı ile büyük parçaların birleştirilmesinde ultrasonik kaynak kullanılabilir [13].



Şekil 2.16. Ultrasonik kaynak şematik gösterimi [13].

Ultrasonik kaynak için önemli parametreler kaynak basıncı, kaynak genliği, kaynak süresi ve kaynak frekansdır. Kaynak sırasında uygulanan basınç, arayüzde daha iyi enerji transferi ve eriyik akışı sağlar ve kaynak mukavemetini artırır [33,34]. Kaynaklama süresi, süredeki artış, kaynaktaki enerji dağılımını artırır ve kaynak mukavemetini optimum bir değere kadar iyileştirir [33,34]. Optimum kaynak süresinin üzerinde, büyük miktarda flaş oluşur ve polimer zincirleri, polimer akışı yönünde yönlendirilir, böylece bağlantı performansını zayıflatır. Ayrıca, kaynak genliğinin artırılması, kaynaktaki enerji dağılımını arttırdığından kaynak mukavemetini artırır.

Karıştırma kaynağı

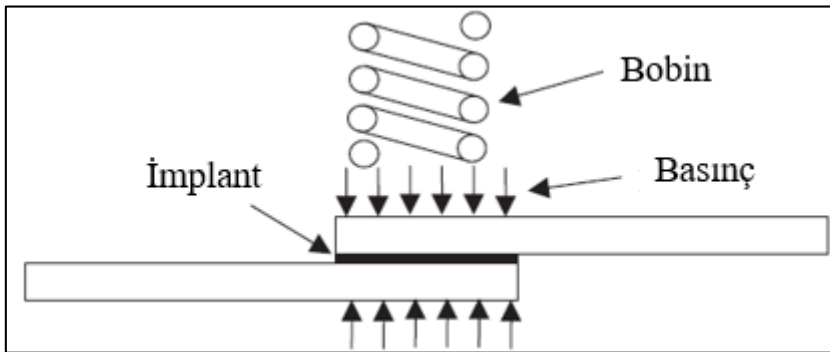
Karıştırma kaynağı ilk olarak 1991 yılında alüminyum alaşımlarını kaynaklamak için geliştirilmiştir. Daha sonra metal matrisli ve polimer matrisli kompozitlerin kaynaklanmasında uygulanmıştır [36]. İki polimer malzeme arasında bir kafa pimi dönerek malzemeleri ısıtır ve malzemeler birbirine oturana kadar delme işlemi yapar. Isıtılan ve birbiri üzerine oturan malzemeler birbirleri ile birleştirilir.

2.3.3. Elektromanyetik kaynak

Füzyon bağlamanın son sınıfı elektromanyetik kaynak tekniğidir. Yüksek frekanslı bir manyetik alan, kaynak arayüzündeki manyetik malzemelerin ısınmasına ve çevreleyen polimeri eritmeye başlamasına neden olur. Daha sonra, ara yüzeydeki erimiş polimerler, baskı kuvveti altında kaynaşır. Polimer malzemeler soğutularak kaynak prosesi gerçekleştirilir [24,36]. Elektromanyetik kaynak teknikleri indüksiyon kaynağı, dielektrik kaynağı, mikrodalga kaynağı ve direnç kaynağıdır.

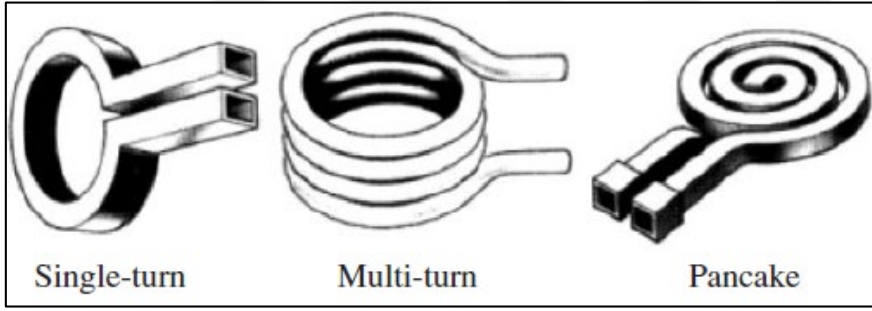
İndüksiyon kaynağı

İndüksiyon kaynağında, termoplastik polimere ısı, 200–500 kHz aralığında yüksek frekanslı (radyo frekanslı) bir elektromanyetik alana yerleştirilmiş bir implant tarafından sağlanır. İmplant, ferromanyetik malzemelerden yapılmıştır ve bağlantı bölgesinin şekline uygundur. İmplant, folyo benzeri bant veya polimer içinde yer alan mikron boyutlu parçacıklar şeklinde olabilir. Elektromanyetik bir bobin manyetik bir alan oluşturur ve ısıtmanın dirençli ısıtma ile gerçekleştiği implant içinde eddy akımlarını indükler. Polimer malzemeler arasında yer alan implantın sıcaklığı artar ve polimerlerin erimesini sağlar. Eriyen termoplastik polimerlere baskı kuvveti uygulanarak kaynak işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.17’de, indüksiyon kaynağı kullanılarak bindirmeli kesme bağlantısının bir şemasını göstermektedir.



Şekil 2.17. İndüksiyon kaynağı kullanılarak bindirmeli kesme kaynağının şematik gösterimi [13].

İndüksiyon makinesi bir jeneratör veya güç kaynağı, manyetik alanı kaynak bölgesine ileten bir indüksiyon bobini, parçayı ve bobini yerleştirmek için bir yerleştirme yuvası ve bir implant veya kaynak malzemesinden oluşur [38]. Bobin bakırdan yapılmıştır ve su soğutmalıdır. Yeterli bir polimer akışına ve konsolidasyonuna sahip olmak için, implant tipik olarak polimer emdirilmiş metal örgü veya ekstra bir polimer tabakası içerir [39]. Başarılı bir kaynak işleminin olması için üniform sıcaklık dağılımı olması gerekir. Bağlantı bölgesinde üniform sıcaklık dağılımı büyük ölçüde bobin tasarımına ve implant konfigürasyonuna bağlıdır [37,38]. Üniform bir manyetik alan oluşturulması bobin tasarımına bağlıdır. Şekil 2.18’de, bobinlerin temel tasarımlarını şematik olarak gösterilmiştir [38]. Tek turlu bir manyetik bobin, iç çapın etrafında bir manyetik alana sahiptir, çok turlu bir bobin, daha uzak kaynak alanları için genişletilmiş bir manyetik alana sahiptir ve bir yassı bobin, esas olarak geniş düz alanları ısıtmak için kullanılır.

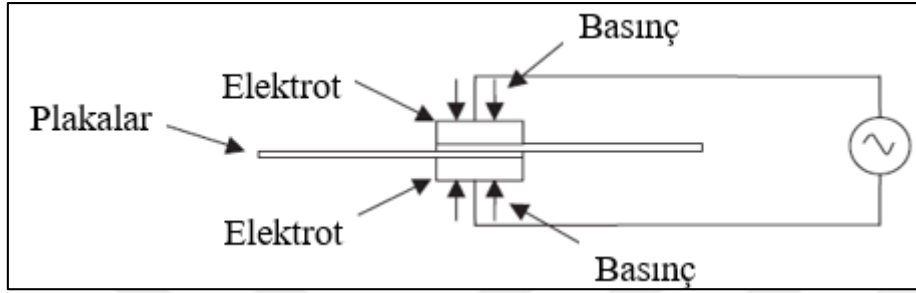


Şekil 2.18. İndüksiyon kaynağı için tasarlanan farklı bobin çeşitleri [38].

Dielektrik kaynağı

Dielektrik kaynağında (radyo frekansı kaynağı olarak da adlandırılır), MHz frekans bölgesindeki yoğun bir elektromanyetik alan doğrudan polimeri ısıtmak için uygulanır [16,17,36,39]. Yüksek dielektrik kayıp faktörü katsayısına sahip polimerler, alan polaritesinin değiştirilmesi sırasında alan enerjisinin bir kısmını ısıya dönüştürür. Yoğun alan, birleştirilecek parçaların her iki tarafına bastırılan iki elektrot tarafından polimere uygulanır. Şekil 2.19’da dielektrik kaynağın bir şeması verilmiştir. Dielektrik kaynağındaki anahtar parametre, bir malzeme özelliği olan dielektrik kayıp faktörünün katsayısıdır. Yüksek dielektrik kayıp faktörü katsayısına sahip malzemeler, düşük dielektrik kayıp faktörü katsayısına sahip olanlardan daha fazla ısı üretir.

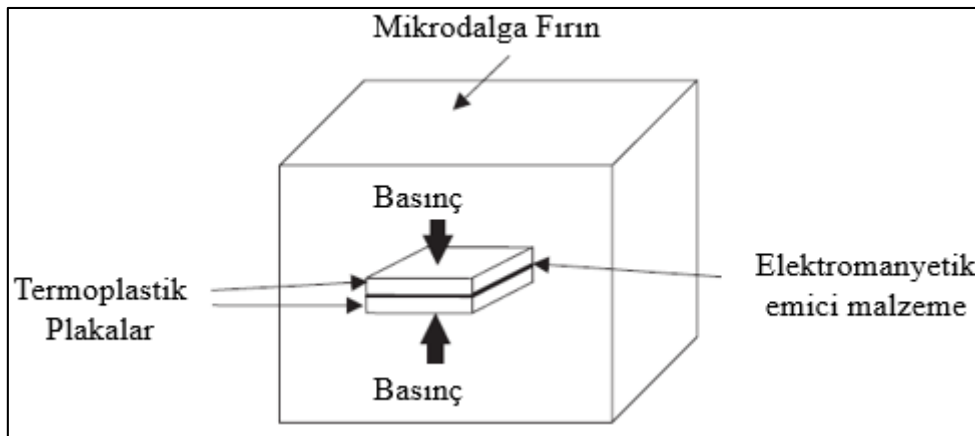
PVC, poliüretan ve poliamid gibi polimerler yüksek dielektrik kayıp faktörü katsayısına bunun yanında polietilen, polipropilen ve ABS gibi malzemeler çok düşük dielektrik kayıp faktörü katsayısına sahiptirler. Kaynağın kalitesi, dielektrik güç kaynağının, parçanın kalınlığının, kaynak yapılan parçanın alanının, malzeme özelliğinin, kaynak süresinin ve kaynak basıncına bağlıdır [41].



Şekil 2.19. Dielektrik kaynağının şematik gösterimi [13].

Mikrodalga kaynağı

Mikrodalga kaynağında, kaynak basıncı varlığında birleştirme elemanları arasına ince bir tabaka elektromanyetik emici malzeme yerleştirilir ve ardından GHz mertebesinde yoğun mikrodalga enerjisi uygulanır. Mikrodalga enerjisi elektromanyetik emici malzemede bir sıcaklık artışına neden olur ve elektromanyetik emici malzeme ısıyı bağlantı elemanlarına ve bağ hattına iletirerek arayüzde erimiş bir polimer tabakası oluşturur. Elektromanyetik emici malzeme, eddy akımı, histerezis veya dielektrik kaybı gibi farklı mekanizmalarla ısıtılabilir [42]. Mikrodalga kaynak işleminin bir şeması Şekil 2.20’de görülmektedir [40].



Şekil 2.20. Mikrodalga kaynağı şematik gösterimi [13].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Shi ve ark. (2015), termoplastik kompozitlerin sürekli direnç kaynağını simüle etmek için elektrik ve ısı transferi modellerinden oluşan bir süreç modeli geliştirilmiştir. Modelleme ve sayısal sonuçların deneysel doğrulaması için ısıtma elemanı olarak paslanmaz çelik ile bindirmeli kesme konfigürasyonunda kaynaklanmış cam kumaş takviyeli polifenilensülfid kullanmışlardır. Model tarafından tahmin edilen kaynak sıcaklıklarının deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür. Kaynak giriş gücü ve kaynak hızının kaynak sıcaklığını etkileyen en önemli iki parametre olduğu görmüşler ve elektrik konektörleri ve ısıtma elemanı arasındaki temas kalitesinin, kaynak sıcaklığının kaynak yönüne enine dağılımını etkilediği bulmuşlardır. Ayrıca, elektrik konektörlerinin boyutunun, belirli bir kaynak sıcaklığında elde edilebilecek kaynak hızını ve kaynak için gerekli güç girişini etkilediğini gözlemlemişlerdir [47].

Shi ve ark. (2015) yaptıkları bir başka çalışmada ise, dokuma cam kumaş takviyeli polieterimid (GF/PEI) kompozitlerin direnç kaynağında boşluk oluşumunu incelenmişlerdir. Kaynak işleminde boşluk oluşum mekanizmalarını anlamak için model ve deneysel çalışma yapmışlardır. Direnç kaynağındaki boşluk oluşumunun, kaynak basıncı, kaynak sıcaklığı ve laminatların malzeme özellikleri, yani matris modülü ve elyaf sıkıştırılabilirliği ile ilişkili olduğu saptamışlardır. Artan kaynak basıncının genel olarak boşluk oluşumunu önlemeye yardımcı olduğunu, buna karşın artık nemin neden olduğu boşlukları önlemek için fiberin sıkıştırılmasının neden olduğu boşluklardan (0,4 MPa) daha yüksek bir kaynak basıncı (1,5 MPa) gerekli olduğunu gözlemişlerdir. Bu nedenle, kalan nemin neden olduğu boşlukların, 0,8 MPa en fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Kaynak sırasında birleşim yerlerindeki sıcaklığın üniform olmayan dağılımından dolayı, birleşim yerlerinin ortasında, kenarlara göre daha fazla boşluk oluştuğu gözlemlenmiştir [48].

Shi ve ark. (2011) yaptıkları bir diğer çalışmada, cam elyaf takviyeli polieterimidin (GF/PEI) direnç kaynağı geçici ısı transferi modelleri oluşturarak ve kaynak arayüzündeki sıcaklık dağılımının homojenliğini etkileyen temel faktörleri tartışmışlardır. Kaynakların kalitesini tahmin etmek için bir konsolidasyon modeli oluşturulmuşlar ve modeli doğrulamak için bindirmeli kesme testi kullanılmışlardır. Isıtma süresinin üst sınırını bulmak için izotermal olmayan bir bozunma kinetik modelini kullanmışlardır.

Mevcut modellere dayanarak, GF/PEI için bir işleme penceresi tanımlanmış ve optimum işleme parametrelerin optimizasyonunu sağlayan modeli oluşturmuşlardır [49].

Warren ve ark. (2016), tek yönlü cam takviyeli polietilen tereftalat (PET) termoplastik malzemesi kullanılarak 5 farklı kaynak basıncı değeri ve 6 farklı ısıtma elemanı tipiyle çalışma yapmışlardır. Yapılan kaynak çalışmalarındaki numunelerini bindirmeli kesme testine göre karşılaştırmışlardır. Test numunelerini ayrıca taramalı elektron mikroskopunda inceleyerek kaynak kalitelerini gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda 0,066 mm tel çapına sahip ısıtma elemanı ve 345 kPa değerindeki kaynak basıncıyla yapılan kaynak numunelerinin bindirmeli kesme mukavemetine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada kaynak basınç değerinin 96,5 kPa ile 345 kPa arasında bindirmeli kesme mukavemetini arttırdığı 345 kPa basınçtan itibaren mukavemet değerini azalttığını görmüşlerdir. 0,089 mm örgü açıklığına ve 0,041mm tel çapına sahip C ve 0,061mm örgü açıklığı 0,041 mm tel çapına sahip D ısıtma elemanlarının aynı tel çapına sahip olmasına rağmen D ısıtma elemanının bindirmeli kesme mukavemeti değerinin 0,089 mm örgü açıklığına sahip ısıtma elemanına %250 den fazla mukavemet değerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir [50].

Zhao ve ark. (2023), termoplastik kompozitlerin direnç kaynağında, karbon elyaf takviyeli polietereterketon (CF/PEEK) malzemesinin kaynaklanması için kullanılan paslanmaz çelik ısıtma elemanının üzerine elektro eğirme yöntemi kullanılarak üretilen nano lif yerleştirerek ısıtma elemanın arasına giren reçineyi arttırmayı ve oluşacak boşlukları azaltarak bağ hattı üzerinde zengin bir reçine bölgesi oluşturmayı hedeflemişlerdir. Bağlantılar üzerinde nanolif filmlili kaynaklı bağlantıların bindirmeli kesme mukavemeti (LSS), filmsiz bağlantılara kıyasla 2,3 kat artarak 36,98 MPa'ya yükseldiğini ve kaynak bağlantısının belirsiz yorulma ömrünün statik bindirmeli kesme mukavemetinin %20 değerinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Süreç parametrelerinin bindirmeli kesme mukavemeti etkisini araştırmak için Taguchi yöntemi ve Varyans Analizi yaklaşımı kullanmışlardır. Kaynak eğrilerinin, kusur dağılımlarını ve fraktografik karşılaştırmalı bir analizini, nanolif filmlili ve filmsiz kaynaklı bağlantılar için gerçekleştirmişlerdir. Fraktografik analize göre nano lif kullanılmayan kaynaklı yapılarda reçine eksikliğini saptamışlardır. Nano lif filmin, reçine empenyesini geliştirdiğini ve kaynak işlemi sırasında boşlukları azaltmak için reçine açısından zengin bir bölge sağlayabileceğini ve bu da bağlantıların mekanik olarak birbirine kenetlenmesini iyileştirdiğini göstermişlerdir.

Yapılan çalışma da optimum kaynak parametrelerinin 50 A kaynak akımı, 15 saniye kaynak süresi, 200 örgü sayısı, 4 saat elektro eğirme süresi olduğunu belirlemiştir [51].

Rohart ve ark. (2020), polifenilensülfid (PPS) malzemesi ile paslanmaz çelik ısıtma elemanı arasındaki yapışmayı arttırmak amacıyla kullanılan kaplamanın etkisini çalışmışlardır. Yapılan paslanmaz çelik örgüye uygulanan bir silan kaplamanın geliştirilmesiyle daha iyi bir PPS ve ısıtma elemanı yapışması olduğunu gözlemlemiştir. Oksidasyon sıcaklığı, çözücünün doğası ve çözelti pH değerinin bindirmeli kesme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Kaplama için optimum parametrelerin, çözücü olarak etanol ve 11 pH değeri kullanılarak 500 °C'lik bir oksidasyon sıcaklığı yapılan kaplamanın iyi bindirmeli kesme mukavemetine sahip kaynak numunesini sağladığını saptamışlardır. İki malzeme arasındaki yapışmayı karakterize etmek için kaplanmış paslanmaz çelik ve CF/PPS kompozit plakaların çift konsol kiriş testleri kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda yapılan kaplamanın kaplama yapılmayan ısıtma elemanları ile yapılan kaynak işlemlerine göre %32'lik bir mukavemet artışı sağladığını tespit etmişlerdir [52].

Xiong ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada cam kumaş takviyeli polieterimid (GF/PEI) laminatların direnç kaynağı için birleşim yerleşimlerini geliştirmek amacıyla grafen oksit nano-tabakaların eklenmesine yönelik bir yaklaşım önermişlerdir. Grafen oksit nano tabakalarını, farklı ağırlık oranlarındaki PEI kaplı karbon fiber (CF) ısıtma elemanını üzerine yerleştirmişlerdir. Daha sonra morfolojilerini ve yapılarını, bir taramalı elektron mikroskobu, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre, X-ışını kırınımı ve Raman spektrometre ile incelemişlerdir. Giriş gücü, ısıtma süresi ve basınç gibi optimum kaynak parametrelerini değerlendirmek için tek bindirmeli kesme numunelerinden elde edilen bindirme kesme mukavemeti (LSS) ve kırılma morfolojilerini rapor etmişlerdir. Grafen oksidin kaynaklı numunelerin bindirmeli kesme mukavemeti üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, grafen oksidin bindirmeli kesme mukavemetini arttırdığını ve kütlece %0,2 oranındaki grafen oksidin mukavemet değerini maksimum seviyeye getirdiği ve %0,2'inin üzerindeki grafen oksidin mukavemeti düşürdüğünü gözlemlemiştir [53].

Xiong ve ark. (2021), yaptıkları bir başka çalışmada ise cam kumaş takviyeli polieterimid (GF/PEI) laminatların direnç kaynağı için birleşim yerleşimlerini geliştirmek amacıyla karbon nanotüp tabakaların eklenmesine yönelik bir yaklaşım önermişlerdir. Biriktirme yöntemiyle karbon nanotüp üretiminde etkili parametrelerden biri olan büyütme süresinin ısıtma elemanı ve PEI reçinesi arasındaki ıslanabilirliği üzerindeki etkileri inlemişlerdir. Yaptıklarının çalışma sonucunda karbon nanotüplerin eklenmesinin arttırmasının kapiler etkiden dolayı ıslanabilirliği arttırdığını görmüşlerdir. Numunelerin fraktografik analizi ile tek arayüzey kayma mukavemet değerlerini karşılaştırmışlardır. 10 dakika büyütme süresine sahip karbon nanotüp kaplamasıyla yapılan kaynak numunesinin 39,2 MPa kayma gerilmesi sahip olduğunu görmüşlerdir. Büyütme süresinin 10 dakikadan fazla olduğu numunelerin kayma gerilmelerinin daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir [54].

Talbot ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada termoplastik kompozitlerin direnç kaynağını simüle etmek için iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) geçici ısı transfer sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. 2B model, ısıtma elemanının havaya maruz kalan alanlarının uzunluğunun (kenetleme mesafesi) kenarlardaki yerel aşırı ısınma üzerindeki etkisini ve giriş gücü seviyesinin kaynakların termal davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için kullanmışlardır. Sıkıştırma mesafesinin kontrol edilmesinin, kaynağın ısıl homojenliğini iyileştirdiğini ve tabakaların uzunluğu boyunca ısı iletiminin kaynak arayüzünün termal homojenliğini etkilediğini göstermişlerdir. İstenmeyen kenar etkisini en aza indirmek ve tam bir kaynak elde etmek için gerekli koşulları tanımlamak amacıyla optimum kenetleme mesafesini hesaplayan bir optimizasyon şeması geliştirmişlerdir. 3B modelin doğrulanması için APC-2/AS4 PEEK termoplastik kompozit malzemelerin farklı kenetleme mesafelerinde kaynaklama işlemlerini yapıp bindirmeli kesme mukavemet değerlerini karşılaştırmışlardır [55].

Zhang ve ark. (2021), cam elyaf takviyeli polipropilen (GF/PP) termoplastik kompozitlerin birleştirilmesindeki direnç kaynağının optimizasyonu için kaynak akımı, süresi ve basıncı dahil olmak üzere proses kontrol parametrelerinin etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. GF/PP termoplastik kompozitlerin birleştirilmesi için direnç kaynak işlemine uygun, kendi tasarımları olan bir direnç kaynak ekipmanını imal etmişlerdir. GF/PP tabakalarını, sıcak pres kullanılarak imal ederek ve mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalarda kaynak akımı, kaynak basıncı ve kaynak süresini değişken parametreler olarak belirlemişlerdir.

Kaynak kalitesini etkileyen ana etken parametreyi belirlemek için çekme ve kesme deneyleri, sinyal ve gürültü analizi (S/N) ve varyans analizine dayalı olarak polimerlerin bindirmeli kesme mukavemet (LSS) değerlerine bakmışlardır ve ana etken parametreni tayini için Taguchi yöntemini yaklaşımını kullanmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda direnç kaynağı kalitesini etkileyen ana faktörün akım olduğunu saptamışlardır. Optimum işlem parametreleri olarak 12,5 A akım, 2,5 MPa basınç ve 540 saniye kaynak süresi olduğunu tespit edip optimum parametrelerde yapılan kaynak işleminde bindirmeli kesme mukavemeti değerinin 12,186 MPa olduğunu görmüşlerdir [56].

Eveno ve ark. (1988), tek yönlü grafit (AS4) takviyeli polietereterketon (PEEK) kompozit plakaların direnç kaynağı ile birleştirilmesini deneysel olarak incelenmişlerdir. Kaynak sırasında ısıtma elemanı olarak Solvay firmasının geliştirdiği ve bir polietereterketon polimerinden oluşan termoplastik kompozit malzeme kullanmışlardır. Kaynak arayüzündeki sıcaklık ve zamana karşı konsolidasyon basıncını izleyerek ve kaynak prosesi hakkında bilgi vermişlerdir. Kaynaklı yüzey alanının kapsamı ile güç, enerji ve eriyikte geçen süre gibi işlem parametreleri arasında güçlü bir ilişki göstermişlerdir. Kaynaklı yüzeyin kalitesini, ultrasonik tahribatsız muayene teknikleri kullanılarak incelemişlerdir. Yaptıkların deneysel çalışmaların sonucunda, düşük kaynak akımı ve uzun kaynak süresiyle yapılan kaynak işlemlerinin homojen sıcaklık dağılımı sağladığı için daha kaliteli kaynaklar sağladığını tespit etmişlerdir [57].

Zammar ve ark. (2017), termoplastik malzemelerin sürekli direnç kaynağı işlemi için 3 boyutlu model oluşturmuşlardır. Oluşturdukları model ile hem elektrostatik fiziğini hem de proseste mevcut olan ısı transferini belirgin ve ayrıntılı bir şekilde birleştirmişlerdir. Elektrostatik model ile deneysel ölçümler arasında %5'ten daha az hata tespit etmişlerdir. Kaynak sırasındaki akımdaki eğilimi, deneylerde var olan akım tepe noktalarını gösteren modelle doğru bir şekilde yeniden düzenlemişlerdir. Modelin ısı transferi tarafında, karşılaştırılan kilit noktalarda model ile yaptıkları deneyler arasında %10'dan az hata tespit etmişlerdir. Oluşturdukları model ile yaptıkları deneysel çalışmalar arasındaki kurdukları doğrulamayla sürekli direnç kaynağında optimum kaynak parametrelerini hesaplayan bir öneri sunmuşlardır [58].

Ageorges ve ark. (1999), karbon ve cam elyaf takviyeli polieterimid (PEI) tabakaların direnç kaynağına ilişkin kapsamlı bir deneysel araştırma sunmuşlardır. Bindirmeli kesme ve çift konsol giriş deneylerine göre tasarlanan termoplastik numunelere, kumaş ve tek yönlü ısıtma elemanları kullanılarak direnç kaynağı yapmışlardır. Isıtma elemanlarının direncinin istatistiksel dağılımı karakterize ederek ve sıcaklığın ısıtma elemanı direnci üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Mekanik temas basıncının temas direnci üzerindeki etkisini de araştırmışlardır. Direnç kaynağındaki ana proses parametrelerinden biri olan güç yoğunluğunu ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Isıtma elemanlarındaki ısıtma homojenliğini, kumaş ve tek yönlü ısıtma elemanları arasındaki karşılaştırmayı termal görüntüleme yardımıyla değerlendirmişlerdir. Sıcaklık geçmişleri ölçülerek ve üç boyutlu bir geçici ısı transferi sonlu eleman modeli tarafından simüle edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Bindirmeli kesme testi yapılan numunelerden tek yönlü ısıtma elemanının direnç değeri 0,84 ohm kumaş ısıtma elemanının direnç değerini 0,97 olarak ölçmüşlerdir. Karbon elyaf/PEI plakaları birleştirirken ısıtma elemanı ile arasında bir cam elyafı/PEI ara katmanı kullanılması ile uygun elektrik yalıtımının sağlandığını ve akım sızıntısının etkili bir şekilde ortadan kaldırdığını gözlemlemişlerdir [59].

Ageorges ve ark. (2000), yaptıkları bir başka çalışmada ise, karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli polieterimid plakaların direnç kaynağına ilişkin bir başka deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Maksimum bindirmeli kesme mukavemeti kriterine dayalı olarak optimum direnç kaynağı süresi belirlemişlerdir. Kaynak basıncının bindirmeli kesme mukavemeti üzerindeki etkisi araştırarak ve kaynaklı birleştirmede elde edilen konsolidasyon kalitesini işleme koşullarıyla ilişkilendirmişlerdir. Optimum kaynak basıncının 0,5 MPa olarak belirleyerek kaynak sırasında meydana gelen akışın derecesi veya kaynaklı birleştirmelerin kalınlığındaki azalmanın bindirmeli kesme mukavemeti ile ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Ara yüzey hatası, ısıtma elemanının kohezif hatası, ısıtma elemanının yırtılması ve plakaların yırtılması dahil olmak üzere farklı bindirme kesme mukavemeti değerlerine yol açan dört hata mekanizmasını tanımlamışlardır. Kumaş ve tek yönlü ısıtma elemanları arasında bindirme kayma mukavemeti ve tabakalar arası kırılma tokluğu (G_{1c}) açısından bir karşılaştırma yapmışlardır. Büyük ölçekli bindirmeli kesme kuponlarının ve çift konsol giriş numunelerinin, plakalara akım sızmasının önlenmesi koşuluyla direnç kaynağı yapılabileceği göstermişlerdir. Maksimum bindirmeli kesme mukavemetini veren kaynak süresini, tek yönlü ısıtma elemanları ile kaynaklanmış CF/PEI numuneleri için belirlemişlerdir.

Çok uzun kaynak sürelerinin ve/veya çok yüksek güç seviyelerinin plakaların birkaç katmanını etkileyen kayda değer bir dekonsolidasyona ve düşük bindirmeli kesme mukavemetine sahip kaynak arayüzüne neden olduğunu tespit etmişlerdir. Basınçlı kalıplama işlemiyle üretilen numunelerin tek yönlü bir takviye eleman kullanılması yerine kumaş takviye kullanılmasının, bindirmeli kesme mukavemetini %17 ve tabakalar arası kırılma tokluğunu %69 iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Benzer şekilde, kumaş ısıtma elemanları kullanılarak yapılan kaynak numunelerinin, tek yönlü ısıtma elemanları kullanılarak yapılanlara göre daha yüksek bir bindirmeli kesme mukavemeti değerinde %69 ve tabakalar arası kırılma tokluğu değerinde de %179'a kadar iyileştirme sağlamıştır. Ek olarak, dirençli kaynak için kumaş ısıtma elemanlarının kullanılması, kaynak süresinin uzattığını saptamışlardır [60].

Russelo ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada direnç kaynağında polietereketon (PEEK) polimer malzemesinin ısıtılması için ısıtma elemanı olarak karbon nanotüp kullanmışlardır. Karbon nanotüplerin boyutlarını her katmanı 50 nm olarak tercih etmişlerdir. Karbon nanotüplerin iki yüzeyine de esnek bir yapı oluşturmak için PEEK malzemesinden film yapılar eklemişlerdir. En iyi sonuçlara ulaştıkları kaynak parametrelerinin özgül güç değeri 55 kW/m^2 , özgül enerji değerinin 8250 kJ/m^2 ve konsolidasyon basıncının 4 MPa olduğunu gözlemlemişlerdir. Optimum kaynak parametreleriyle yapılan kaynak numunelerinin 95 ± 3 MPa mukavemet değerine sahip olduğunu %96'lık bir kaynak verimliliğine sahip olduğunu yaptıkları fraktografik analiz yöntemleriyle gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda karbon nanotüplerin, ultra ince ve oldukça esnek olması nedeniyle karmaşık şekilli bağlantı yüzeylerine ısıtma elemanı olarak uyum sağlayabileceğini tespit etmişlerdir [61].

Dube ve ark. (2007), yaptıkları araştırmada, akım sızıntısını önlemek için seramik kaplı (TiO_2) paslanmaz çelik ısıtma elemanından oluşan elektriksel olarak yalıtılmış yeni bir ısıtma elemanı geliştirilmişlerdir. Kabuk/kiriş konfigürasyonu olarak adlandırılan özel numune geometrisini, havacılık yapılarını temsil etmek için yeni geliştirilen ısıtma elemanı ile kaynaklamışlardır. Termoplastik kompozit malzeme olarak APC-2/AS4 (karbon elyaf/PEEK) kullanmışlardır. En kritik durumu temsil eden tek yönlü numuneleri ilk olarak yeni ısıtma elemanı kullanılarak kaynaklamışlardır.

Yeni yalıtımlı ısıtma elemanları ve geleneksel (yalıtılmamış) ısıtma elemanları kullanılarak kaynatılan yarı-izotropik numunelerin mekanik performanslarını, kısa kiriş ve üç noktalı eğme testleri kullanarak karşılaştırmışlardır. Yalıtılmış ısıtma elemanının, akım sızıntısını başarıyla engellediğini ve kaynak alanı üzerinde sıcaklık homojenliğinde büyük gelişme gösterdiğini tespit etmişlerdir [62].

Hou ve ark. (1999), yaptıkları çalışmada direnç kaynağında karbon elyaf kumaş takviyeli polieterimid kompozit plakaların birleştirilmesi için alternatif bir ısıtma elemanı olarak bir cam elyaf takviyeli polieterimid kullanmışlardır. Yapışma yüzeyinde metal ısıtma elemanı ile daha homojen bir sıcaklık dağılımı oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Isıtıcı eleman ile yapıştırılan plakalar arasında elektrik yalıtkanı olarak cam elyaf kumaşla güçlendirilmiş PEI (GF/PEI) kullanılmışlardır. Deneysel sonuçlar ile GF/PEI kompozit malzemesinin akım sızıntısını etkili bir şekilde önleyebildiğini ve kaynak alanını genişletebildiğini gözlemlemişlerdir. Giriş gücü seviyesi, kaynak süresi ve basıncı gibi kaynak parametrelerini, mekanik ve mikroyapı karakterizasyon sonuçlarına göre optimize etmişlerdir. Deneysel sonuçlar ile CF/PEI plakaların metal ısıtma elemanları kullanılarak tatmin edici bir şekilde birleştirilebileceğini ve elde edilen maksimum bindirmeli kesme mukavemetinin, sıkıştırma kalıplı numunelerinkine eşdeğer olduğunu tespit etmişlerdir. CF/PEI ısıtma elemanları ile karşılaştırıldığında, metal örgülü ısıtma elemanlarının daha büyük bir işleme penceresi sağladığını gözlemlemişlerdir. Isıtma elemanının veya plakaların yüzeyinde bir yalıtım tabakasının kullanılmasının, akım sızıntısını önlemede etkili bir yöntem olduğu kanıtlayarak ve geniş kaynak alanlı numuneleri birleştirmek için kullanılabilirliğini ispatlamışlardır [63].

Dube ve ark. (2012), metal örgülü ısıtma elemanı boyutunun termoplastik kompozitlerin direnç kaynağı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada, direnç kaynağı yapılacak malzeme olarak karbon elyaf takviyeli polieterketonketon (CF/PEKK), karbon elyaf takviyeli polieterimid (CF/PEI) ve cam elyaf takviyeli PEI (GF/PEI) kompozit malzemelerini seçmişlerdir. Isıtma elemanları olarak 0,152, 0,104, 0,089, 0,043 örgü aralığına sahip dört farklı metal ağ boyutu kullanmışlardır. Tel çapının ve açık boşluk genişliğinin kaynak kalitesi ve performansı üzerinde büyük etkisi olduğu belirleyerek 0,041 mm tel çapına ve 0,089 mm örgü aralığına sahip ısıtma elemanının test edilen tüm malzemeler için en iyi mekanik performansı sağladığını tespit etmişlerdir.

Optimum ısıtma elemanı boyutu kullanılarak yapılan kaynaklarda CF/PEKK, CF/PEI ve GF/PEI numuneleri için sırasıyla 52, 47 ve 33 MPa'lık bindirmeli kesme mukavemeti değeri elde etmişlerdir. Örgü aralığı ile tel çapının oranının, bir metal ağ ısıtma elemanı boyutu seçilirken dikkate alınması gereken en önemli parametre olduğunu göstermişlerdir. CF/PEKK ve CF/PEI numunelerinin bindirmeli kesme mukavemet değerlerinin yakın olmasına rağmen farklı mekanik davranışlar gösterdiğini gözlemlemişlerdir. CF/PEI ve GF/PEI numunelerinin, doğrusal bir yük-yer değiştirme eğrisi altında kırılma davranış gösterdiğini tespit etmişlerdir. CF/PEKK numunelerinin, tamamen kopmasından önce doğrusal olmayan bir davranış ve daha fazla süneklik gösterdiğini belirlemişlerdir. Yaptıkları taramalı elektron mikroskobu (SEM) gözlemleri ile paslanmaz çelik ısıtma elemanları ve polimerler arasında yapışma eksikliğinin olduğunu gözlemlemişlerdir [64].

Jakobsen ve ark. (1989), yaptıkları çalışmada yarı kristal termoplastik kompozitler için dirençli kaynak işleminin geçici bir iki boyutlu anizotropik ısı transferi analizini geliştirerek ve deneysel araştırmalarla karşılaştırmışlardır. Direnç kaynağı işleminin parametrik bir çalışması için kritik işlem ve malzeme parametrelerini tanımlamışlardır. Isıtma elemanlarının öz direncindeki değişkenliğin ve kalıptaki ısı kaybının işlem süresi üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu tespit edilerek ayrıca sonuçlardaki hatayı en aza indirmek amacıyla ısıtma elemanlarının kalitesinden emin olmak için tahribatsız muayene yapılmıştır. Isıtma elemanından saniyede alan başına üretilen ısıyı, kaynak işlemine güç girişinin bir ölçüsü olarak tanıtmışlardır. Uzunluk başına voltaj veya genişlik başına akım gibi proses parametrelerini belirlemenin kolay bir yolunu sunan bir grafik oluşturulmuştur. Eritmek için teorik bir süre tanımlayarak ve deneysel verilerle doğrulama sağlamışlardır. Oluşturdukları modeli doğrulamak amacıyla, tek yönlü grafit takviyeli polietereterketon kompozit malzemelerini çift konsol kiriş numunelerinin Mod I kırılma tokluğu testlerini yapmışlardır [65].

Yuan ve ark. (2001), yaptıkları çalışmada basınçlı kalıplama yöntemiyle üretilen cam elyaf takviyeli polieterimid iki katman arasına yerleştirilen sandviç yapılı ısıtma elemanı kullanarak karbon elyaf takviyeli polieterimid termoplastik kompozit malzemesi kullanılarak direnç kaynağı ile birleştirmesini yapmışlardır. Üç noktalı eğilme ve Charpy darbe testleri gerçekleştirerek ve deney sonucu olarak ısıtma elemanının bitişik katmanlarında delaminasyon meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Dekonsolidasyondan kaynaklı delaminasyon kusurlarının yüksek basınç kullanılmasıyla çözülebileceğini ağırlık düşürme darbe testlerinin sonuçlarıyla artan tutma basıncının kaynaklı plakaların delaminasyon alanının azaldığını görerek tespit etmişlerdir. Ayrıca kaynak basıncının artırılmasıyla kaynaklı plakaların eğilme mukavemetinin ve eğilme modülünün arttığını gözlemlemişlerdir [66].

Colak ve ark. (2002), yaptıkları çalışmada termoplastik kompozitler için direnç kaynağı proses modellemesi gerçekleştirmişlerdir. Isı transferi, bozunma kinetiği ve konsolidasyon modelleri geliştirerek kontrol edilebilir proses parametrelerinin uygulanabilir aralıkları olarak tanımlanan proses penceresini oluşturmuşlardır. Proses parametrelerini belirlemek için Nelder-Mead adı verilen optimizasyon yöntemi kullanmışlardır. Bu sayede kaynaklı birleştirmenin istenen kalitede ve minimum işlem süresiyle sonuçlanmasını sağlamışlardır. APC-2 PEEK termoplastik kompozitlerin farklı kalınlıkları için optimum işlem parametreleri ve işlem parametrelerine karşılık gelen kaynak sürelerini bulmuşlardır. APC-2 plakaların kalınlığının arttıkça güç gereksiniminin azaldığı ve kaynak süreleri kısaldığını tespit etmişlerdir. Yalıtım malzemesinin kalınlığının kaynak süresini etkilediğini saptamışlardır [67].

Bates ve ark. (2009), yaptıkları çalışmada ısıtma elemanı olarak paslanmaz çelik ağ kullanılarak uzun süreli cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerine direnç kaynağını deneysel olarak araştırmışlardır. Kaynak süresi, kaynak basıncı ve elektrik akımı gibi işleme parametrelerinin kesme mukavemeti ve erime üzerindeki etkilerini, yeni bir sıkıştırma kesme testini kullanarak değerlendirmişlerdir. Optimize edilen işleme koşulları altında 17–20 MPa kesme mukavemet değerine ulaşılabildiğini tespit etmişlerdir. Sürekli cam elyaf oranının %60'tan 70'e çıkarılmasıyla kaynaklı numunenin kesme mukavemetinin %15 düştüğünü gözlemlemişlerdir. Yüksek mukavemetli kaynaklar, yüksek derecede tabakalar arası başarısızlık ile karakterize edildi. Dört farklı erime süresi profilini incelemişlerdir. Kaynak bölgesine ısı çiftleri eklenerek farklı akımlardaki sıcaklık-zaman geçişini ölçmüşlerdir. Deneysel sıcaklıkları tahmin etmek için basitleştirilmiş bir analitik ısı transfer modeli kullanmışlardır. İşleme parametrelerini hem kesme mukavemeti hem de erime ile ilişkilendirmek için ampirik modeller geliştirmişlerdir. Geliştirilen iki farklı modeli deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır [68].

Barbosa ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada çift yönlü cam elyaf (GF) kumaşlarla güçlendirilmiş polifenilen sülfid (PPS) laminatların direnç kaynağı ile elde edilen birleştirmeleri fraktografik analizlerle incelenmişlerdir. Kaynaklı bağlantıları, oda sıcaklığında bindirmeli kesme yükü altında test etmişlerdir. Kırılan yüzeyler taramalı elektron mikroskopu (SEM) tekniği ile analiz etmişlerdir. İncelenen kırılma yüzeylerinin fraktografik yönlerini, matris/ısıtma elemanının arayüzey yapışmasının, iç tabakalar ve arayüzey hatalarının varlığıyla verimli olduğunu göstermişlerdir. İç tabaka hatalarını, daha yüksek kayma mukavemeti değerlerine (9,6 MPa) sahip plakalarda ara yüzey kırılmalarını ise daha düşük kayma mukavemeti değerlerine (1,9 MPa) sahip plakalarda gözlemlemişlerdir. Kaynaklı bağlantılar için ölçülen mekanik performans değerlerinin, kaynak bölgesindeki polimer zincirlerinin interdifüzyon mekanizmasına ve ısıtma elemanı ile polimer arasındaki bağlantının etkinliğine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir [69].

Panneerselvam ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli polipropilen termoplastik kompozit plakaların direnç kaynağı için optimum parametrelerin belirlenmesi amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kompozitler üzerindeki birleştirme denemelerini, zaman ve maliyet deneysel çalışmaları azaltmak amacıyla Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Proses parametrelerinin katkı yüzdesini bulmak için kullanılan ANOVA istatistiksel tekniğiyle kaynak akımının %75,113 ile en yüksek katkıya sahip olduğunu, kaynak süresinin %20,406 ve kaynak basıncının %0,417 etkilediğini tespit etmişlerdir. Taguchi yöntemiyle kaynak akımı olarak 30 A, kaynak basınç değeri olarak 0,8 MPa ve kaynak süresi olarak 30 saniye değerlerinin optimum kaynak parametresi olduğunu gözlemlemişlerdir. Optimum kaynak parametreleriyle yapılan kaynak numunelerinin 8,832 MPa bindirmeli kesme mukavemetine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Numuneler mikroskobik olarak analiz edilerek termoplastik kompozitlerin ısıtma elemanı ile entegrasyonun iyi olduğunu gözlemlemişlerdir [70].

Koutras ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada sıcaklığa maruz kalmanın cam elyaf takviyeli direnç kaynağıyla birleştirilen polifenilen sülfid (GF/PPS) malzemesinin mukavemeti üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Cam elyaf polifenilen sülfid (GF/PPS) plakalarını, direnç kaynağı tekniği ve paslanmaz çelik ısıtma elemanı kaynaklamışlardır. Kaynaklı bağlantıların mukavemetini değerlendirmek için numunelere 20 ile 150 °C arasındaki sıcaklıklarda tek bindirmeli kesme testleri yapmışlardır. Yüksek sıcaklıklarda hata mekanizmalarındaki değişiklikleri araştırmak için fraktografi kullanmışlardır.

Yapılan deney sonuçları ile 90 °C'ye kadar sıcaklıklarda test edilen numuneler için %10-15'lik bir mukavemet azalması ve 120 °C ve 150 °C'de test edilen numuneler için sırasıyla %22 ve %38'lik bir mukavemet azalması gözlemlenmiştir. 90 °C üzerinde yüksek miktarda mukavemet azalmasının nedeninin PPS malzemesinin 85 °C üzerinde termal genişleme katsayısının iki katına çıkmasıyla yüksek sıcaklıklar matris sertleşmesindeki azalmanın neden olduğunu tespit etmişlerdir [71].

Rohart ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada direnç kaynağı kullanılarak birleştirilmesi yapılan karbon elyaf takviyeli polifenilen sülfid (CF/PPS) malzemesinin bindirmeli kayma mukavemeti (LSS) üzerindeki sıcaklık ve nemin etkisini araştırmışlardır. Kaynaklı numuneleri, çeşitli sıcaklık ve nem seviyelerinde şartlandırarak ve 21 ile 150 °C arasındaki sıcaklıklarda test etmişlerdir. 82 °C'de test edilen numunelerin, oda sıcaklığında test edilen numunelerin bindirmeli kesme mukavemet değerine göre %26, camsı geçiş sıcaklığın yaklaşık olarak 60 °C üzerinde test edilen numunelerin mukavemet değerinde %61 azalma olduğunu gözlemlenmiştir. Test sıcaklığında 21 ile 150 °C arasındaki artış mukavemet değerinde doğrusal azalışa neden olduğunu tespit ederek PPS'nin yarı kristal yapısı ve su emilimine karşı iyi direnci nedeniyle nemin mukavemet değeri üzerinde neredeyse etkisi olmadığını saptamışlardır. Bu sonuca göre, PPS malzemesinin havacılık sınıfı epoksi matrisli kompozitlere göre çok az su emdiğini gözlemlenmemişlerdir [72].

Brassard ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada, termoplastik kompozit malzemelerin direnç kaynağı için yeni bir ısıtma elemanı önermişlerdir. Bu ısıtma elemanını, ağırlıkça %10 çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) eklenmesiyle elektriksel olarak iletken hale getirilen polieterimidden (PEI) oluşturmuşlardır. Yeni ısıtma elemanı, karbon elyaf takviyeli polietereter keton (CF/PEEK) plakaların kaynağını yapmak için kullanmışlardır. Numunelerin boyutlandırılmasını bindirmeli kesme testine göre üretmişlerdir. Yapılan kaynak numunelerinde maksimum 19,6 MPa bindirmeli kesme mukavemetine sahip numuneler gözlemlenmiştir. Kırılma yüzeylerinin gözlemlerinde, üniform olmayan bir ısı dağılımı olduğunu tespit etmişlerdir. Isıtma elemanının tokluk değerinin geliştirilmesi gerektiğini saptamışlardır [73].

Du ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada, cam elyaf takviyeli polipropilen (GF/PP) iki katman arasına metal ağ yerleştirerek yeni bir ısıtma elemanı kullanarak cam sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen malzemelerinin kaynağını yapmışlardır.

Kaynaklanmış numuneler üzerinde zaman, kaynak basıncı ve kaynak akımının etkilerini incelemişlerdir. Proses parametreleri ile numunelerin mekanik özellikleri arasında cevap yüzeyi yöntemi (RSM) kullanarak ilişki kurmuşlardır. (2) Bindirmeli bağlantı alanının şekline göre işlem parametrelerinin optimizasyon aralığını belirlemişlerdir. Proses parametrelerinin katkısını bulmak için ortogonal test yöntemini kullanmışlardır. Kaynak akımının %76,2, zamanın %23,8 ve basıncın %0,0088 kaynak parametreleri üzerinde etkinliğinin olduğunu tespit etmişlerdir. Optimum direnç kaynağı prosesi parametreleri altında birleştirilmesi yapılan kaynak numunelerinin, sıcak preslemeyle üretilen numunelerin eğilme mukavemetlerini karşılaştırdıklarında %31'lik mukavemet artışı olduğunu gözlemlemişlerdir [74].

Xiong ve ark. (2020), cam elyaf takviyeli polietermid (GF/PEI) ile titanyum alaşımı malzemelerin hibrit kaynakla birleştirilmesiyle ilgili çalışma yapmışlardır. Isıtma elemanı olarak paslanmaz çelik örgü malzemesi etrafına iki katman cam takviyeli polieterimid ve iki katmanda saf polieterimid malzemesinden oluşan sandviç yapıya sahip malzemeyi kullanmışlardır. Kaynak işlemi yapılacak titanyum alaşımı malzemeye alevle büyüyen karbon nanotüp kaplaması yapmışlardır. Numuneler farklı kaynak süresinde kaynaklanmışlardır. Kaynaklanmış numunelerin tek bindirmeli kesme mukavemeti değerlerine bakıldığında kaynak süresinin artmasıyla mukavemetin önce arttığı sonra ise aşırı ısı birikiminden kaynaklı oluşan termal bozulmalardan dolayı mukavemet değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Karbon nanotüp eklenen numunelerin bindirmeli kesme mukavemeti değerlerinin, karbon nanotüp eklenmeyen numunelere göre %146 fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun sebebi olarak alevle büyüyen karbon nanotüplerle kaplama yapılan titanyum alaşımının hidrofob yapıdan hidrofob yapıya dönerek ısıtma elemanı ile kompozit malzemeler arasında katmanlar arasındaki bağı güçlendirdiğini görmüşlerdir. Numunelerin hata modlarına bakıldığında, kaynak süresinin artmasıyla delaminasyon oluştuğunu tespit etmişlerdir [75].

Bu tez çalışmasında farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanları (33, 45, 61, 91, 109 ve 154 μm) ile PPS matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler farklı akım değerlerinde direnç kaynağında birleştirilmiştir. Kullanılan ısıtma elemanlarının tel karakterizasyon çalışmaları deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile yapılmıştır.

Kaynak yapılan numunelerin bindirmeli kesme dayanımı ve tabakalar arası kırılma tokluğu incelenmiştir. Mikroskop görüntüleri ve DSC analizi ile elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kaynak numuneleri TORAY firmasından temin edilen TC1100 PPS matrisli karbon elyaf takviyeli malzeme kullanılarak hazırlanmıştır. Bu malzeme, PPS matrisi içerisinde 24 kat serili karbon elyaf ve en üst ile en alt katmanında cam elyaftan oluşmaktadır. PPS matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit numune hakkında genel bilgiler Çizelge 4.1’de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. Numune malzemesinin özellikleri.

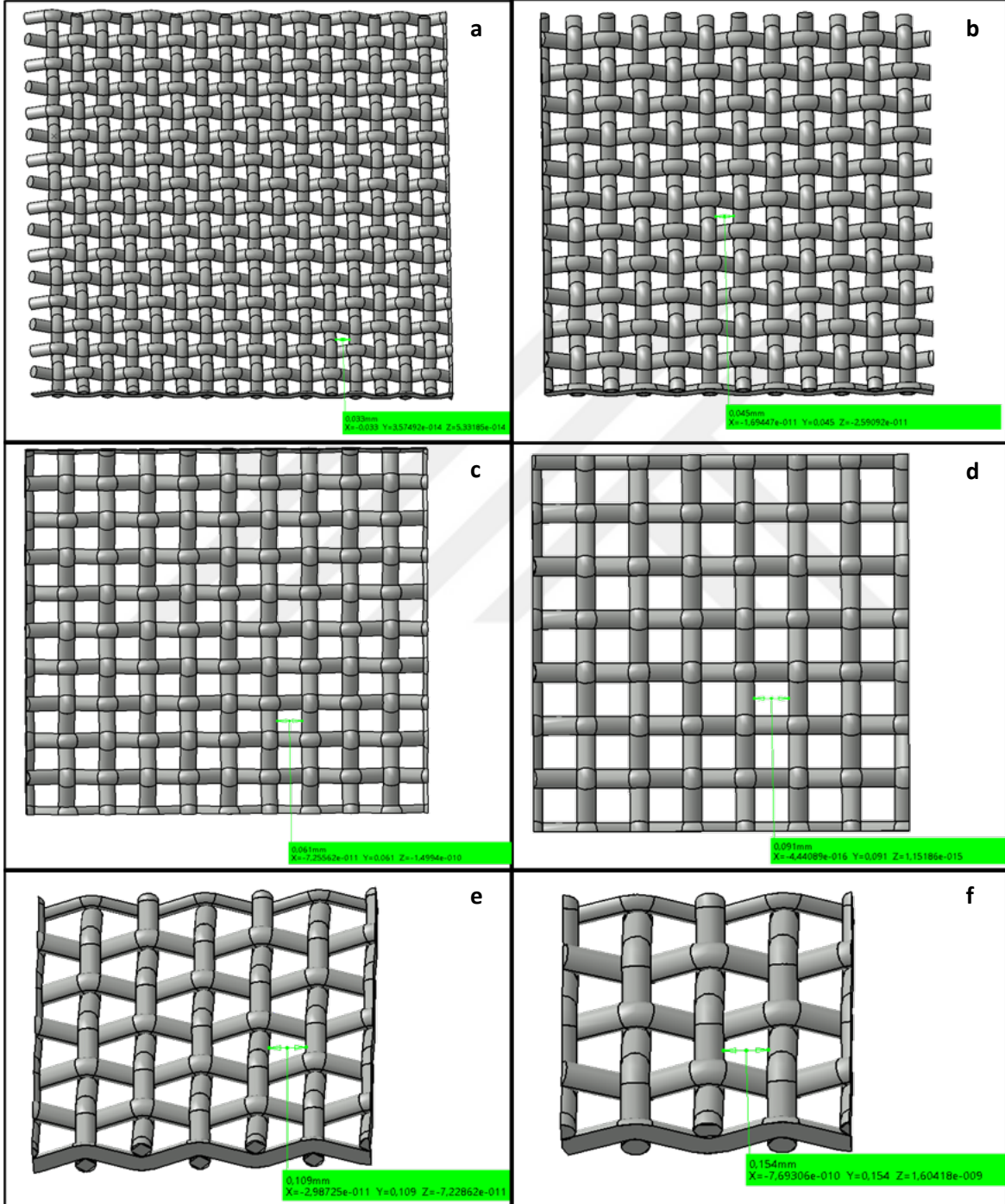
Kütlece reçine oranı (karbon elyaf)	43%
Konsolide katman kalınlığı	0,23 mm
Yoğunluk	1,55 g/cm ³
T _g (Camsı geçiş sıcaklığı)	90°C
T _m (Erime sıcaklığı)	280°C
T _p (İşleme sıcaklığı)	300-330°C

Deneysel çalışma sırasında PPS matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerinin direnç kaynağı ile birleştirilmesi için 6 farklı örgü aralığına sahip paslanmaz çelik malzemesinden üretilen ısıtma elemanları kullanılmıştır. Malzemeler Pas Teknik firmasından temin edilmiştir. Isıtma elemanları ile ilgili detaylı bilgiler Çizelge 4.2’de detaylı olarak özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. Isıtma elemanları ile ilgili detaylı bilgiler.

Örgü Aralığı (Mikron)	Ağ Sayısı (/1in ²)	Tel Çapı (mm)	Boşluk Oranı
33	500	0,03	%27
45	300	0,04	%28
61	250	0,04	%36
91	180	0,05	%42
109	150	0,06	%42
154	100	0,1	%37

Isıtma elemanlarının farklı örgü aralıklarına göre $1 \times 1 \text{ mm}^2$ uzunluğundaki modelleri Şekil 4.1'de yer almaktadır. Örgü aralığı iki tel arası mesafeyi ifade etmektedir. Ağ sayısı 1 inç² de yer alan ağ sayısıdır. Boşluk oranı iste 1 inç² de yer alan hacimce boşluk miktarıdır.



Şekil 4.1. Farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının $1 \times 1 \text{ mm}^2$ uzunluğundaki ısıtma elemanlarının modeli a) 33 µm b) 45 µm c) 61 µm d) 91 µm e) 109 µm f) 154 µm.

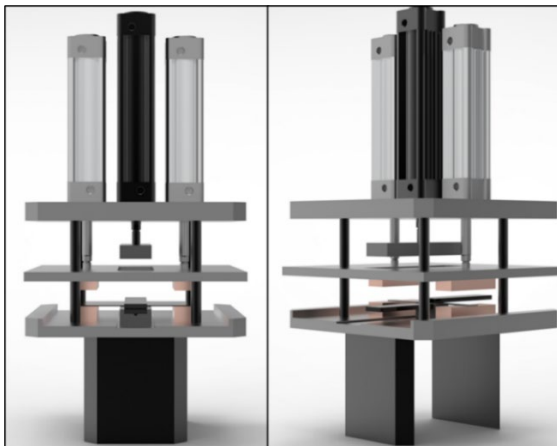
4.2. Direnç Kaynağı Düzeneğinin Tasarımı

Termoplastik matrisli numunelerin kaynak ile birleştirilmesi için yapılacak çalışmaya uygun olacak şekilde direnç kaynağı düzeneği tasarlanmıştır. Kaynak düzeneğinde Şekil 4.2’de temsili görüntüsü yer alan SORENSEN firmasından temin edilen DC programlanabilir SGX50X200D-1DSAR modeli güç besleyici, güç besleyici vasıtasıyla verilen gücün ısıtma elemanlarına iletilmesi amacıyla bakır kütükler, bakır kütükleri kenetlemek amacıyla sistemin yukarı aşağı hareket etmesini sağlayan Hidrokontrol A.Ş. firmasından temin edilen silindir çapı 32 mm ve mil çapı 100 mm boyutlarında pnömatik pistonlar yer almaktadır.



Şekil 4.2. Güç besleyici temsili görüntüsü.

Ayrıca numunelerin bindirmeli kesme testi ve çift konsol kiriş testinin yapılması için 2 adet farklı boyutlarda kalıp tasarımları yapılmıştır. Düzenekte, kaynak numunelerine kaynak sırasında baskı kuvveti vermek amacıyla 1 adet silindir çapı 32 mm ve mil çapı 120 mm ölçülerinde pnömatik piston yer almaktadır. Şekil 4.3’de tasarlanan kaynak düzeneğinin pistonlar açık durumdaki modeli yer almaktadır. Kaynak yapılacak kompozit malzemeler kalıp üzerine yerleştirilerek, kaynak yapılacak yüzey arasına ısıtma elemanları yerleştirilir.



Şekil 4.3. Pistonlar açık durumda kaynak düzeneğinin modeli.

Malzemeler yerleştirildikten sonra Şekil 4.4'te gösterildiği gibi pistonlar kapatılarak ısıtma elemanları bakır plakalar tarafından kenetlenir, kompozit malzemeler üzerine ise baskı plakası tarafından kuvvet verilir. Bakır plakalara g besleyici tarafından verilen akım ile ısıtma elemanlarının direncinin etkisiyle ısınır, kompozit malzemelere ısı transferi sağlanır. Isı transferi sağlanan kompozit malzemeler erir ve basınç altında birbiri arasında temas gerçekleşerek birleşme sağlanır. Malzemeler soğuduktan sonra kaynaklanan malzemeler baskı altından alınarak kompozit malzemelerin kaynak işlemi gerçekleştirilir.

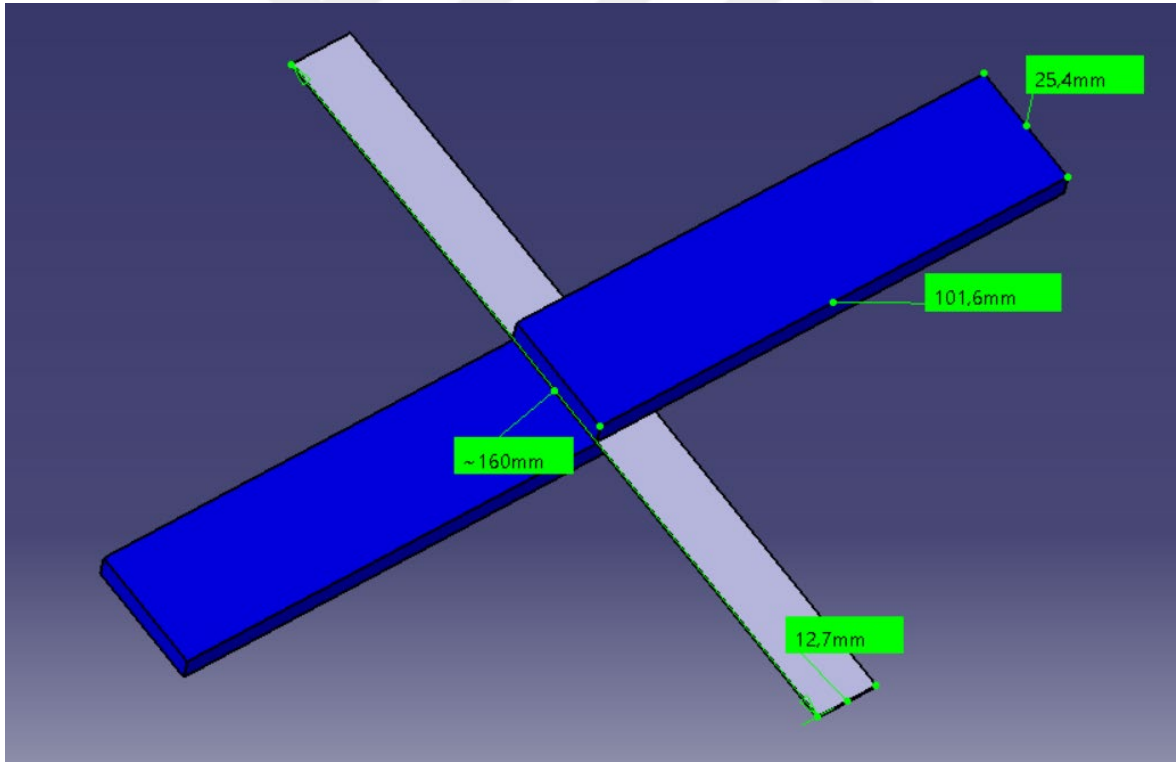


Şekil 4.4. Pistonlar kapalı durumda kaynak düzeneğinin modeli.

4.3. Mekanik Testler

4.3.1. Bindirmeli kesme testi

Bindirmeli kesme testi, birleştirme yapılan numunelerin kesme dayanımlarını belirlenmesi için yapılan bir test yöntemidir. Yapılan çalışma sırasında bindirmeli kesme testi ASTM D1002 standardında göre yapılmıştır. Standartta göre kaynak numuneleri 25,4 mm genişliğinde ve 101,6 mm uzunluğunda olmalıdır. Kaynak numunelerinin tavsiye edilen bindirme uzunluğu 12,7 mm'dir [76]. PPS matrisli kompozit plakadan standartta uygun olarak 25,4 mm genişliğinde ve 101,6 mm numune ölçülerinde su jetinde kesilmiştir. 6 farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanları standartta göre 12,7 mm genişliğinde ve tasarlanan düzeneğe uygun olarak 160 mm uzunluğunda kesilmiştir. Şekil 4.5'te LSS kaynak numunesi ve ısıtma elemanının ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5. LSS deney numuneleri ve ısıtma elemanlarının ölçüleri.

Yapılan deney çalışmasında 6 farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarına 2 farklı akım değerleri uygulanarak kaynak ile birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. LSS deney parametreleri.

Numune	Örgü aralığı (µm)	Akım (A)	Güç (Watt)	Joule Heating (kJ)	Birim Alana Düşen Güç Miktarı (kW/m ²)
1	33	11	330,46	19,83	162,63
2	33	12	361,58	21,69	177,94
3	45	16,5	335,25	20,12	164,99
4	45	18	366,08	21,96	180,16
5	61	13,2	334,79	20,09	164,76
6	61	14,4	367,05	22,02	180,63
7	91	14,3	335,98	20,16	165,34
8	91	15,6	362,12	21,73	178,21
9	109	13,2	337,59	20,26	166,14
10	109	14,4	366,41	21,98	180,32
11	154	19,8	330,57	19,83	162,68
12	154	21,6	363,03	21,78	178,66

Numuneler standarda göre 5'er tekrar olacak şekilde toplam 60 adet kaynak yapılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 4.6'da yer almaktadır. Kaynak yapılan numunelerin deney düzeneğine takıldığı yüzeylere yüklerin deney sırasında doğrusal bir şekilde akmasını sağlamak amacıyla metal malzemeler yapıştırılmıştır.



Şekil 4.6. LSS deney numuneleri.

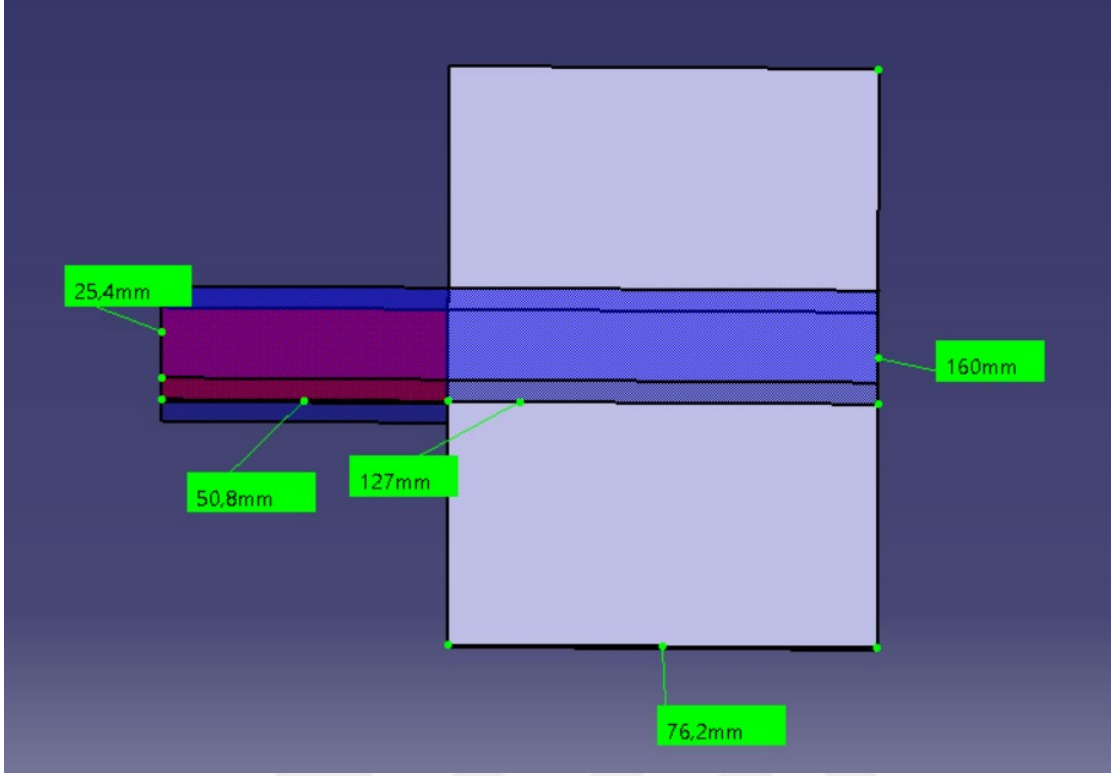
Deneysel çalışmalar Shimadzu 100 kN hidrolik çekme tezgahında yapılmıştır. Tezgâhın görüntüsü Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Bindirmeli kesme test tezgâhı görseli.

4.3.2. Çift konsol kiriş testi (DCB)

Çift konsol kiriş testi yapılan çalışma sırasında bindirmeli kesme testi ASTM D5528 standardında göre yapılmıştır. Standarda göre kaynak numuneleri 25,4 mm genişliğinde ve 127 mm uzunluğunda olmalıdır. Kaynak numunelerinin tavsiye edilen bindirme uzunluğu 76,2 mm’dir. PPS matrisli kompozit plakadan standarda uygun olarak 25,4 mm genişliğinde ve 127 mm numune ölçülerinde su jetinde kesilmiştir. 6 farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanları 76,2 mm genişliğinde 160 mm uzunluğunda kesilmiştir. Numune üzerinde kaynak yapılmayan yüzeye PTFE (Teflon) film yapıştırılmıştır. Şekil 4.8’de DCB kaynak numunesi ve ısıtma elemanının ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.8. DCB kaynak numunesi ve ısıtma elemanı.

Yapılan deney çalışmasında 6 farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarına 2 farklı akım değerleri uygulanarak kaynak ile birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Numuneler standarda göre 5'er tekrar olacak şekilde toplam 60 adet kaynak yapılmıştır. Test için INSTRON 10 kN üniversal test tezgâhı kullanılmıştır. Çift konsol kiriş testiyle ilgili görsel Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. DCB deney parametreleri.

Numune	Örgü aralığı (µm)	Akım (A)	Joule Heating (kJ)	Tekrar Sayısı
1	33	48	118,97	5
2	33	56	130,17	5
3	45	60	120,69	5
4	45	70	131,79	5
5	61	60	120,52	5
6	61	70	132,14	5
7	91	67,2	120,95	5
8	91	78,4	130,36	5
9	109	60	121,53	5
10	109	70	131,91	5
11	154	84	119,01	5
12	154	96	130,69	5



Şekil 4.9. Çift konsol kiriş testinden bir görsel.

Çift konsol kiriş testi ASTM D5528'e göre iki farklı testi içermektedir ve bunlar ön çatlak ile çatlak ilerlemesinin gözlemlenmesidir. Numuneler kaynak başlangıcından 1'er mm aralıklarla toplam 5 mm uzunluğa ulaşıncaya kadar markalanmıştır.

Bu markalamanın amacı ön çatlakın görülmesini sağlamaktır. Test sırasında uygulanan kuvvet ile birlikte kaynak yüzeyindeki her 1 mm ayrılmada yer değiştirme ve kuvvet değeri alınmıştır. Çatlak 5 mm'ye geldikten sonra ön çatlak testi bitirilmiştir.

Numuneler daha sonra 5 mm uzunluktan 45 mm uzunluğa kadar 5'er mm aralıklarla markalanmıştır. Bu markalamanın amacı çatlak ilerlemesinin görülmesini sağlamaktır. Test sırasında uygulanan kuvvet ile birlikte kaynak yüzeyindeki her 5 mm ayrılmada yer değiştirme ve kuvvet değeri alınmıştır. Çatlak 5 mm'ye geldikten sonra çatlak ilerlemesi testi bitirilmiştir. Denklem 2'de çift konsol kiriş testi sonucunda elde edilen verilerle tabakalar arası tokluk değerinin hesaplandığı formül yer almaktadır.

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (4.1)$$

G_{IC} : Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu

P : Kuvvet (N)

δ : Yük noktasındaki yer değiştirme

b : Numune genişliği

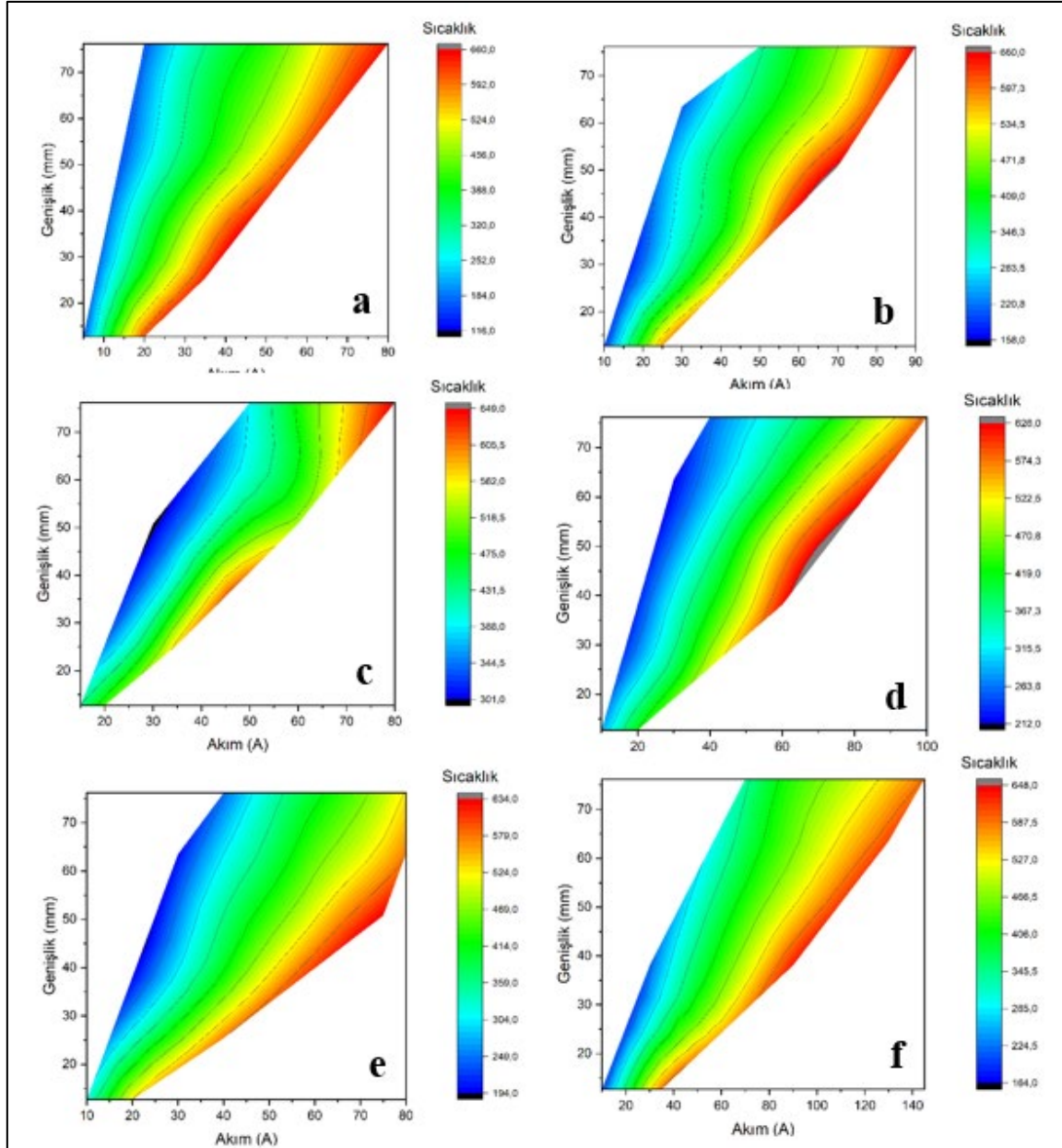
a : Delaminasyon uzunluğu

5. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

5.1. Tel Karakterizasyonu Çalışmaları

Bilindiği üzere termoplastik matrisli kompozit malzemelerinde farklı matris malzemesi olarak PEEK, PEKK, PAEK, PEI gibi malzemeler polimer malzemesi olarak kullanılmaktadır. Her bir matris malzemesi de farklı değerlerde operasyon sıcaklığına sahiptir. Kullanılan ısıtma elemanları farklı kesit alanı, örgü aralığı ve kalınlıklara sahip olduğu için öncelikle çalışma kapsamında kullanılacak malzemelere verilen güç değerlerine göre ulaşacakları sıcaklık mertebelerini belirlemek amacıyla tel karakterizasyonu çalışmaları yapılmıştır. Çalışmanın amaçlarından biri olarak farklı genişliğe sahip farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının malzemelerin işleme sıcaklığına göre verilecek güç değerlerinin belirlenmesidir. Malzemeler tasarlanan direnç kaynağında yer alan sisteme güç verilmesi için yerleştirilen bakır bloklar arası mesafenin 160 mm olması nedeniyle, 160 mm uzunluğunda ve sırasıyla 12,7 mm, 25,4 mm, 38,1mm, 50,8 mm, 63,5 mm ve 76,2 mm genişliğinde olacak şekilde kesilerek teller üzerine akım verilmiştir. Sisteme verilen akım değerlerine göre ısıtma elemanlarının ulaştığı sıcaklık değerleri termal kamerayla ölçülmüştür.

Çalışma sırasında kullanılacak malzeme olarak TORAY TC 1100 PPS matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemesi temin edilmiştir. Malzemenin operasyon sıcaklığı 330 °C olduğu için ısıtma elemanlarının hangi akım değeriyle 330 °C ulaştığı belirlenmiştir. Şekil 5.1'de farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının farklı akım ve genişliğinde ölçülen sıcaklık değerlerinin grafikleri yer almaktadır.



Şekil 5.1. Farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının akım-genişlik-sıcaklık grafikleri
a) 33 μm , b) 45 μm , c) 61 μm , d) 91 μm , e) 109 μm , f) 154 μm .

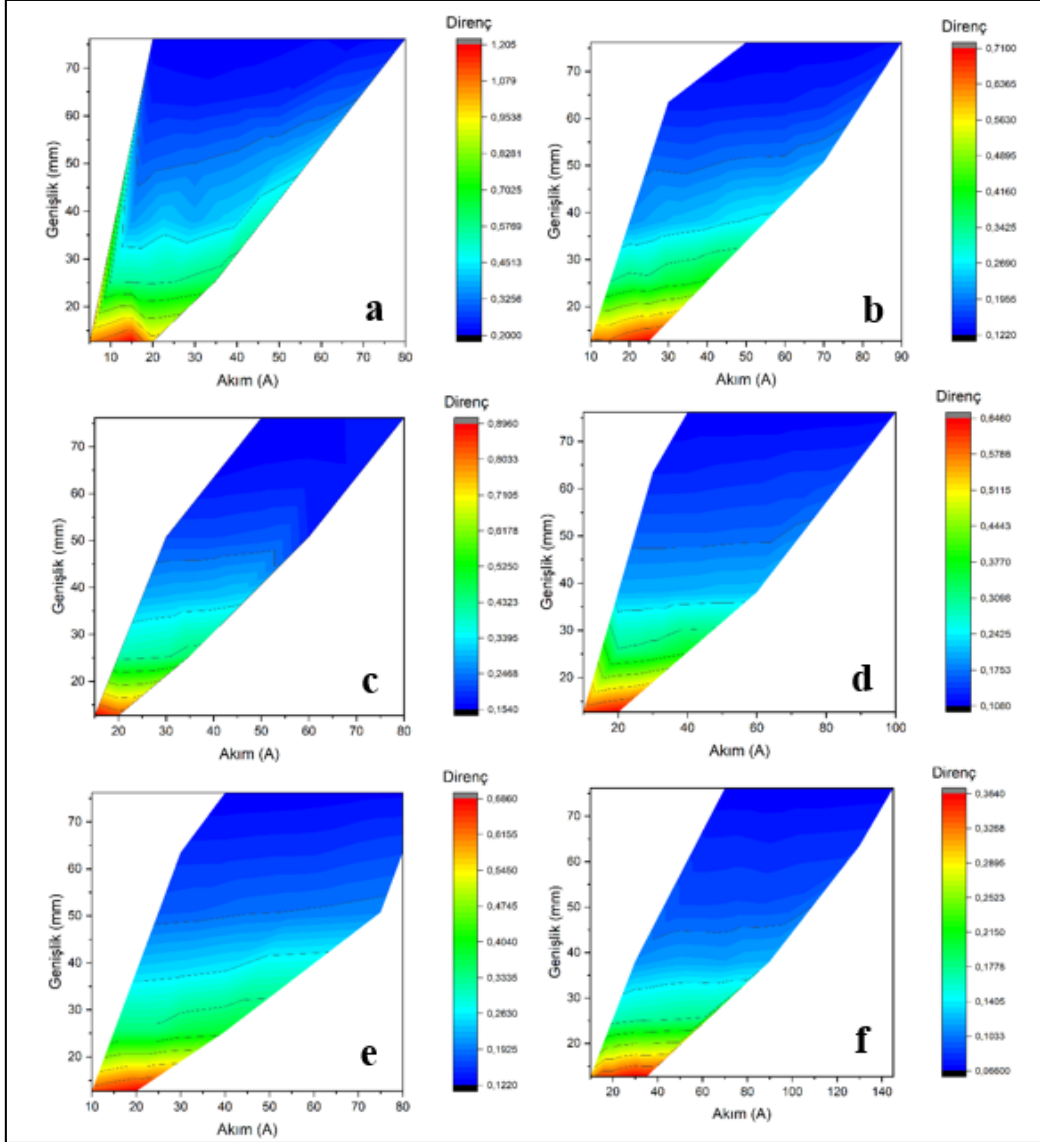
Bindirmeli kesme testi ve çift konsol kiriş testi için yapılan kaynak çalışmalarında sırasıyla kaynak arayüzey genişliği 12,7 mm ve 76,2 mm olduğu ilgili genişliklere sahip ısıtma elemanlarının 330 °C sıcaklığa ulaşması için gerekli olan akım değerleri belirlenmiştir. 33 μm mikron örgü aralığına ve 12,7x160 mm² boyutlarına sahip ısıtma elemanına 10 A akım verildiğinde ve 76,2x160 mm² boyutlarına sahip ısıtma elemanına 40 A verildiğinde 330 °C sıcaklığına ulaştığı tespit edilmiştir.

45 µm örgü aralığına ve 12,7 x 160 mm² boyutlarına sahip ısıtma elemanına 15 A verildiğinde 330 °C sıcaklığa ulaştığı görülmüştür. 76,2 x 160 mm² boyutlarına sahip ısıtma elemanına 50 A akım verildiğinde 330 °C sıcaklığa ulaşmıştır. 330 °C sıcaklığa ulaşılması için gerekli akım değerinin 33 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanına göre fazla olmasının nedeni olarak ısıtma elemanının tel çapının daha fazla olması tespit edilmiştir. 45 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanının direncinin 33 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanından daha az olduğu için istenilen sıcaklık değerine ulaşmak amacıyla daha fazla akım değeri verilmesi gerekli olmaktadır.

Termal kamerayla yapılan ölçüme göre 12,7 x 160 mm² boyutlarına sahip ısıtma elemanına 12 A akım değerinde 330 °C sıcaklığa ulaştığı tespit edilmiştir. 76,2 x 160 mm² boyutlarına sahip ısıtma elemanının örgü aralığının artmasına rağmen istenilen sıcaklığa ulaşılması için gerekli akım değerinin daha fazla olması beklenirken, 61 µm örgü aralığında daha az olmasının nedeni olarak tel çapının aynı olmasının ve tellerin direnç değerlerinin aynı olması gösterilmektedir.

154 µm örgü aralığına ve 12,7 x 160 mm² boyutlarına sahip ısıtma elemanına sahip ısıtma elemanına 18 A akım verildiğinde 330 °C'ye yakın sıcaklığa ulaştığı tespit edilmiştir. 76,2 x 160 mm² boyutlarına sahip ısıtma elemanına ise 70 A akım verildiğinde istenilen sıcaklık seviyesine geldiği görülmüştür. 154 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının istenilen mertebelerdeki sıcaklık seviyelerine çıkması için gerekli akım miktarı diğerlerine göre daha fazladır. Bunun nedeni olarak 154 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanının tel dirençleri diğerlerine göre daha düşüktür. Isınma elemanlarına aynı seviyelerde güç verilmesi gerektiği için sisteme verilmesi gereken akım değeri 154 µm örgü aralığındaki ısıtma elemanlarında en fazladır.

Tel karakterizasyonu çalışması kapsamında ısıtma elemanlarının tellerin direnç değerleri ölçülmüştür. Ölçülen direnç değerlerinin akım ve genişliğe göre grafiği Şekil 5.2'de yer almaktadır. Direnç değerlerinin ölçülmesinin amacı olarak sisteme verilmesi gereken güç değerlerinin hesaplanmasıdır.



Şekil 5.2. Farklı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının akım-genişlik-direnç grafikleri

a) 33 μm , b) 45 μm , c) 61 μm , d) 91 μm , e) 109 μm , f) 154 μm .

Tel karakterizasyonu çalışması sonucunda ısıtma elemanlarının akım, sıcaklık ve genişliğine göre lineer regresyon analizi oluşturulmuştur. Elde edilen matematiksel modeller Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Isıtma elemanlarının akım, sıcaklık ve genişliğine göre regresyon analizi.

Örgü Aralığı (µm)	Formül	R ²	R ² adj
33	Sıcaklık (°C) = 387,7 + 9,290 Akım (A) – 5,849 Genişlik (mm)	91,28 %	88,28 %
45	Sıcaklık (°C) = 252,9 + 8,971 Akım (A) – 5,047 Genişlik (mm)	92,92 %	92,36 %
61	Sıcaklık (°C) = 356,2 + 9,042 Akım (A) – 6,113 Genişlik (mm)	82,31 %	80,54 %
91	Sıcaklık (°C) = 322,6 + 6,806 Akım (A) – 5,013 Genişlik (mm)	91,16 %	90,51 %
109	Sıcaklık (°C) = 314,1 + 8,074 Akım (A) – 5,553 Genişlik (mm)	93,28 %	92,67 %
154	Sıcaklık (°C) = 342,1 + 4,214 Akım (A) – 4,259 Genişlik (mm)	91,70 %	91,04 %

61 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanının R² değerinin %82,31 çıkmasının nedeni olarak analize girdi sağlanan değerlerin diğer ısıtma elemanlarına göre biraz daha az olması gösterilebilir. 61 µm ısıtma elemanına verilen bazı akım değerlerinde ısıtma elemanı üzerinde ark oluşarak kısa devre oluşmasından kaynaklı bazı sıcaklık değerleri doğru okunmamıştır. Aykırı olan değerler modele eklenemediği için veri sayısı diğer ısıtma elemanlarına göre az olmuştur.

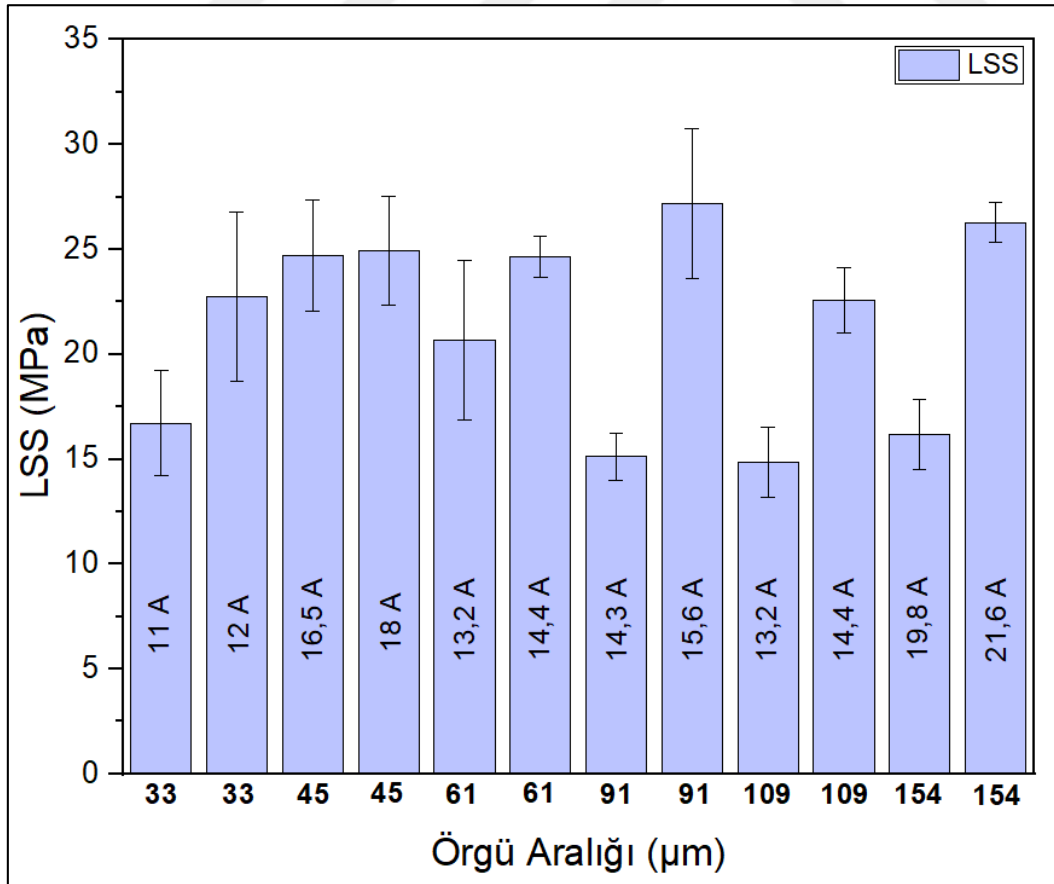
Tel karakterizasyonu çalışmasının sonucu olarak elde edilen sonuçlar ile birlikte, bindirmeli kesme testi ve çift konsol giriş testi için numunelere verilecek güç değerleri belirlenmiştir. Bindirmeli kesme testi için kaynak yapılacak numunelere tel karakterizasyonu deneylerinde ısıtma elemanlarının PPS malzemesinin operasyon sıcaklığı 300 - 330 °C'ye ısıtılması için akım değerlerinin %10 fazla değerleri alınmıştır. Akım değerlerinin %10 daha fazla alınmasının nedeni olarak kaynak sırasında oluşacak ısı kayıplarından dolayıdır. Çift konsol giriş testi için kaynak yapılacak numuneler için sisteme verilen akım değerleri, tel karakterizasyonu çalışması sonucu elde edilen akım değerlerinin %20 fazlası olarak alınmıştır. Bunun nedeni olarak, çift konsol giriş testi için kullanılan ısıtma elemanlarının boyutları daha fazla olduğu için daha fazla oluşacak ısı kayıplarının önüne geçmektedir.

Tel karakterizasyonu çalışmalarında yapılan direnç ölçüm çalışmaları ile birlikte, ölçülen direnç değerleri ile birlikte hesaplanan güç değerleri sonlu elemanlar analizinde kullanılarak, kaynak yapılacak numunelerin verilen güç değerlerine karşılık ısınma miktarlarıyla karşılaştırılacaktır.

5.2. Mekanik Test Sonuçları

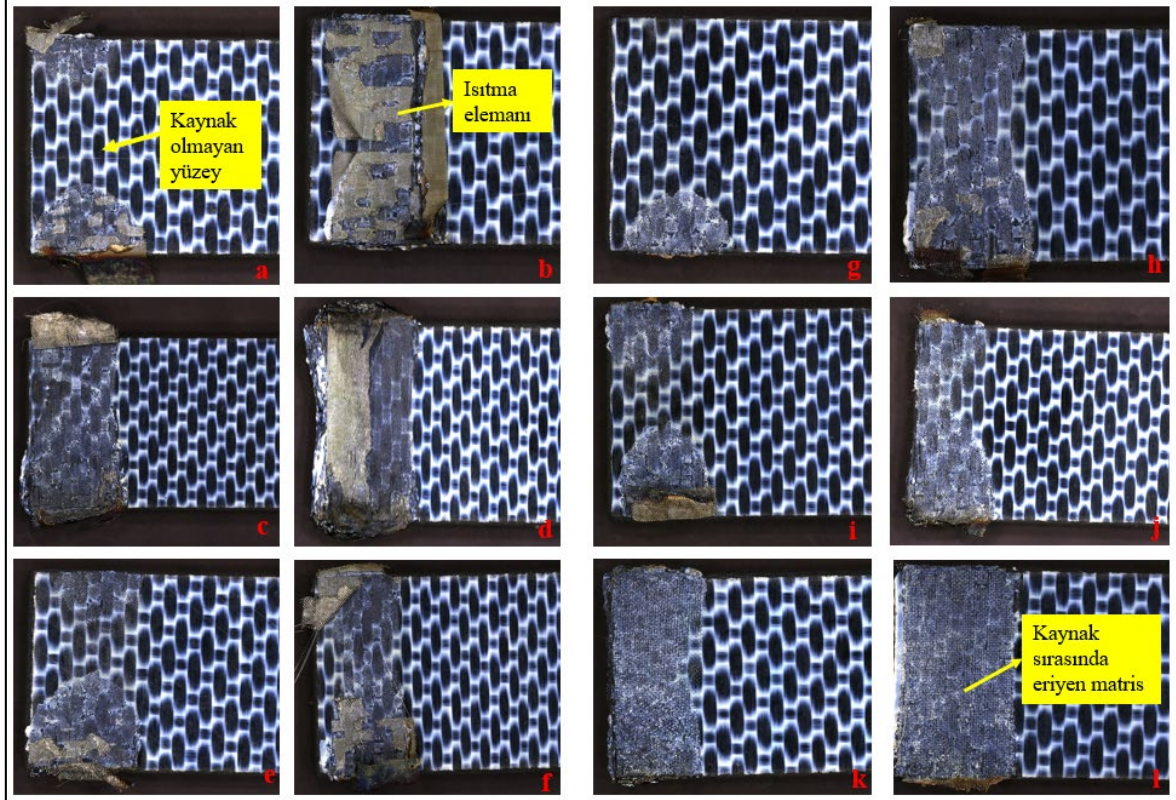
5.2.1. Bindirmeli kesme testi sonuçları

Bindirmeli kesme testi standartlarına göre 6 farklı ısıtma elemanı ve 2 farklı akım değerlerinde kaynaklanan numuneler 1,3 mm/dk hızla çekilerek bindirmeli kesme kuvvet ve birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında numunelerin mukavemet değerleri hesaplanmıştır. Örgü aralığı ve verilen akım değerlerine göre hesaplanan bindirmeli kesme mukavemeti değerleri Şekil 5.3'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Bindirmeli kesme mukavemet değerleri.

Hesaplanan mukavemet değerlerine bakıldığında, bazı numunelerin mukavemet değerlerinin düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni tespit etmek amacıyla Zeiss Smartzoom 5 dijital mikroskop kullanılarak numunelerin yüzey görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.4'te numunelerin yüzey görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.4. Bindirmeli kesme testi numunelerinin yüzey görüntüleri a) 33 μm - 11A, b) 33 μm - 12A, c) 45 μm - 16,5A, d) 45 μm - 18A, e) 61 μm - 13,2A, f) 61 μm - 14,4A, g) 91 μm - 14,3A, h) 91 μm - 15,6A, i) 109 μm - 13,2A, j) 109 μm - 14,4A, k) 154 μm - 19,8A, l) 154 μm - 21,6A.

Şekil 5.4'te yer alan görüntülere bakıldığında bazı numunelerin tamamen istenilen yüzey alanı kadar kaynamadığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak akım sızıntısı ve kenar etkisi kavramları literatürde incelenmiştir. Akım sızıntısı, kaynak sırasında parça kenarlarının lokal olarak erimesiyle birlikte, ısıtma elemanlarının karbon elyaf ile temas ederek farklı akım yolları oluşturduğunu göstermektedir. Isıtma elemanı üzerinden akım kaynak sırasında numunelerin orta bölgelerini atlayarak karbon elyaf üzerinden akmaktadır ve böyle kısa devre oluşmaktadır. Böylece numunelerin orta bölgeleri ısınmadan kenar ve kenara yakın bölgelerde kaynama oluşmasına neden olmaktadır [77,78,60]. Ayrıca, kaynak numuneleri ısıtma elemanların tutulduğu bakır plakaların arasındaki mesafenin uzunluğundan kaynaklı kenar etkisi meydana gelmiştir.

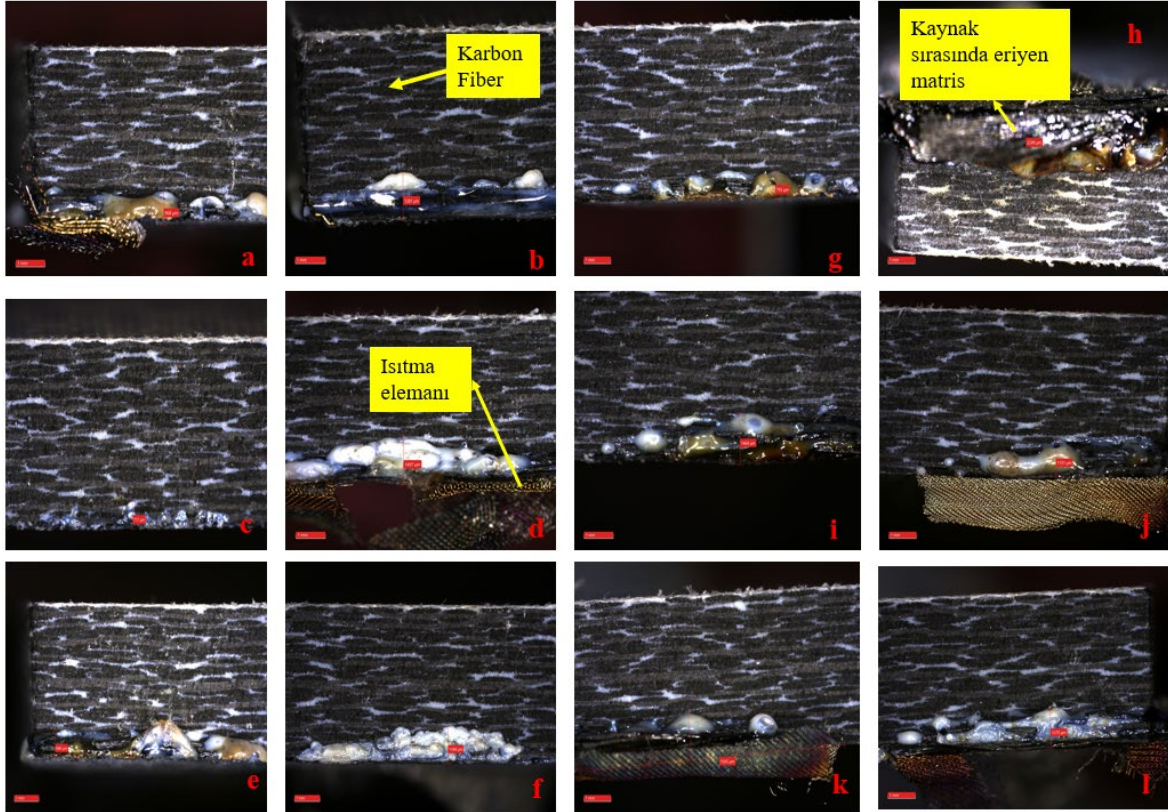
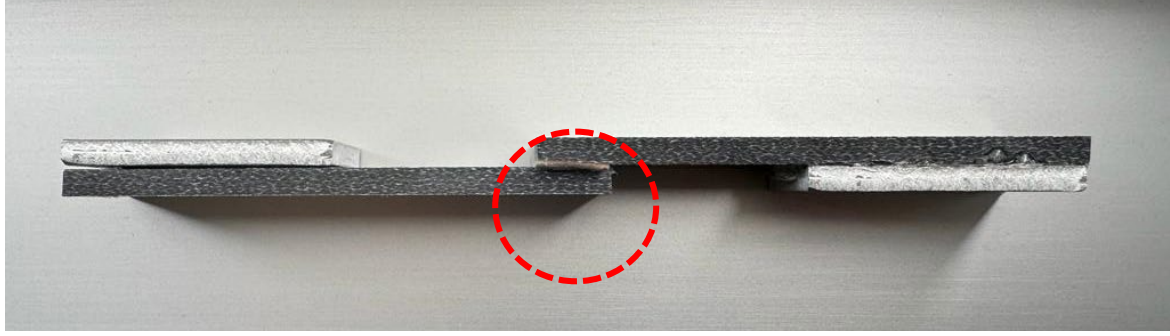
Kenar etkisi, ısıtma elemanının hava ile temas ettiği alanın uzunluğundan kaynaklı ısıtma elemanının ısıtıldığı anda elde edilen ısının hava ile temas etmesiyle birlikte doğal taşınım olayı yaşanmıştır. Doğal taşınımdan kaynaklı yaşanan ısı kaybından dolayı bazı numuneler ısıtma elemanı tarafından yeterli derecede ısıtılmamıştır [79].

Şekil 5.4'te elde edilen görüntülerden ImageJ programı yardımıyla kaynak sırasında eriyen yüzeylerin alanları hesaplanmıştır ve Şekil 5.3'te yer alan mukavemet değerleri hesaplanırken kullanılan yüzey alanları ImageJ programıyla elde edilen alanlara göre hesaplanmıştır. Çizelge 5.2'de eriyen polimerlerin yoğunluğu verilmiştir.

Çizelge 5.2. Bindirmeli kesme testi numunelerinin eriyen polimer yoğunluğu yüzdesi.

Isıtma Elemanı Örgü Aralığı (μm)	Akım Değeri (Amper)	Eriyen Polimer Yoğunluğu Yüzdesi
33	11	%39,50
33	12	%79,04
45	16,5	%107,10
45	18	%123,69
61	13,2	%68,26
61	14,4	%89,98
91	14,3	%19,40
91	15,6	%92,56
109	13,2	%60,99
109	14,4	%71,86
154	19,8	%83,01
154	21,6	%102,60

Ayrıca elde edilen sonuçların daha doğru yorumlanması amacıyla dijital mikroskop vasıtasıyla numunelerin kesit görüntüleri alınmıştır. Alınan kesit görüntüleri Şekil 5.5'te yer almaktadır.



Şekil 5.5. Bindirmeli kesme testi numunelerinin kesit görüntüleri a) 33 μm - 11A, b) 33 μm - 12A, c) 45 μm - 16,5A, d) 45 μm - 18A, e) 61 μm - 13,2A, f) 61 μm - 14,4A, g) 91 μm - 14,3A, h) 91 μm - 15,6A, i) 109 μm - 13,2A, j) 109 μm - 14,4A, k) 154 μm - 19,8A, l) 154 μm - 21,6A.

Alınan kesit görüntülerine göre kaynaklanan numunelerin eriyen katman sayısı hesaplanmıştır. Hesaplanan eriyen katman sayıları Çizelge 5.3'te yer almaktadır.

Çizelge 5.3. Bindirmeli kesme numunelerinde eriyen katman sayıları.

Isıtma elemanı örgü aralığı (μm)	Akım değeri (Amper)	Eriyen katman sayısı
33	11	4
33	12	6
45	16,5	6
45	18	7
61	13,2	6
61	14,4	5
91	14,3	3
91	15,6	10
109	13,2	3
109	14,4	5
154	19,8	4
154	21,6	7

Şekil 5.3'te yer alan grafiğe bakıldığında, 91 μm örgü aralığı ve 15,6A akım değerinde yapılan kaynağın en yüksek bindirmeli kesme mukavemeti değerine sahip olduğu görülmüştür. Çizelge 5.3'te yer alan eriyen katman sayısına bakıldığında 91 mikron örgü aralığı ve 15,6A değerinde yapılan kaynak sırasında numunenin 10 katmanının eridiği görülmüştür. Yapılan kaynak ile eriyen matris malzemesinin ısıtma elemanının örgü aralıklarından birbiri ile daha iyi temas ederek birleşmenin güçlü olmasını göstermiştir.

Aynı şekilde 91 μm örgü aralığı ve 14,3A akım değerinde yapılan kaynak numunesinin mukavemet değerinin en düşük olduğu görülmüştür. Eriyen katman sayısına bakıldığında 3 katmanın erdiği görülmüştür. Çizelge 5.2'de yer alan eriyen polimer yüzdesi bakıldığında ise yüzey alanı olarak kaynak sırasında erimesi beklenen bölgenin %19,02'sinin eridiği gözlemlenmiştir. Sisteme verilen güç değerinin yeterli gelmemesi ile oluşan ısı kaybıyla birlikte başarılı bir kaynak işlemi gerçekleştirilememiştir.

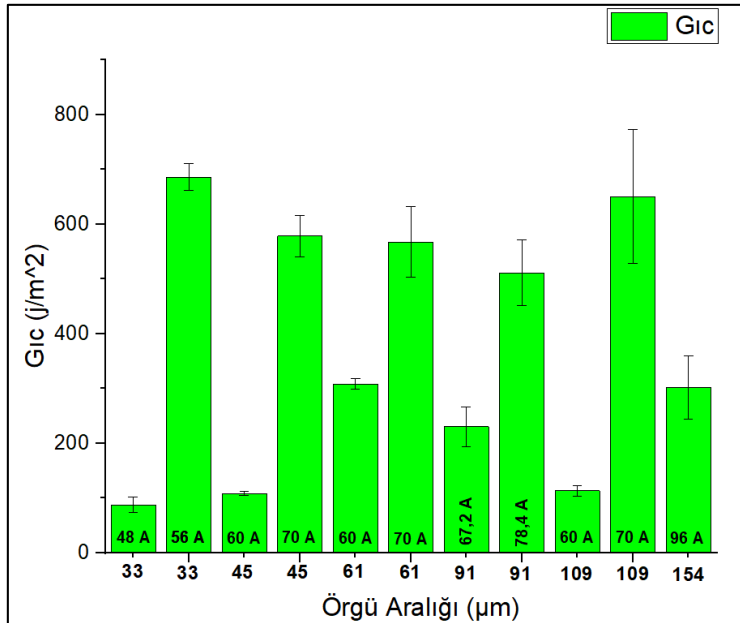
45 μm örgü aralığında ısıtma elemanlarıyla yapılan kaynak numunelerine bakıldığında akım değerinin artmasıyla birlikte kaynak arayüzünde eriyen matris malzemesinin %107,10 değerinden %123,69'a ve eriyen katman sayısı 6'dan 7'ye yükselmesine rağmen mukavemet değeri %1 değerinde artış göstermiştir. Akımın artmasıyla birlikte sisteme verilen güç artmaktadır. Aynı örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarına verilen güç değerinin artmasıyla mukavemet değeri doğrusal olarak artmamaktadır. Bunun nedeni olarak verilen gücün artmasıyla kaynak yapılan numunelerinin sıcaklıkları artış göstermektedir.

Bunun sonucu matris malzemesinin viskozitesinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum matris malzemesinin daha fazla akmasına, liflerin sıkışmasına ve katmanların bozulmasına nedendir. Ayrıca matris malzemesinin buharlaşarak malzeme kaybı oluşması gerçekleşebilmektedir [46].

154 μm örgü aralığına sahip ısıtma elemanı ile 21,6A akım değerinde kaynaklanan numunelerin mukavemet değeri 45 μm örgü aralığına sahip ısıtma elemanı ile yapılan kaynak numunelerinden daha fazla çıkmıştır. Bunun nedeni olarak örgü aralığının artmasıyla birlikte daha fazla matris malzemesinin birbiriyle temas etmesi görülmektedir. 91 μm örgü aralığı ve 15,6A akım değerinde yapılan kaynak numunelerinin mukavemet değerinin 154 μm 21,6A akım değerinde yapılan kaynak numunesine göre daha fazla olmasının nedeni olarak sarkıt şeklinde temas eden matris malzemesinin uzunluğunun daha az olmasıyla birlikte dengeli bir örgü aralığı ve tel kalınlığına sahip olduğu tespit edilmiştir.

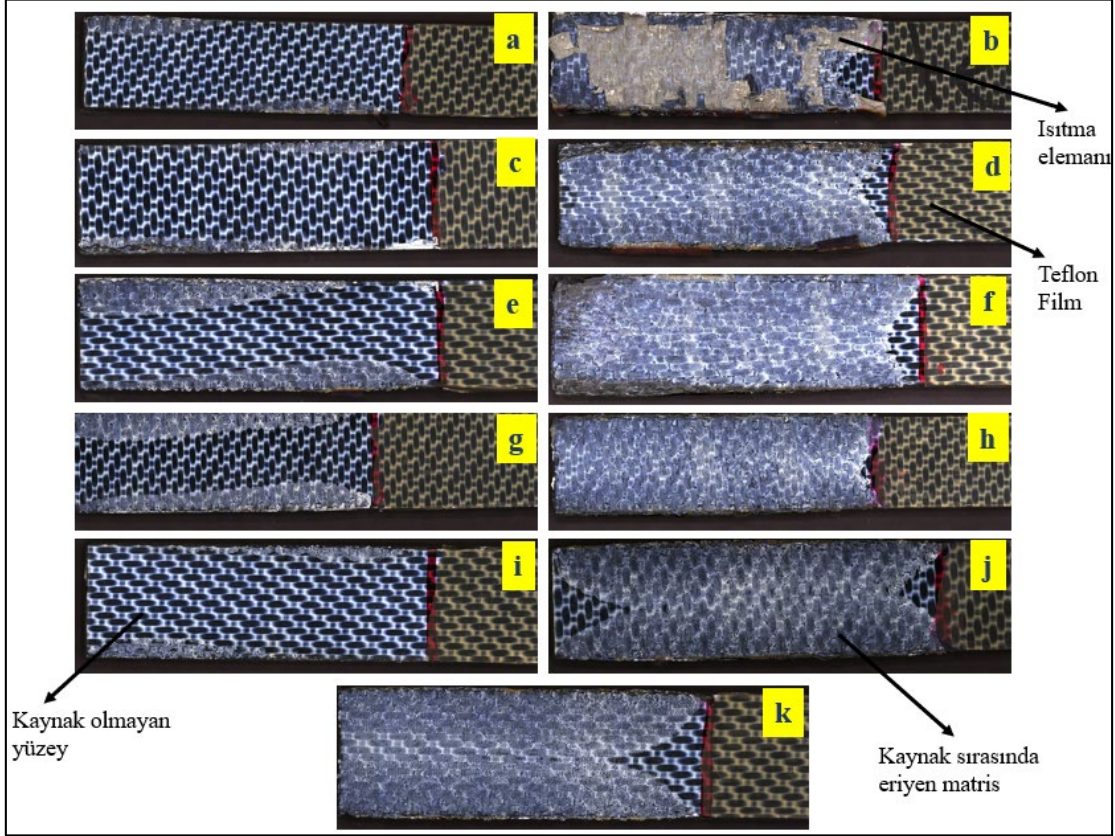
5.2.2. Çift konsol kiriş testi

Çift konsol kiriş testi için 2 farklı akım değerinde 6 farklı ısıtma elemanı toplam 60 adet kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Şekil 5.6'daki grafikte yer alan Mod 1: Tabakalar arası kırılma tokluğu değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.6. Tabakalar arası kırılma tokluğu değerleri.

Çift konsol kiriş testi için üretilen kaynak numunelerinin dijital mikroskop yardımıyla kaynak arayüzlerinin görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.7’de çift konsol kiriş testi numunelerinin kaynak arayüzlerinin görüntüleri yer almaktadır.



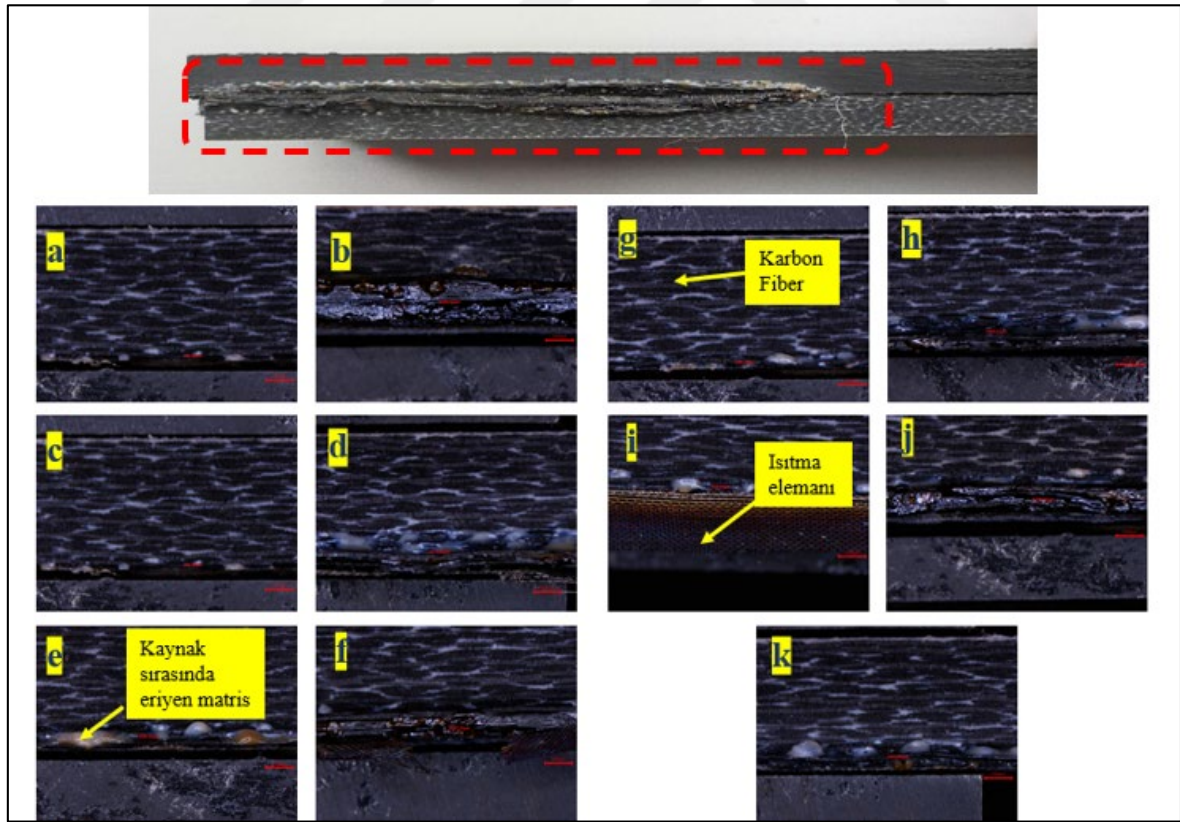
Şekil 5.7. Çift konsol kiriş testi numunelerinin yüzey görüntüleri a) 33 μm - 48A, b) 33 μm - 56A, c) 45 μm - 60A, d) 45 μm - 70A, e) 61 μm - 60A, f) 61 μm - 70A, g) 91 μm - 67,2A, h) 91 μm - 78,4A, i) 109 μm - 60A, j) 109 μm - 70A, k) 154 μm - 96A.

Yüzey görüntüleri alınan numunelerin kaynak arayüzünde eriyen polimerin yüzeyel yoğunluğu hesaplanmıştır. Çizelge 5.4’te çift konsol kiriş testi numunelerinin eriyen polimer yoğunluğu yüzdesi yer almaktadır.

Çizelge 5.4. Çift konsol kiriş testi numunelerinin eriyen polimer yoğunluğu yüzdesi.

Isıtma Elemanı Örgü Aralığı (μm)	Akım Değeri (Amper)	Eriyen polimer yoğunluğu yüzdesi
33	48	%11,19
33	56	%93,49
45	60	%12,58
45	70	%93,80
61	60	%35,61
61	70	%93,98
91	67,2	%38,99
91	78,4	%98,74
109	60	%12,93
109	70	%90,39
154	96	%89,71

Ayrıca elde edilen sonuçların daha doğru yorumlanması amacıyla stereo mikroskop vasıtasıyla numunelerin kesit görüntüleri alınmıştır. Alınan kesit görüntüleri Şekil 5.7’de yer almaktadır.



Şekil 5.7. Çift konsol kiriş testi numunelerinin kesit görüntüleri a) 33 μm - 48A, b) 33 μm - 56A, c) 45 μm - 60A, d) 45 μm - 70A, e) 61 μm - 60A, f) 61 μm - 70A, g) 91 μm - 67,2A, h) 91 μm - 78,4A, i) 109 μm - 60A, j) 109 μm - 70A, k) 154 μm -96A.

Şekil 5.7’ de yer alan numunelerin kesit görüntülerinden yararlanarak kompozit numunelerin eriyen katman sayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan katman sayıları Çizelge 5.5’te yer almaktadır.

Çizelge 5.5. Çift konsol kiriş testi numunelerinin eriyen katman sayıları.

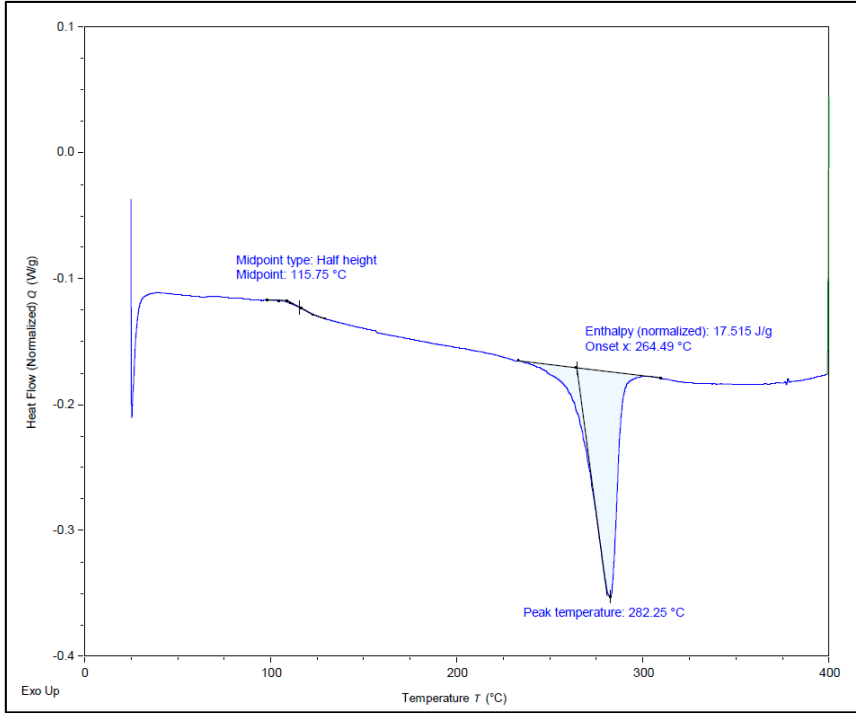
Isıtma Elemanı Örgü Aralığı (μm)	Akım Değeri (Amper)	Eriyen katman sayısı
33	48	2
33	56	9
45	60	2
45	70	6
61	60	2
61	70	5
91	67,2	2
91	78,4	6
109	60	2
109	70	7
154	96	4

Ayrıca çift konsol kiriş testi yapılan numunelerin Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile kristallenme yüzdelere bakılmıştır. Şekil 5.8’de kullanılan taramalı kalorimetrenin temsili görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.8. Diferansiyel taramalı kalorimetre temsili görüntüsü.

DSC analizinde minimum 8 mg matris malzemesi olacak şekilde kaynak numunelerinden bakalit alınmıştır. Alınan bakalitler 25°C ’den 400°C ’ye $10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ olacak şekilde ısıtılmıştır. 1 dakika izotermal olarak bekletilmiştir. Numuneler 400°C ’den 25°C ’ye $10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ olarak soğutulmuştur. Şekil 5.9’da DSC grafiği yer almaktadır.



Şekil 5.9. DSC çevrim grafiği.

Kristallenme yüzdeleri hesaplanan kristallenme yüzdeleri Çizelge 5.6'da yer almaktadır.

Çizelge 5.6. Çift konsol kiriş testi numunelerinin kristallenme yüzdesi.

Örgü Aralığı (μm)	Akım Değeri (A)	Kristallenme Yüzdesi (%)
33	48	26,31
33	56	46,26
45	60	31,33
45	70	35,43
61	60	28,23
61	70	31,48
91	67,2	34,36
91	78,4	38,88
109	60	36,30
109	70	42,01
154	96	30,75

33 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanı ile 56A akım değerinde yapılan kaynak numunesinin en yüksek tabakalar arası tokluk değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 5.5'te yer alan 33 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanı ve 56A akım değeriyle yapılan kaynak numunesinin eriyen katman sayısının 10 olduğu tespit edilmiştir. Kristallenme oranının artmasıyla %46,26 oranında çıkmasıyla birlikte en iyi kaynak numunesinin 33 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanı ve 56A akım değerinde kaynak yapılan numunesi olduğu görülmüştür.

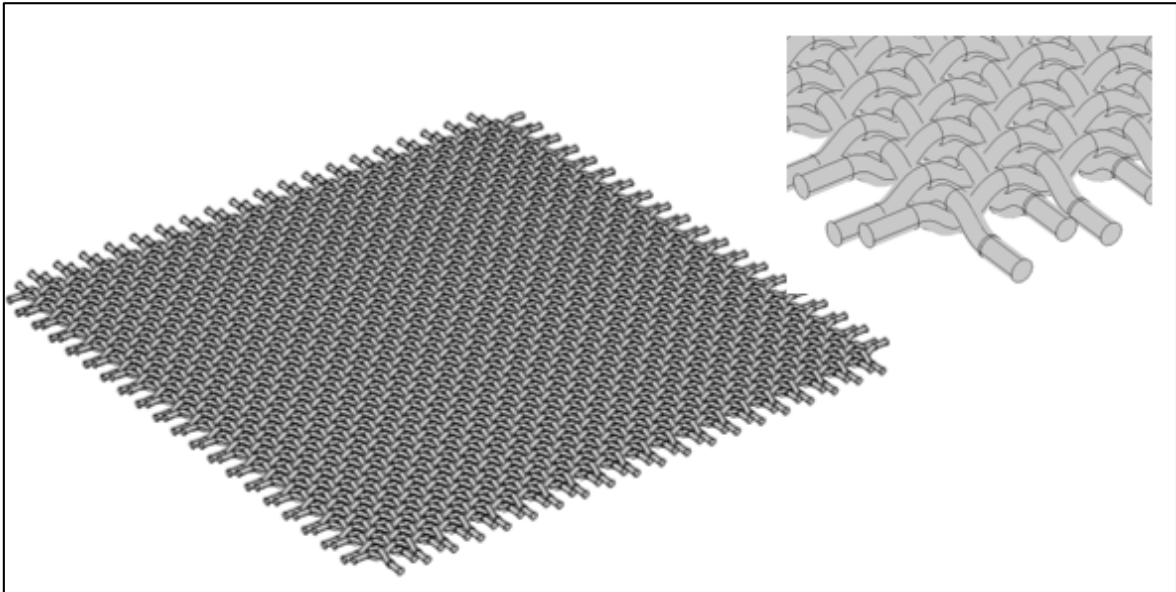
154 µm örgü aralığı ve 84A akım değerinde yapılan kaynak numunelerinde çift konsol giriş testinde kaynak işleminin başarısız olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin 84A akım değerinden elde edilen gücün termoplastik numunelerin matris malzemelerinin eritilmesinde yetersiz olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.6'da yer alan kristallenme oranlarının artmasıyla malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin arttığı görülmüştür.

6. DİRENÇ KAYNAĞI ANALİZLERİ

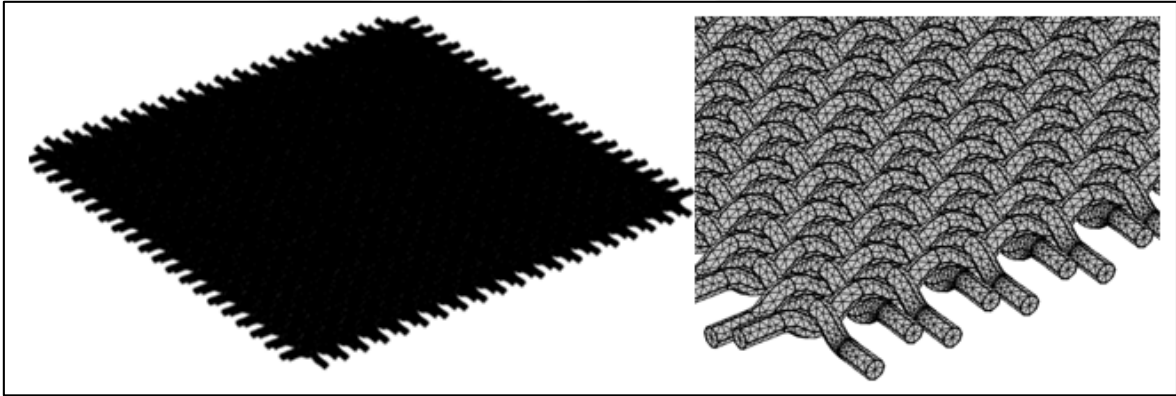
Kompozit malzemelerin birleştirme teknikleri, özellikle havacılık endüstrisindeki yapılar için uygulanabilir kullanımları ve uygulamaları açısından oldukça önemli bir konu olup, proses parametrelerin belirlenmesine yönelik çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Termoset kompozitlerin füzyonla bağlanamaması nedeniyle kompozitleri birleştirmek için genellikle mekanik birleştirme teknikleri kullanılırken, termoplastik kompozitler ultrasonik kaynak, direnç kaynağı, lazer kaynağı gibi kaynak teknikleri yardımıyla ergitme yöntemiyle birleştirilebilmektedir. Bu tez kapsamında termoplastik kompozitlerden PPS'lerin birleştirilmesinde direnç kaynağında kullanılan ısıtma elemanlarının verilen akımlarla ulaşılabilen sıcaklık seviyeleri bilgisayar ortamında belirlenmeye çalışılmıştır.

İlk olarak direnç kaynak sisteminde kullanılan tellerin ısıl karakterizasyonu yapılarak, uygulanan güç değerleri ile ulaşılabilecek sıcaklık seviyelerin analizleri gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışma kapsamında Comsol Multphysics yazılımı kullanılmıştır. Bunun için aynı tel çapına sahip farklı miktarlardaki tel sayısının, ulaşılan sıcaklıklar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 6.1'de 30 μm tel çapına ve 33 μm örgü aralığına sahip ısıtma elemanının tasarımı görülmektedir. Tasarımda bir kenarda kullanılan tel sayısı w ile isimlendirilmiştir.



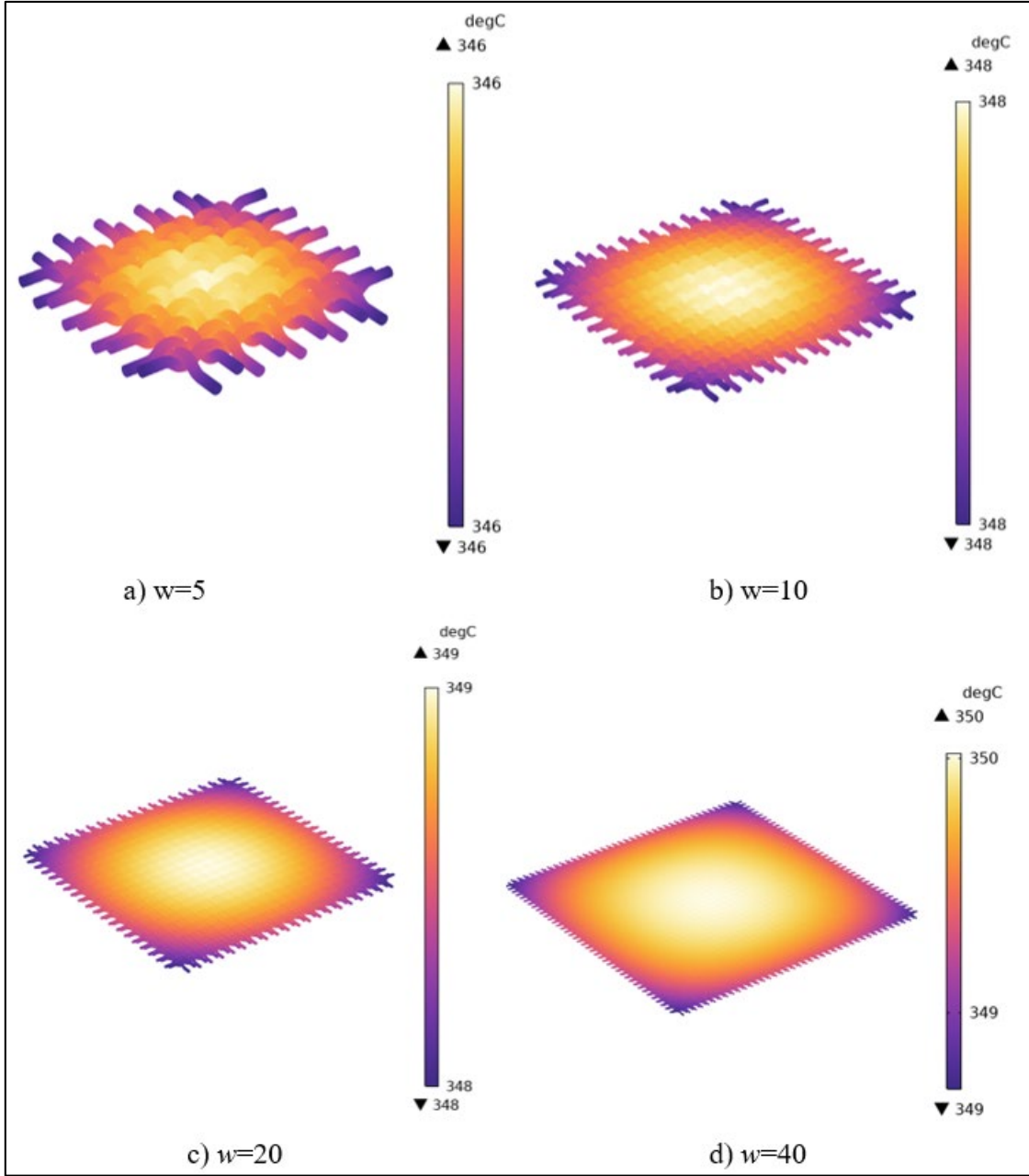
Şekil.6.1. Analizlerde kullanılan ısıtma elemanı geometrisi ($w=20$).

Çalışmada farklı tel sayısına bağlı olarak oluşturulan geometrilere oluşan sıcaklık seviyelerini belirlemek için yazılımın Heat Transfer (Isı Transferi) modülü kullanılmıştır. İlgili modülde enerji girdisi deney esnasında sisteme beslenen güç verilerinden okunmuştur. Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere deneylerde ısıtma elemanları üzerine beslenen akım değerlerine bağlı olarak voltaj ve direnç verileri kontrol panelinden okunabilmekteydi. Buradan elde edilen Voltaj ve Akım değerleri kullanılarak güç girdisi sağlanmış ve elemanın hacmine göre birim güç yoğunluğu belirlenmiştir. Hesaplanan birim güç yoğunluğuna bağlı olarak ısıtma elemanlarının sıcaklıkları belirlenmeye çalışılmıştır. Bunlara ilave olarak analizlerde ortama gerçekleşen ısı taşınımı ve ışıma fizikleri de hesaba katılmıştır. Isı taşınım katsayısı olarak durgun hava özelliği tanımlanmış ve $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak alınmıştır. Yapılan çalışma kapsamında ısıtma elemanlarının ve sonrasında ısıtılacak olan kompozit parçaların meshlenmesinde tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Kullanılan ağ yapısına ait görüntü Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Isıtma elemanına ait ağ yapısının görseli.

Farklı tel sayılarına bağlı olarak ölçülen sıcaklık verileri Şekil 6.3(a-d)’de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere tek bir kenara düşen tel sayısı 20 ve üzerine çıktığında ısıtma elemanı üzerindeki sıcaklık dağılımında herhangi bir değişiklik gözlemlenmemektedir. Bununla birlikte sıcaklık seviyesi en düşük tel sayısına göre sadece $2 \text{ }^\circ\text{C}$ fark etmiştir. Her ne kadar bu sıcaklık farkı kabul edilebilir olsa da çalışmalarda 20 adetlik tel sayısı için oluşturulmuş ısıtma elemanları kullanılmıştır.



Şekil 6.3. Farklı tel sayılarına bağlı olarak elde edilen sıcaklıklar.

6.1. Kompozit Plakalarda Sıcaklık Dağılımı

Yapılan bu çalışma kapsamında ısıtma elemanları üzerine ilave olarak kompozit plakalarda tasarlanmış olup joule heating etkisinde hangi sıcaklık seviyelerine ulaşabildiği tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yukarıda gerçekleştirilen farklı adetli ısıtma eleman analizlerine göre sıcaklık farkının azaldığı nokta olan $w=20$ adetlik tel sayısı olan ısıtma elemanları ile çalışmaya devam edilecektir. Çalışmada ısıtma elemanının alt ve üst kısımlarına 3 mm kalınlığında kompozit plakalar tasarlanarak ısıtma elemanları araya alınmıştır.

Burada plakalar arasında oluşan boşluk için ısıtma elemanını çevreleyen bir de hava domaini oluşturulmuştur. Yapılan tasarıma ait ayrıntılı tasarım görüntüsü ve ağ yapısı Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Tasarlanan hava domaini ısıtma elemanlarının kalınlık boyunca oluşturduğu en uç noktalarla sınırlandırılmıştır.

Kompozit plakalar daha önce de değinildiği üzere Toray Cetex TC1100 PPS reçineli, örgü formundaki karbon fiberlere sahip kompozit malzemelerden seçilmiştir. Burada kompozit plakalara ait fiziksel özellikler ortotropik özelliklerde tanımlanmıştır. Bu özelliklerden yapılan analizlerde önemli bir etkisi olan ısı iletim katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmış malzeme model girdisi farklı üç yön için analizlere tanımlanmıştır. Burada analizleri basitleştirmek adına kompozit plakalar direkt olarak katı bir formda modellenerek ilgili fiziksel özellikler ortotropik olarak plakalara tanımlanmıştır. Yapılan çalışmalarda kompozit plakaları oluşturan termoplastik reçine ve karbon fiberlere ait özellikler aşağıda Çizelge 6.1' de verilmiştir. Homojen plaka kabulü yapılarak bu malzemelerin oluşturduğu eşdeğer ısı iletim katsayısına ait hesaplamalar ise sırası ile Eşitlik 6.1-6.4 de verilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında fiber doluluk oranı (V_f) yaklaşık %60 olup geri kalanı reçineden ibarettir.

$$k_1 = V_f k_f + V_m k_m \quad (6.1)$$

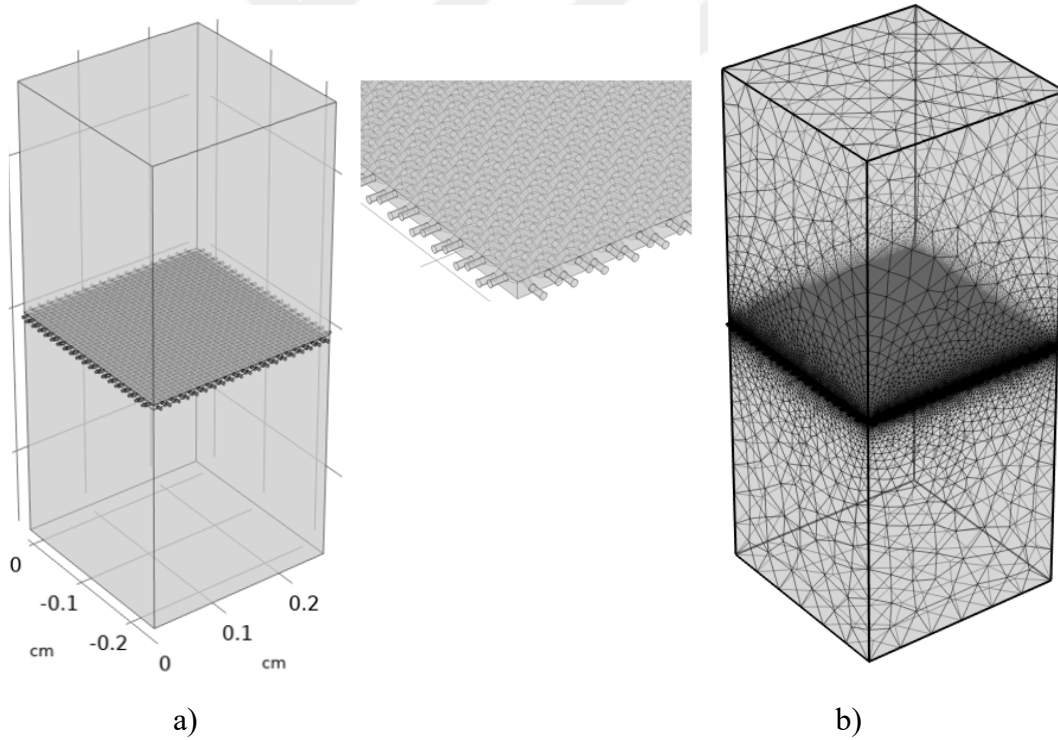
$$k_2 = k_3 = \frac{k_f k_m}{V_f k_m + V_m k_f} \quad (6.2)$$

$$k_{in-plane} = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (6.3)$$

$$k_{out-of-plane} = \frac{2 * k_1 * k_2}{k_1 + k_2} \quad (6.4)$$

Çizelge 6.1. Termoplastik malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri [80].

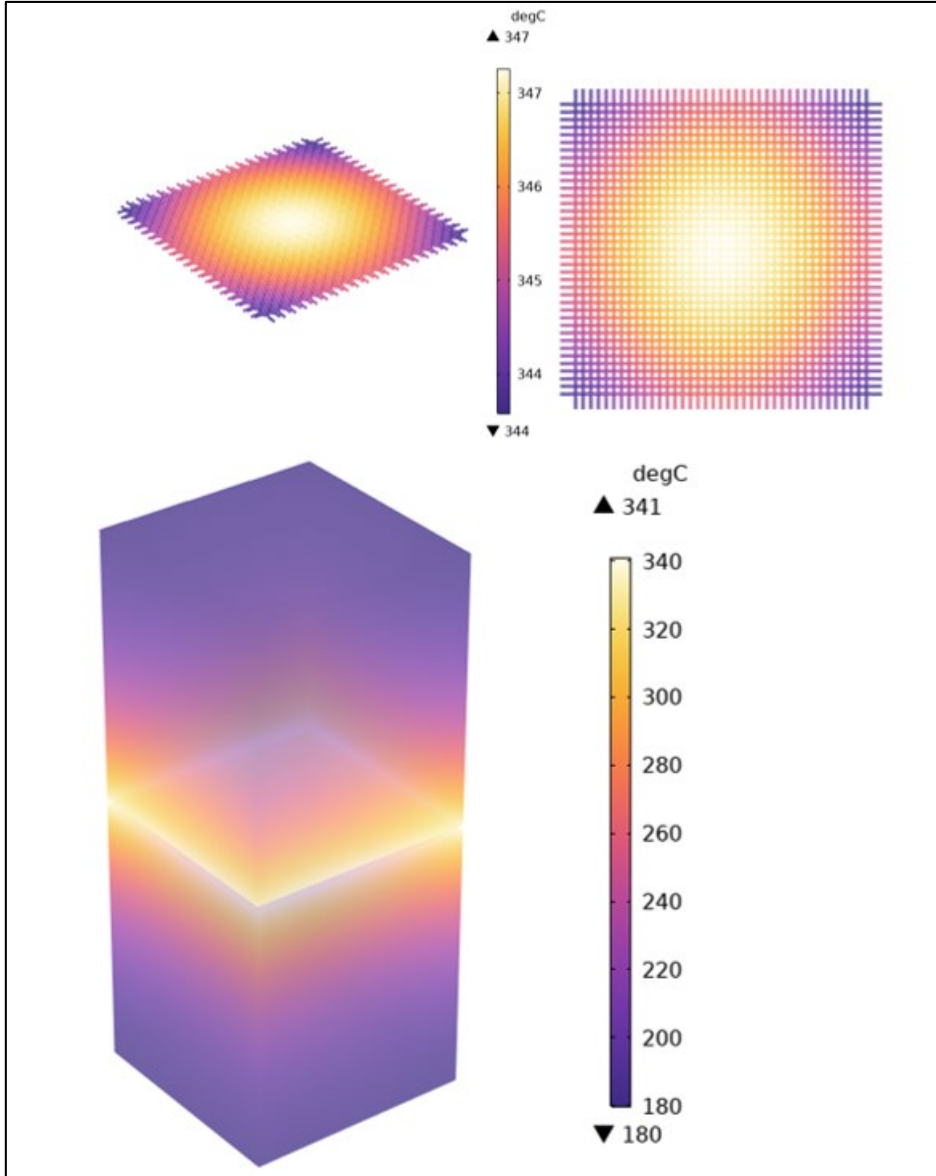
KARBON FİBER T300		TERMOPLASTİK PPS TC1100	
Yoğunluk (kg/mm ³)	$1,760 \times 10^{-6}$	Yoğunluk (kg/mm ³)	$1,350 \times 10^{-6}$
Young modülü – eksen boyunca (N/mm ²)	230×10^3	Camsı geçiş sıcaklığı (T _g , °K)	363
Young modülü – eksene dik (N/mm ²)	23×10^3	Erime sıcaklığı (T _m , °K)	553
Poisson katsayısı	0.24	Young modülü (N/mm ²)	$3,8 \times 10^3$
Termal genleşme katsayısı – eksen boyunca (mm/mm°K)	$-0,41 \times 10^{-6}$	Poisson katsayısı	0.36
Termal genleşme katsayısı – eksene dik (mm/mm°K)	$12,5 \times 10^{-6}$	Termal genleşme katsayısı (mm/mm°K)	$52,2 \times 10^{-6}$
Termal iletkenlik – eksen boyunca (W/mm°K)	10500	Termal iletkenlik (W/mm°K)	190
Termal iletkenlik – eksene dik (W/mm°K)	2000		



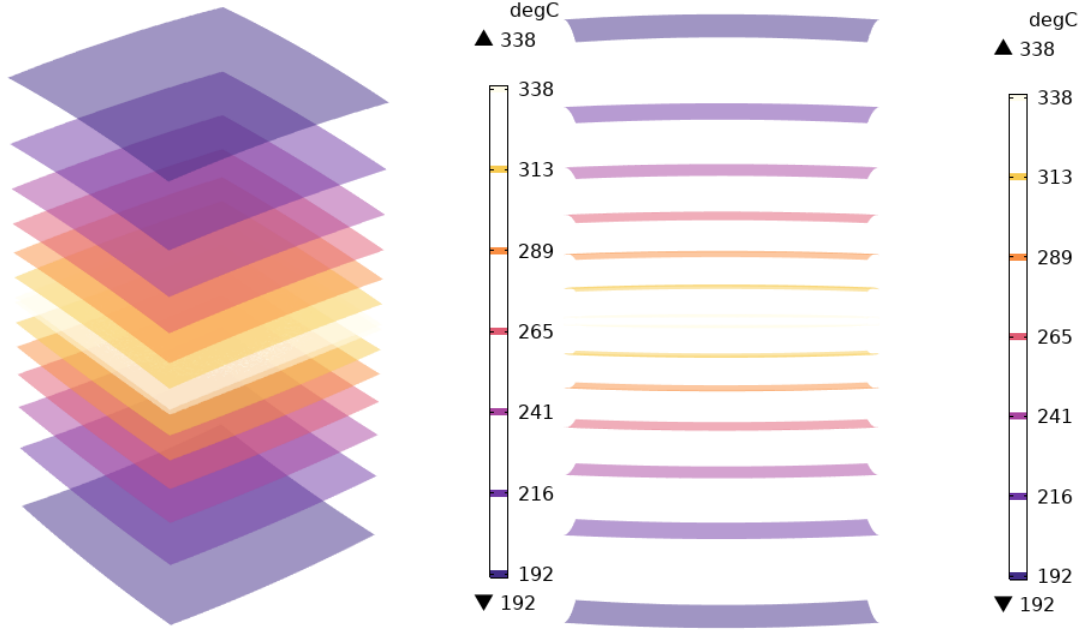
Şekil 6.4. Kompozit ve ısıtma elemanlarının tasarım ve genel ağ yapısı.

Yukarıda tanımlanmış geometri ve sınır koşullarına bağlı olarak elde edilen sıcaklık dağılımları ise Şekil 6.5'te gösterilmektedir. Daha önce uygulanan tel ısıtma analizlerinde elde edilen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında maksimum sıcaklık seviyesi 349 °C olarak belirlenmiştir.

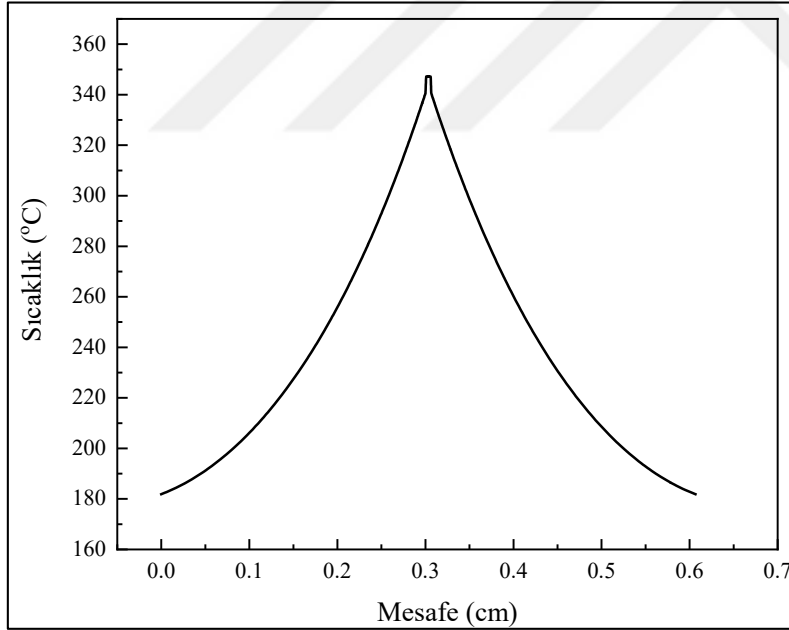
Bununla birlikte kompozit plakalar kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde ısıtma elemanlarının ulaştığı maksimum sıcaklık seviyesi 347 °C olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte kompozit plakaların ulaştığı maksimum sıcaklık seviyesi ise 340 °C seviyelerinde kalmıştır. Kompozit plakaların kalınlık boyunca oluşan sıcaklık seviyeleri de büyük önem arz etmektedir. Burada kaç katman boyunca ilgili malzemenin operasyon sıcaklık seviyelerine ulaştığı noktasında yorumlamak mümkün olmaktadır. Tel analizlerinden görüldüğü üzere merkez lokasyonlar ile kenar lokasyonlar arasında sıcaklık farkları oluşabilmektedir. Bununla birlikte kompozit plakalar ile gerçekleşen analizlerde de benzer olarak köşe ve kenar bölgeler ile merkez bölge arasında sıcaklık farkları gözlenmektedir. Burada toplam sistem kalınlığı boyunca oluşan sıcaklık dağılımları ise isosurface çizim tekniği kullanılarak Şekil 6.6'da gösterilmiştir. İlgili şekilden de anlaşılacağı üzere isosurface sıcaklık dağılımları kalınlık kesiti boyunca neredeyse paralel olarak ilerlemiştir. Bu durum ilgili parçada homojen sıcaklık dağılımlarının elde edildiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. İlave olarak çalışılan malzemenin ısı iletim katsayı değeri düzlem içi eksenleri boyunca aynı alınmıştır. Bununla birlikte farklı örgü modellerinde bu durumun değişkenlik göstermesinde, bu sıcaklık seviyelerinde önemli bir değişiklik olabileceği aşikardır. Bu gösterime ilave olarak ilgili parçanın merkezinden geçecek şekilde belirlenen bir hat boyunca oluşan sıcaklık dağılımı da Şekil 6.7'da gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Tel ve kompozit plakanın sıcaklık dağılımları.



Şekil 6.6. Kesit boyunca oluşan sıcaklık dağılımlarının isosurface görüntüleri.

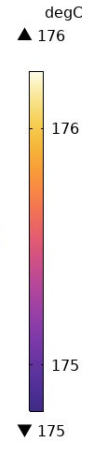
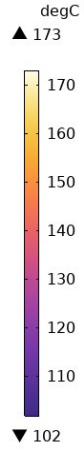
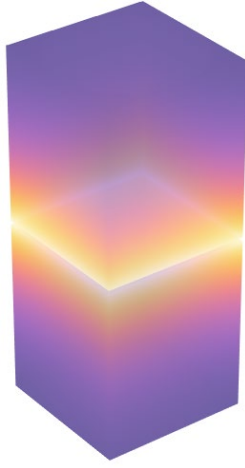


Şekil 6.7. Merkezde kalınlık boyunca oluşan sıcaklık seviyesi.

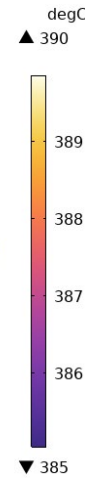
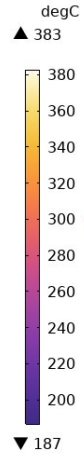
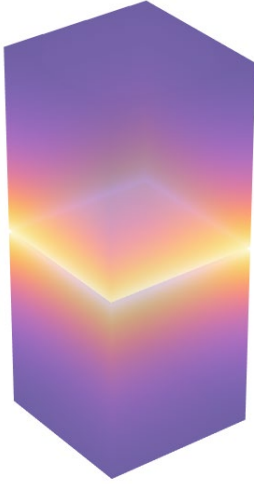
Yapılan simülasyon çalışmaları kapsamında ilave olarak DCB numunelerine uygulanan akım değerleri için kompozit plakalardaki sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Tel karakterizasyonu noktasında daha önce yapılan çalışmalar ışığında belirlenen akım-voltaj değerlerine istinaden parça üzerindeki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir.

DCB numunelerinin birleştirilmesinde ısıtma elemanı genişliği yaklaşık 76,2 mm (3 inç) olarak uygulanmıştır.

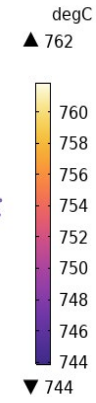
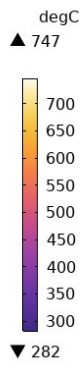
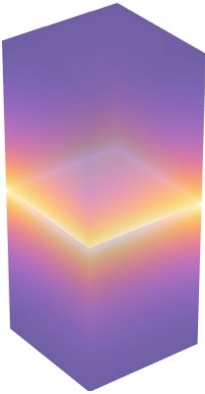
Isıtma elemanı genişliğinin değişmesi ile sistemden ölçülen voltaj değerleri, ilgili malzemenin direnç karakteristiğine bağlı olarak değişmektedir. Bu anlamda ilgili ısıtma elemanı yapısı için uygulanan güç yoğunluğu da değişkenlik göstermektedir. Elde edilen veriler ışığında analizlere ilgili güç yoğunlukları tanımlanmış ve analizler koşturulmuştur. Şekil 6.8(a-c)'de sırası ile 20, 40 ve 80 A için elde edilen sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Beklenildiği üzere artan akım değerlerine bağlı olarak oluşturulan güç yoğunlukları ile kompozit plakaların sıcaklık seviyeleri de artmaktadır. Analizlerde ulaşılan sıcaklık değerleri ile tel karakterizasyonu sürecinde ölçülen sıcaklık seviyeleri karşılaştırılmak gerekirse yaklaşık %10'luk bir fark elde edilmiştir. 20A akım için gerçekleştirilen simülasyonlarda maksimum tel sıcaklığı 176 °C elde edilirken tel karakterizasyon deneylerinde maksimum tel sıcaklığı 170 °C olarak belirlenmişti. Bununla birlikte 40A ve 80A akım uygulamalarında deneylerde sırası ile 368 °C ve 639 °C olarak tespit edilmiştir. Simülasyonlarda aynı akım değerleri için 390 °C ve 762 °C sıcaklıkları elde edilmiştir. Bununla birlikte alt ve üst kompozit plakaların merkezinden geçen hat için belirlenen sıcaklık seviyeleri de Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Burada oluşan bu fark ise ısıtma elemanlarının hacim değerlerinin hesaplanmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Teorik olarak hesaplanan hacim değerleri ile gerçekleştirilen analizlerde gerçek değerlerin girilmesi durumunda daha doğru sonuçlar elde edilebilecektir. Bunun için tellerin CT cihazları tarafı gerçek hacim değerleri belirlenebilir. Bu husus tezin ana konusu olmayıp ileriki çalışmalarda ele alınabilir.



a) 20A

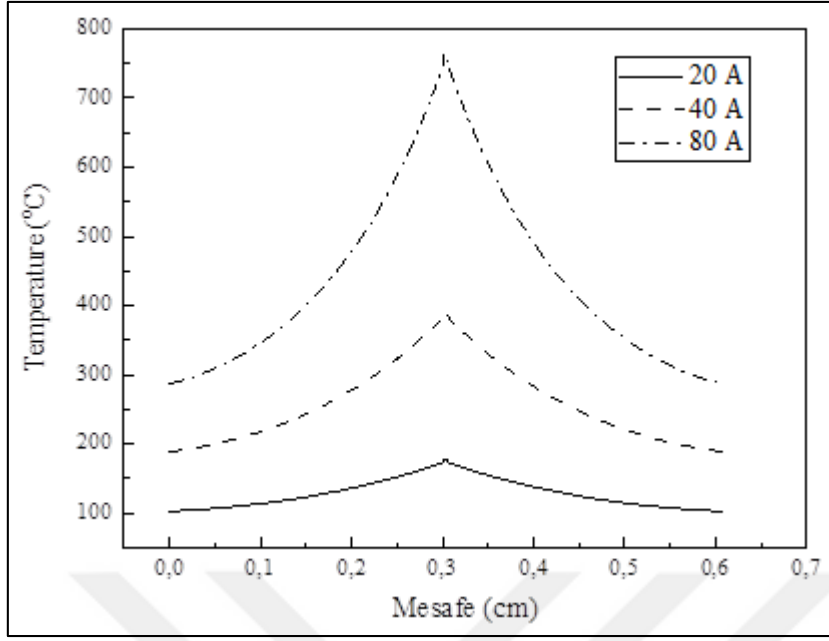


b) 40A



c) 80A

Şekil 6.8. Farklı güç değerleri için kompozit plakalardaki sıcaklık dağılımları.



Şekil 6.9. Farklı akım değerleri için kompozit plakalardaki sıcaklık değerleri.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuç

Bu tez kapsamında, termoplastik matrisli kompozit malzemelerin direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kullanılan ısıtma elemanlarının boyutlarının etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmaları gerçekleştirebilmek için direnç kaynağı düzeneği tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan parçalar üretilerek montajı sağlanmıştır.

Ticari olarak temin edilen 33, 45, 61, 91, 109 ve 154 μm örgü aralığına sahip ısıtma elemanlarının karakterizasyonu için ön çalışma yapılmıştır. Yapılan karakterizasyon sonucunda ısıtma elemanlarının sisteme verilen güç değerleri ile ulaştığı sıcaklık mertebeleri belirlenmiştir. Yapılan karakterizasyon çalışmalarıyla ilgili sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile ilgili bir regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Ticari olarak temin edilen TC1100 PPS malzemesinin operasyon sıcaklığına uygun olarak belirlenen 2 farklı akım değerlerinde 6 farklı boyutlara sahip ısıtma elemanlarıyla 60 adet bindirmeli kesme testi ve 60 adet çift konsol giriş testi için kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Kaynak yapılan numunelerin testleri gerçekleştirildikten sonra yüzey ve kesit görüntülemeleri dijital mikroskop ve stereo mikroskop vasıtasıyla alınmıştır. Çift konsol giriş testi numunelerinin DSC analizi yapılarak kristallenme oranları belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Tel karakterizasyonu çalışmalarında, ısıtma elemanlarının farklı genişlik ölçülerinde kesilerek sisteme verilen akım değerleri sonucu ulaştığı sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Isıtma elemanlarının ısıtılması için gerekli akım miktarının örgü aralığının artmasıyla lineer bir şekilde artmadığı görülmüştür. Yapılan çalışmada kullanılan ısıtma elemanlarının tel çaplarının artmasıyla birlikte örgü aralığının dengeli bir şekilde artmasıyla birlikte ısıtma elemanlarının istenilen mertebelerde ısıtılması için sisteme verilmesi gereken akım miktarının arttığı görülmüştür.

- Tel karakterizasyonu çalışmalarının sonucunda elde edilen sonuçlara göre regresyon analizi yapılarak, 160 mm uzunluğunda farklı genişliklerdeki ısıtma elemanlarına verilecek akım değerleri ile ısıtma elemanlarının ulaşacağı sıcaklık mertebelerini belirleyen model geliştirilmiştir.
- Bindirmeli kesme testi ve çift konsol kiriş testi için yapılan kaynak çalışmalarında bazı numunelerin orta bölgelerinin istenilen seviyede kaynamadığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak kaynaklanan numunelerin kenar bölgelerinde lokal erimeler oluşmasıyla birlikte, ısıtma elemanı üzerindeki akımın karbon fiber üzerinden devreyi tamamlayarak kısa devre oluşturduğunu ve ısıtma elemanının orta bölgesi üzerinde yeterli miktarda ısı üretilmediği için kaynama gerçekleşmediği görülmüştür.
- Tel karakterizasyonu çalışmaları sayesinde elde edilen parametreler ile kaynağı yapılan bazı numunelerin kaynak sırasında yeterli ısıyı oluşturmamasından dolayı kaynak yüzeyi istenilen boyutlarda kaynamamıştır. Bunun nedeni olarak ısıtma elemanlarına akım verilmesinin sağlayan bakır bloklar ile kompozit malzemeler arasındaki uzaklıktan dolayı ısıtma elemanı hava ile doğal taşınım ve ışınım ile ısı transferi yaptığı için sistemde ısı kaybı olmuştur. Literatürde bu durum kenar etkisi olarak açıklanmıştır.
- Bindirmeli kesme testi yapılan numuneler incelendiğinde, 91 µm örgü aralığına sahip ısıtma elemanı ve 15,6A akım değerinde yapılan kaynak numunesinin en iyi sonucu verdiği görülmüştür. 45 µm örgü aralıklı ısıtma elemanı ile yapılan kaynak çalışmasıyla sisteme verilen gücün artmasıyla kaynak mukavemet değerinin lineer bir şekilde artmadığı tespit edilmiştir.
- Örgü aralığının artmasıyla yapılan kaynak çalışmalarında temas eden ergimiş polimer yüzeyi artmasına rağmen telin kalınlığının artmasıyla birlikte mukavemet değerlerinin artmadığı görülmüştür.
- Çift konsol kiriş testi için üretilen numunelere bakıldığında farklı ısıtma elemanlarıyla yapılan kaynak ile birlikte farklı kristallenme oranları görülmüştür. Kristallenme oranı arttıkça Mod I: Tabakalar arası kırılma tokluğu değerinin arttığı tespit edilmiştir.

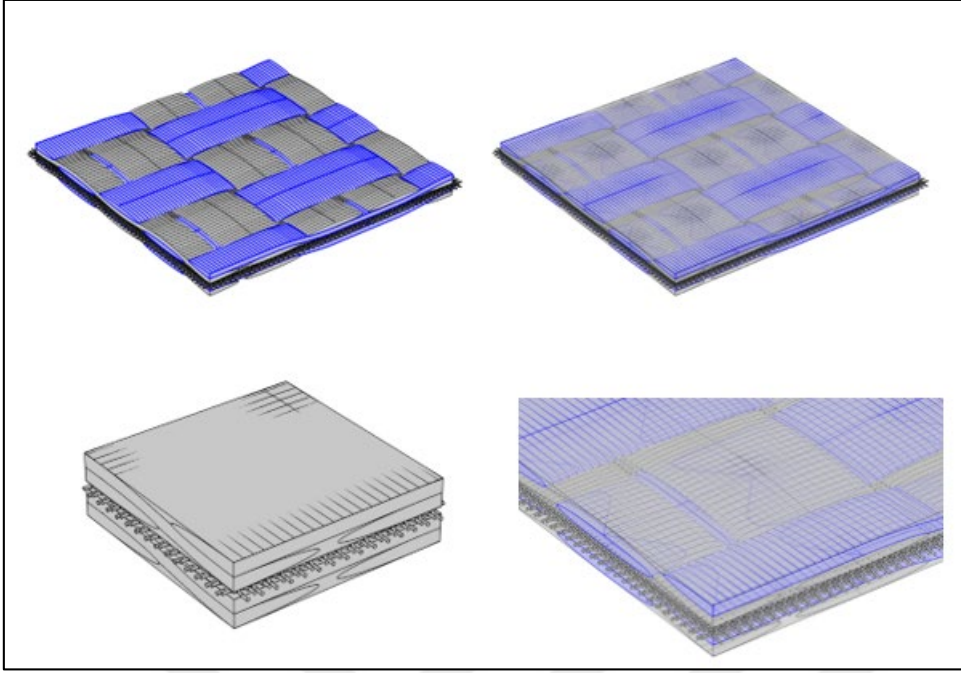
- Tel karakterizasyonu çalışmaları için yapılan sonlu elemanlar analizinde ısıtma elemanlarının bindirmeli kesme testi boyutlarında veya çift konsol kiriş testi boyutunda birebir yapılma durumunda altyapı yetersizliği olduğu için model oluşturulurken gerekli optimum tel miktarı belirlenmiştir. 20 tel olacak şekilde belirlenerek modeller oluşturulmuştur. Isıtma elemanlarına verilen güç değerleri birim hacimde sisteme verilerek ısıtma elemanı ve kompozit malzemeler üzerinde sıcaklık değerleri analiz edilmiştir. Oluşturulan model ile deneysel çalışmalar karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucu ile deneysel çalışmalar arasında %10'luk bir fark görülmüştür.

7.2. Öneriler

İlerleyen çalışmalarda akım sızıntısının önüne geçmek amacıyla, ısıtma elemanlarının arasında kompozit malzemelerle uyumlu dolgu malzemesi eklenerek kaynak işlemleri gerçekleştirilebilir. Isıtma elemanı film malzemelerle sandviç yapıda olacak şekilde kullanılabilir.

Kenar etkisinden dolayı sistemde oluşan ısı kaybının önüne geçmek amacıyla düzenek üzerinde bakır plakalar ile kaynak yapılan yüzey arasındaki mesafe kısaltılabilir.

Gelecek çalışmalar için Şekil 7.1'de gösterilen mesoscale modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizinde, mesoscale model ile birlikte örgü yapılı kompozit malzemelerin analizi detaylı bir şekilde gerçekleştirilecektir.



Şekil 7.1. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan mesoscale modeli

KAYNAKLAR

1. Pantelakis, S. (2020). Historical development of aeronautical materials. *Revolutionizing aircraft materials and processes*, 1-19.
2. Reis, J. P., de Moura, M., Samborski, S. (2020). Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair composites structures: A review. *Materials*, 13 (24), 5832.
3. Vodicka, R. (1996). Thermoplastics for airframe applications: A review of the properties and repair methods for thermoplastic composites. *DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory: Brooklyn, NY, USA*.
4. Vaidya, U. K., ve Chawla, K. K. (2008). Processing of fibre reinforced thermoplastic composites. *International Materials Reviews*, 53 (4), 185-218.
5. Zeyrek, B., Aydoğan, B., Dilekcan, E. (2022). Review of thermoplastic composites in aerospace industry. *International Journal on Engineering Technologies and Informatics*, 3, 1-6.
6. Barroeta Robles, J., Dubé, M., Hubert, P., Yousefpour, A. (2022). Repair of thermoplastic composites: an overview. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 8 (2), 68-96.
7. Gardiner, G. (2019). Accelerating thermoplastic composites in Aerospace. *Composites World*.
8. Stokes, V. K. (1989). Joining methods for plastics and plastic composites: an overview. *Polymer Engineering & Science*, 29 (19), 1310-1324.
9. Rudolf, R., Mitschang, P., Neitzel, M., Rueckert, C. (1999). Welding of high-performance thermoplastic composites. *Polymers & polymer composites*, 7 (5), 309-315.
10. Wedgewood, A. R., Hardy, P. E. (1996). Induction welding of thermoset composite adherends using thermoplastic interlayers and susceptors. *Technology Transfer in a Global Community*, 850-861.
11. Maguire, D. M. (1989). Joining thermoplastic composites. *Sampe Journal*, 25 (1), 11-14.
12. Benatar, A., ve Gutowski, T. G. (1986). Method for fusion bonding thermoplastic composites. *Sampe Quart*, 18 (1), 34-41.
13. Yousefpour, A., Hojjati, M., Immarigeon, J. P. (2004). Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic composite materials*, 17(4), 303-341.
14. Gehde, M., Giese, M., Ehrenstein, G. W. (1997). Welding of thermoplastics reinforced with random glass mat. *Polymer Engineering & Science*, 37(4), 702-714.

15. A. Chen, Y. S., ve Benatar, A. (1995). *Infrared welding of polypropylene*. In Technical Papers Of The Annual Technical Conference-Society Of Plastics Engineers Incorporated, 1235-1235.
16. Silverman, E., ve Griese, R. (1989). Joining methods for graphite/PEEK thermoplastic composites. *Sampe Journal*, 25, 34-38.
17. Grimm, R. A. (1995). Welding processes for plastics. *Advanced materials & processes*, 147 (3), 27-31.
18. Grimm, R. A. (1990). Fusion Welding Techniques for Plastics. *Welding Journal*, 23-28.
19. Vetter, J., Benende, V., Ehrenstein, G. W. (2000). Failure behaviour of extrusion welding seams made of thermoplastic plastics. *Schweissen und Schneiden (Germany)*, 52 (2), 90.
20. Hansch, D., Putz, H., Treusch, H. G. (1998). Joining hard and soft plastics with a diode laser. *Kunststoffe-Plast Europe*, 88 (2), 210-212.
21. Becker, F., Potente, H. (2002). A step towards understanding the heating phase of laser transmission welding in polymers. *Polymer Engineering & Science*, 42 (2), 365-374.
22. Duley, W. W., Mueller, R. E. (1992). CO₂ laser welding of polymers. *Polymer Engineering & Science*, 32 (9), 582-585.
23. Bachmann, F. G., Takahashi, R., Fujishima, S. (2000). *Micro materials processing with high-power diode lasers*. In First International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 4088, 220-223.
24. Stokes, V. K. (1988). Vibration welding of thermoplastics. Part IV: strengths of poly (butylene terephthalate), polyetherimide, and modified polyphenylene oxide butt welds. *Polymer Engineering & Science*, 28 (15), 998-1008.
25. Ageorges, C., Ye, L., Hou, M. (2001). Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32 (6), 839-857.
26. Stokes, V. K., Poslinski, A. J. (1995). Effects of variable viscosity on the steady melting of thermoplastics during spin welding. *Polymer Engineering & Science*, 35 (5), 441-459.
27. Stokes, V. K. (1988). Analysis of the friction (spin)-welding process for thermoplastics. *Journal of Materials Science*, 23, 2772-2785.
28. Tappe, P., Potente, H. (1989). *New Findings in the Spin Welding of Plastics*. In Annual Technical Conference/Society of Plastics Engineers (ANTEC '89), 710-715.
29. Tappe, P., Potente, H. (1989). New results on the spin welding of plastics. *Polymer Engineering & Science*, 29 (23), 1655-1660.

30. Benatar, A., Gutowski, T. G. (1989). Ultrasonic welding of PEEK graphite APC-2 composites. *Polymer Engineering & Science*, 29 (23), 1705-1721.
31. Taylor, N. S., Watson, M. N. (1988). Welding techniques for plastics and composites. *Joining Mater*, 70-73.
32. Kenney, W. E. (1992). Designing plastic parts for ultrasonic assembly. *Machine Design*, 64 (10), 65-68.
33. Liu, S. J., Chang, I. T., Hung, S. W. (2001). Factors affecting the joint strength of ultrasonically welded polypropylene composites. *Polymer Composites*, 22 (1), 132-141.
34. Benatar, A., Eswaran, R. V., Nayar, S. K. (1989). Ultrasonic welding of thermoplastics in the near-field. *Polymer Engineering & Science*, 29 (23), 1689-1698.
35. Yousefpour, A., Hojjati, M., Immarigeon, J. P. (2004). Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 17 (4), 303-341.
36. Contreras, F., Trillo, E. A., Murr, L. E. (2002). Friction-stir welding of a beryllium-aluminum powder metallurgy alloy. *Journal of Materials Science*, 37, 89-99.
37. Schwartz, M. M. (1994). Joining of composite-matrix materials. *ASM International*, 35-88.
38. Sanders, P. (1987). Electromagnetic welding: an advance in thermoplastics assembly. *Materials & Design*, 8 (1), 41-45.
39. Yarlagadda, S., Fink, B. K., Gillespie Jr, J. W. (1998). Resistive susceptor design for uniform heating during induction bonding of composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 11 (4), 321-337.
40. Wise, R. (1997). Welding Plastics. *Design Engineering*, 27-30.
41. Spain, K. D. (1999). High frequency plastic welding. *High Frequency Plastic Welding, Society of Manufacturing Engineers*, 99 (128), 1-20.
42. Varadan, V. K., Varadan, V. V. (1991). Microwave joining and repair of composite materials. *Polymer Engineering & Science*, 31 (7), 470-486.
43. Ageorges, C., Ye, L. (2002). Fusion bonding of polymer composites. *Springer Science & Business Media*. 1-41.
44. Lambing, C. L. T., Don, R. C., Andersen, S. M., Holmes, S. T., Leach, B. S., Gillespie Jr, J. W. (1991). Design and manufacture of an automated resistance welder for thermoplastic composites. *Antec*, 91, 2527-2531.
45. Xiao, X., Hoa, S. V., Street, K. N. (1994). Repair of thermoplastic resin composites by fusion bonding. *Compos Bond*, 1227, 30.

46. Stavrov, D., Bersee, H. E. N. (2005). Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (1), 39-54.
47. Shi, H., Villegas, I. F., Oceau, M. A., Bersee, H. E., Yousefpour, A. (2015). Continuous resistance welding of thermoplastic composites: Modelling of heat generation and heat transfer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 70, 16-26.
48. Shi, H., Villegas, I. F., Bersee, H. E. (2015). *A study of process induced voids in resistance welding of thermoplastic composites*. In 20th International Conference on Composite Materials.
49. Shi, H., Fernandez-Villegas, I., Bersee, H. E. (2011). *Modelling of heat transfer and consolidation for thermoplastic composites resistance welding*. In Proceedings of the ICCM International Conferences on Composite Materials, 21-26.
50. Warren, K. C., Lopez-Anido, R. A., Freund, A. L., Dagher, H. J. (2016). Resistance welding of glass fiber reinforced PET: Effect of weld pressure and heating element geometry. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35 (12), 974-985.
51. Zhao, G., Chen, T., Xia, X., Zhao, Y., Liu, C., Jian, X., Xu, J. (2023). Resistance welding of thermoplastic composites with nanofiber films prepared by electrospinning technique. *Composites Part B: Engineering*, 251, 110473.
52. Rohart, V., Lebel, L. L., Dube, M. (2020). Effects of environmental conditions on the lap shear strength of resistance-welded carbon fibre/thermoplastic composite joints. *Composites Part B: Engineering*, 198, 108239.
53. Xiong, X., Wang, D., Ren, R., Zhao, P., Cui, X., Ji, S. (2021). Improved mechanical properties of resistance welded joints of thermoplastic composites by versatile graphene oxide. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35 (10), 1099-1113.
54. Xiong, X., Wang, D., Wei, J., Zhao, P., Ren, R., Dong, J., Xu, C. (2021). Resistance welding of thermoplastics by carbon nanotube-grafted heating element. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35 (16), 1806-1819.
55. Talbot, E., Hubert, P., Dubé, M., Yousefpour, A. (2013). Optimization of thermoplastic composites resistance welding parameters based on transient heat transfer finite element modeling. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26 (5), 699-717.
56. Zhang, G., Lin, T., Luo, L., Zhang, B., Qu, Y., Meng, B. (2021). Multi-objective optimization of resistance welding process of GF/PP composites. *Polymers*, 13 (15), 2560.
57. Eveno, E. C., Gillespie JR, J. W. (1988). Resistance welding of graphite polyetheretherketone composites: an experimental investigation. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1 (4), 322-338.

58. Zammar, I., Huq, M. S., Mantegh, I., Yousefpour, A., Ahmadi, M. (2017). A three-dimensional transient model for heat transfer in thermoplastic composites during continuous resistance welding. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 3 (1), 32-41.
59. Ageorges, C., Ye, L., Hou, M. (2000). Experimental investigation of the resistance welding for thermoplastic-matrix composites. Part I: heating element and heat transfer. *Composites Science and Technology*, 60 (7), 1027-1039.
60. Ageorges, C., Ye, L., Hou, M. (2000). Experimental investigation of the resistance welding of thermoplastic-matrix composites. Part II: optimum processing window and mechanical performance. *Composites Science and Technology*, 60 (8), 1191-1202.
61. Russello, M., Catalanotti, G., Hawkins, S. C., Falzon, B. G. (2020). Welding of thermoplastics by means of carbon-nanotube web. *Composites Communications*, 17, 56-60.
62. Dubé, M., Hubert, P., Yousefpour, A., Denault, J. (2007). Resistance welding of thermoplastic composites skin/stringer joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38 (12), 2541-2552.
63. Hou, M., Ye, L., Mai, Y. W. (1999). An experimental study of resistance welding of carbon fibre fabric reinforced polyetherimide (CF Fabric/PEI) composite material. *Applied Composite Materials*, 6, 35-49.
64. Dubé, M., Hubert, P., Gallet, J. N., Stavrov, D., Bersee, H. E., Yousefpour, A. (2012). Metal mesh heating element size effect in resistance welding of thermoplastic composites. *Journal of Composite Materials*, 46 (8), 911-919.
65. Jakobsen, T. B., Don, R. C., Gillespie Jr, J. W. (1989). Two-Dimensional thermal analysis of resistance welded thermoplastic composites. *Polymer Engineering & Science*, 29 (23), 1722-1729.
66. Yuan, Q., Hou, M., Mai, Y. W., Ye, L. (2001). Resistance welding of carbon fiber reinforced polyetherimide composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 14 (1), 2-19.
67. Colak, Z. S., Sonmez, F. O., Kalenderoglu, V. (2002). Process modeling and optimization of resistance welding for thermoplastic composites. *Journal of Composite Materials*, 36 (6), 721-744.
68. Bates, P. J., Tan, S., Zak, G., McLeod, M. (2009). Shear strength and meltdown behavior of reinforced polypropylene assemblies made by resistance welding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40 (1), 28-35.
69. Barbosa, L. C. M., de Souza, S. D. B., Botelho, E. C., Cândido, G. M., Rezende, M. C. (2019). Fractographic evaluation of welded joints of PPS/glass fiber thermoplastic composites. *Engineering Failure Analysis*, 102, 60-68.

70. Panneerselvam, K., Aravindan, S., Haq, A. N. (2012). Study on resistance welding of glass fiber reinforced thermoplastic composites. *Materials & Design*, 41, 453-459.
71. Koutras, N., Villegas, I. F., Benedictus, R. (2018). Influence of temperature on the strength of resistance welded glass fibre reinforced PPS joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 105, 57-67.
72. Rohart, V., Lebel, L. L., Dubé, M. (2020). Improved adhesion between stainless steel heating element and PPS polymer in resistance welding of thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, 188, 107876.
73. Brassard, D., Dubé, M., Tavares, J. R. (2019). Resistance welding of thermoplastic composites with a nanocomposite heating element. *Composites Part B: Engineering*, 165, 779-784.
74. Bing, D. U., Liming, C. H. E. N., Houchang, L. I. U., Qinghao, H. E., Weiming, Q. I. N., Weiguo, L. I. (2020). Resistance welding of glass fiber reinforced thermoplastic composite: Experimental investigation and process parameter optimization. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33 (12), 3469-3478.
75. Xiong, X., Zhao, P., Ren, R., Zhang, Z., Cui, X., Ji, S. (2020). Enhanced resistance-welding hybrid joints of titanium alloy/thermoplastic composites using a carbon-nanotube lamina. *Diamond and Related Materials*, 101, 107611.
76. Redmann, A., Damodaran, V., Tischer, F., Prabhakar, P., Osswald, T. A. (2021). Evaluation of single-lap and block shear test methods in adhesively bonded composite joints. *Journal of Composites Science*, 5 (1), 27.
77. Hou, M., Yang, M., Beehag, A., Mai, Y. W., Ye, L. (1999). Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composite using alternative heating element. *Composite Structures*, 47 (1-4), 667-672.
78. Eveno, E. C., Gillespie Jr, J. W. (1989). Experimental investigation of ultrasonic welding of graphite reinforced polyetheretherketone composites. *Advanced Materials: the Big Payoff*, 923-934.
79. Quazi, M. M., Ishak, M., Fazal, M. A., Arslan, A., Rubaiee, S., Aiman, M. H., Manladan, S. M. (2021). A comprehensive assessment of laser welding of biomedical devices and implant materials: Recent research, development and applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 46(2), 109-151.
80. Chen, H., Li, S., Wang, J., Ding, A. (2021). A focused review on the thermo-stamping process and simulation progresses of continuous fibre reinforced thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109196.



Gazili olmak ayrıcalıktır