

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**METALLERLE ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK
KOMPOZİTLERİN SICAK BASKI YÖNTEMİ İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak KILIÇ

Makina Mühendisliği

Malzeme ve İmalat Lisansüstü Programı

MAYIS 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**METALLERLE ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK
KOMPOZİTLERİN SICAK BASKI YÖNTEMİ İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Burak KILIÇ
(503161307)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Lisansüstü Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat VURAL
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali Taner KUZU**

MAYIS 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503161307 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Burak KILIÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "METALLERLE ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN SICAK BASKI YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Murat VURAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Dr. Öğr. Üyesi Ali Taner KUZU**
Işık Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ali PINARBAŞI**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Canan Gamze GÜLERYÜZ.....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 13 Mayıs 2022
Savunma Tarihi : 25 Mayıs 2022





Nida'ya,



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca desteklerini her zaman hissettiğim başta danışmanım Prof. Dr. Murat Vural ve eş danışmanım Dr. Ali Taner Kuzu'ya, aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Mayıs 2022

Burak KILIÇ





İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. MOTİVASYON.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Mekanik Birleştirme Yöntemleri	5
2.2. Adezif Yapıştırma	6
2.3. Kendinden Delici Perçinleme (SPR)	7
2.4. Mekanik Kenetleme (MC)	8
2.5. Sürtünme Tabanlı Yöntemler.....	9
2.5.1. Sürtünme bindirme kaynağı (FLW).....	10
2.5.2. Sürtünme nokta birleştirmesi (FSpJ)	11
2.5.3. Sürtünme destekli birleştirme (FAJ).....	12
2.5.4. Sürtünme perçinleme (FricRiveting)	13
2.5.5. Ultrasonik kaynak (USW)	14
2.6. İndüksiyon Kaynağı (IW)	16
2.7. Lazerle Birleştirme (LDJ)	17
2.8. Sıcak Baskı Yöntemi (HPJ)	18
3. DENEY DÜZENEGİ	21
3.1. Malzemeler ve Numune Hazırlama	24
3.2. Deneyin Yapılışı	24
3.3. Mekanik Testler	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi ve Öncül Testler	28
4.2. Sonlu Elemanlar Analizi ve Yeni Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	31
4.3. İyileştirilmiş Parametrelerle Yapılan Testler ve İlk Birleştirmeler.....	34
4.4. Fikstür Tasarımının İncelenmesi.....	36
4.5. Birleştirme Parametrelerinin Sıyırılma Kuvvetine Etkisi	40
4.6. Farklı Yüzey Varyasyonlarının Sıyırılma Kuvvetine Etkisi	43
4.6.1. Birleşme Yüzeyinde Lazerle Doku Oluşturma	44
4.6.2. Isıl İşleme Metal Yüzeyindeki Oksidasyonu Arttırma	47
5. SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	51



KISALTMALAR

AMFP	: İleri Mekanik Sabitleme Yöntemleri
CF	: Karbon Elyaf
CFRP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
CNT	: Karbon Nanotüp
FAJ	: Sürtünme Destekli Birleştirme
FricRiveting	: Sürtünmeli Perçinleme
HPJ	: Sıcak Baskı Birleştirmesi veya Sıcak Baskı Yöntemi
FLW	: Sürtünme Bindirme Kaynağı
FSLW	: Sürtünme Karıştırma Bindirme Kaynağı
FSpJ	: Sürtünme Nokta Kaynağı
FSW	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
GF	: Cam Elyaf
GF30 PA66	: %30 Cam Elyaf Takviyeli Poliamit 6.6
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer
IW	: İndüksiyon Kaynağı
LAMP	: Lazer Destekli Metal ve Plastik Birleştirmesi
LDJ	: Lazerle Birleştirme
MC	: Mekanik kenetleme
PA	: Poliamid
PA6	: Poliamid 6 (Naylon 6)
PA66	: Poliamid 6.6 (Naylon 6.6)
PBT	: Polibütilen Tereftalat
PE	: Polieter
PEEK	: Polietereterketon
PP	: Polipropilen
SPR	: Kendinden Delici Perçinleme
TPU	: Termoplastik Poliüretan
TMIP	: Termomekanik Kenetleme Yöntemleri
TMJP	: Termomekanik Birleşme Yöntemleri
USW	: Ultrasonik Kaynak



SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece
μ	: Mikro
Hz	: Hertz
kg	: Kilogram
mm	: Milimetre
N	: Newton
s	: Saniye
<i>t</i>	: Zaman
<i>t_c</i>	: Soğutma süresi
<i>t_h</i>	: Isıtma süresi
<i>t_t</i>	: Toplam süre
<i>T</i>	: Sıcaklık
<i>T_g</i>	: Camsı geçiş sıcaklığı
<i>T_i</i>	: Ara yüzey sıcaklığı
<i>T_m</i>	: Erime sıcaklığı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1: Çeşitli termoplastiklerin ısıl özellikleri	24
Çizelge 4. 1: Öncül testlerde kullanılan parametreler.	28
Çizelge 4. 2: Deney parametreleri.	34
Çizelge 4. 3: Farklı fikstür tasarımlarının sıyırılma kuvvetine etkisi.	38
Çizelge 4. 4: Varyans Analizi (ANOVA) tablosu.	40
Çizelge 4. 5: Al 1050 ile gerçekleştirilen deneyler	43
Çizelge 4. 6: İndüksiyon kaynağında kullanılan genel yüzey işlemleri.	44
Çizelge 4. 7: Optimize parametreler.	46
Çizelge 4. 8: Lazerle doku oluşturulmuş numunelerin birleştirilmesi.....	47
Çizelge 4. 9: Tavlanmış metal ile gerçekleştirilen deneyler.....	48



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1: Cıvatalı birleştirmede etkiyen kuvvetler.	5
Şekil 2. 2: Metal / kompozit birleştirme tiplerinden bazıları.....	6
Şekil 2. 3: SPR aşamaları.	8
Şekil 2. 4: Mekanik kenetleme ile birleştirmenin aşamaları.	9
Şekil 2. 5: Sürtünme bindirme kaynağı.	11
Şekil 2. 6: Sürtünmeli perçinleme aşamaları.	13
Şekil 2. 7: Ultrasonik kaynak yönteminin ana bileşenleri.	15
Şekil 3. 1: Deney düzeneğinin temel bileşenleri.....	21
Şekil 3. 2: Deney düzeneği.	23
Şekil 3. 3: Termal kamera ile ısı ölçümü.	25
Şekil 3. 4: Çekme testinin yapılışı.	26
Şekil 4. 1: 230 °C ve 5 bar basınçta gerçekleştirilen deney numunesi.	29
Şekil 4. 2: 150 saniye ısıtma süresine sahip deney numunesine ait görüntü.	29
Şekil 4. 3: 12, 14 ve 16 numaralı numuneler.	30
Şekil 4. 4: Öncül testlere ait çeşitli numuneler.	31
Şekil 4. 5: Sonlu elemanlar analizi için kullanılan model.	32
Şekil 4. 6: Ara yüzeyde sıcaklığın zamanla değişimi.	33
Şekil 4. 7: 26 numaralı test numunesi.....	34
Şekil 4. 8: 260 °C, 2 bar ve $th = 30 s$ 'de gerçekleştirilen test numunesi.....	35
Şekil 4. 9: 270 °C, 2 bar ve $th = 30 s$ 'de gerçekleştirilen test numunesi.....	35
Şekil 4. 10: 280 °C, 2 bar ve $th = 30 s$ 'de gerçekleştirilen test numunesi.....	35
Şekil 4. 11: Geleneksel fikstür tasarımı.	36
Şekil 4. 12: Deneyde kullanılan fikstür tasarımı.	39
Şekil 4. 13: 260 °C, 270 °C ve 280 °C için Zaman – Sıyırılma Kuvveti grafiği.	41
Şekil 4. 14: 260 °C, 270 °C ve 280 °C için Basınç – Sıyırılma Kuvveti grafiği.	42
Şekil 4. 15: Farklı desen türleri. Sırasıyla dikey, yatay ve kare.	45
Şekil 4. 16: Dikey desen mikroskopik görüntüsü.	45
Şekil 4. 17: Kare desen mikroskopik görüntüsü.	46



METALLERLE ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN SICAK BASKI YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Farklı malzemelerin birleştirilmesi, mühendislik açısından ilgi çekici ve zorlu bir konudur. Günümüzde metallerin elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerle birleştirilmesi ve hibrit yapılar olarak kullanılması, başta otomotiv ve havacılık endüstrileri olmak üzere oldukça yaygındır.

Bu çalışmanın literatür bölümünde metallerin elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerle birleştirilmesi alanındaki çalışmaların bir özeti sunulmuştur. Bu özetle farklı malzemeleri birleştirmek için kullanılan geleneksel yöntemler ve ileri birleştirme yöntemleri incelenmiştir. Sık kullanılan yöntemlerin tarihinden, çalışma prensiplerinden, yöntem parametrelerinden, avantajlarından ve dezavantajlarından bahsedilmiştir.

İleri birleştirme yöntemlerinden Sıcak Baskı Birleştirmesi (HPJ), diğer termomekanik birleştirme yöntemleri arasında ucuz olmasıyla öne çıkan oldukça güncel bir termomekanik birleştirme yöntemidir. Günümüzde diğer yöntemlerin bir çoğuna kıyasla çok az çalışmaya rastlanmaktadır.

Bu tez kapsamında termoplastik matrisli cam elyaf takviyeli kompozit olarak GF30 PA66 ve metal olarak da AISI 304 paslanmaz çelik seçilmiş ve bu malzemelerin ilgili sıcak baskı tekniği kullanılarak birleştirilmesi incelenmiştir. Malzemelerin fiziksel özellikleriyle ilgili ilave bilgi verilmiştir.

Oluşturulan deney düzeneğinde sıcak baskı yönteminin parametreleri olan baskı kuvvetini, sıcaklığı ve uygulama zamanını kontrol etmek mümkündür. Deney düzeneği ve testin yapılışıyla ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak seçilen çeşitli sıcaklık (220 – 260 °C arasında), basınç (2 – 6 bar arasında) ve zaman (30 – 180 saniye arasında) değerlerinde öncül deneyler gerçekleştirilmiştir.

Öncül deneyler sonlu elemanlar analizi ile desteklenerek iyileştirilmiş test parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler; sıcaklık için 260, 270 ve 280 °C, basınç için 2, 4 ve 6 bar, ısıtma süresi için 15 ve 30 saniye ve soğutma süresi için de 30 saniye'dir. Testler belirlenen iyileştirilmiş test parametreleri ile tekrarlanmış ve bulgular tartışılmıştır.

Fikstür tasarımı tartışılmış ve fikstür tasarımı için dört farklı koşul belirlenmiştir. Bu koşulların birleştirme kalitesine olan etkisi yeni deneyler gerçekleştirilerek incelenmiştir. Sonuçlar tüm koşullar için tartışılarak en iyi fikstürleme koşulu sunulmuştur.

Testler en iyi fikstürleme koşulu referans alınarak belirlenen iyileştirilmiş parametrelerle tekrarlanmıştır. Bu numuneler çekme testine tabii tutulmuş ve sıyırma kuvvetleri kaydedilmiştir. Deney parametrelerinin kaydedilen sıyırma kuvvetine olan etkisi varyans analizi (ANOVA) kullanılarak incelenmiş ve bu analiz sonucunda optimize deney parametrelerine ulaşılmıştır. Optimize deney parametreleri 4 bar - 280 °C ile 6 bar - 270 °C çifti olarak belirlenmiştir.

Varyans analizi sonucundaki bulgular tartışılmıştır. Buna göre belirlenen koşullar için sıcaklığın etkisi lineerdir ve birleşme kalitesi sıcaklık arttıkça artar. Öte yandan basınç için aynı durum söz konusu değildir. Belirlenen koşullarda gerçekleşen deneylerdeki sıyırma kuvveti değerleri; basınç arttıkça önce artan, daha sonra azalan bir çizgi izlemiştir. Sebep olarak birleşme alanındaki fişkırmaya bağlı olarak dayanımın azalması gösterilmiştir.

Deneyler, elde edilen optimize parametreleri ve en iyi fikstürleme koşulu uygulanarak Al 1050 alüminyum alaşımı için tekrarlanmıştır. Kaydedilen sıyırma kuvveti değerleri AISI 304 paslanmaz çelik ile yapılan birleşmelerle karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Farklı yüzey varyasyonlarının birleşme kalitesine etkisinden bahsedilmiştir. Yüzey varyasyonlarının sıyırma kuvvetine olan etkisi fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki ana başlıkta araştırılmıştır.

AISI 304 paslanma çeliğin birleşme alanı yüzeyinde lazer yardımıyla üç farklı desende doku oluşturularak yüzey enerjisi fiziksel olarak artırılmıştır. Elde edilen numunelerle yeni testler gerçekleştirilmiş ve bu birleşmelerin sıyırma kuvvetleri ölçülerek sonuçlar yorumlanmıştır.

Kimyasal işlem olarak tavlama belirlenmiştir. AISI 304 numuneler birleştirme işleminden önce 300 °C’de 30 dakika tavlansak metal yüzeyindeki oksidasyonun artırılması amaçlanmıştır. Bu numunelerle gerçekleştirilen deneyler sonucunda tavlamanın sıyrılma kuvvetine olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar ışığında Sıcak Baskı Birleştirmesi (HPJ) veya diğer adıyla Sıcak Baskı Yöntemi mevcut termomekanik birleştirme yöntemlerine göre ucuz ve hızlı bir yöntem olarak sunulmuştur.





INVESTIGATION OF JOINING METALS AND FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITES BY HOT PRESSING METHOD

SUMMARY

Joining dissimilar materials is an interesting and challenging topic for engineering. Today, joining metals with fiber-reinforced thermoplastic composites and using them as hybrid structures is very common, especially in the automotive and aerospace industries.

In the literature section of this study, a summary of the studies in the field of joining metals with fiber-reinforced thermoplastic composites is presented. Traditional methods and advanced joining methods used to join different materials are reviewed in this summary. The history, working principles, method parameters, advantages and disadvantages of frequently used methods are mentioned.

Hot Press Joining (HPJ), which is one of the advanced joining methods, is a newsworthy thermomechanical joining method that stands out among other thermomechanical joining methods due to its cheapness. Today, compared to most of the other methods, very few studies can be found.

Within the scope of this thesis, GF30 PA66 and AISI 304 stainless steel were selected as the thermoplastic matrix glass fiber reinforced composite and the joining of these materials using the hot pressure technique was investigated. Additional information is given about the physical properties of these materials.

It is possible to control the pressure force, temperature and application time, which are the parameters of the hot pressure method, in the created experimental setup. Detailed information about the experimental setup and the test procedure is given.

Preliminary experiments were carried out at various temperature (between 220 – 260 °C), pressure (between 2 – 6 bar) and time (between 30 – 180 seconds) values selected considering the studies in the literature.

Preliminary experiments were supported by finite element analysis and improved test parameters were determined. These parameters are; 260, 270 and 280 °C for temperature, 2, 4 and 6 bar for pressure, 15 and 30 seconds for heating time and 30 seconds for cooling time. The tests were repeated with the specified improved test parameters and the findings were discussed.

Fixture design is discussed and four different conditions for fixture design are determined. The effect of these conditions on the joint quality was investigated by performing new experiments. The results are discussed for all conditions and the best fixturing condition is presented.

The tests were repeated with improved parameters and the best fixturing condition. These samples were subjected to the tensile test and the shear force values were recorded. The effect of the experimental parameters on the shear force was analyzed using analysis of variance (ANOVA), and as a result of this analysis, optimized experimental parameters were reached. Optimized test parameters were determined as 4 bar - 280 °C and 6 bar - 270 °C pairs.

The findings as a result of the analysis of variance are discussed. Accordingly, for the conditions determined, the effect of temperature is linear and the quality of the joint increases as the temperature increases. On the other hand, the same is not the case for pressure. The shear force values in the experiments carried out under the specified conditions; As the pressure increased, it followed an increasing and then decreasing line. It has been shown that the strength decreases due to the bulging in the joint area as the reason.

The experiments were repeated for Al 1050 aluminum alloy by applying the obtained optimized parameters and the best fixturing condition. The shear force values were compared with the joints made with AISI 304 stainless steel and similar results were obtained.

The effect of different surface variations on the joint quality has been mentioned. The effect of surface variations on the shear force was investigated under two main headings, physical and chemical.

The surface energy of the AISI 304 stainless steel was physically increased by creating a texture in three different patterns with the help of laser on the surface of the junction area. New tests were carried out with the samples obtained and the results were interpreted by measuring the shear forces of these joints.

Annealing was determined as the chemical process. It was aimed to increase the oxidation on the metal surface by annealing AISI 304 samples at 300 °C for 30 minutes before joining. As a result of the experiments carried out with these samples, it was seen that annealing had a positive effect on the shear strength.

In the light of the results obtained, Hot Press Joining (HPJ) or Hot Press Method is presented as a cheap and fast method compared to existing thermomechanical bonding methods.





1. MOTİVASYON

Günümüzde çevre kirliliğinin en aza indirilmesi için otomobil ve uçaklarda karbon emisyonlarının ve yakıt tüketimlerinin düşürülmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca bir çok mühendislik uygulamasında da ağırlık azaltımı verimi arttıran bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Dolayısıyla başta otomotiv ve havacılık sanayi olmak üzere hafif yapılara ihtiyaç gittikçe artmaktadır. Birim ağırlığa oranla dayanımı yüksek bir malzeme ihtiyacı termoplastik kompozitlere olan ilginin de artması demektir. Ancak termoplastik kompozitler çoğu durumda tek başlarına kullanmak için yeterince dayanıklı değildir ve genellikle pratikte metal – elyaf takviyeli termoplastik kompozit birleştirilmesi şeklinde hibrit olarak kullanılmaktadır [1].

Mevcut ticari uçaklar %50'nin üzerinde elyaf takviyeli kompozitlerle Alüminyum ve Titanyum alaşımlarının birleştirildiği hibrit yapıları içerirler [2]. Ayrıca hafif yapıların kullanıldığı hemen her alanda bu yapılara ihtiyaç vardır. Biomedikal, mikro elektromekanik sistemler ve daha bir çok alan sayılabilir . Öte yandan elyaf takviyeli kompozitlerle metallerin birleştirilmesi termoplastiklerin doğası gereği zorlu bir konudur [3].

Bu tarz hibrit birleştirmeler için kullanılan geleneksel yöntemler; birleşme bölgelerinde gerilme yığılması oluşması, delme, temizleme gibi ekstra işlemler gerektirmesi gibi dezavantajları barındırırlar. Ayrıca ağırlık ekleyerek bu tarz birleştirmelerin en önemli avantajı olan ağırlık azaltılmasını da elimine ederler [2].

Bu sebepler göz önünde bulundurularak zaman içerisinde elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerle metallerin birleştirilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Söz konusu avantaj ve dezavantajlar, bu yöntemlerin önemli bir bölümü için tarihsel gelişimleri, çalışma prensipleri ve kullanım alanlarını de içerecek şekilde literatür özeti olarak sunulmuştur.

Termomekanik bir birleştirme yöntemi olan “Sıcak Baskı Yöntemi” diğer termomekanik birleştirme yöntemlerine özgü avantajları barındırırken diğer yöntemler

arasında ucuz bir yöntem ön plana çıkmaktadır. Sıcak Baskı Yöntemi ile birleştirmeye ilgili henüz çok az sayıda çalışma vardır ve yöntem bu anlamda geliştirilmeye açıktır. Farklı metal ve termoplastik kombinasyonları, farklı test parametreleri, farklı fikstür tasarımları ve metal yüzeyinde uygulanacak modifikasyonların birleştirme kalitesine etkisi gibi konular güncel birer araştırma konusudurlar.

Bu tez kapsamında ucuz ve hızlı bir termomekanik birleştirme yöntemi olan “Sıcak Baskı Yöntemi” kullanılarak metallerle elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin birleştirilmesi araştırılmıştır. Uygun bir fikstür tasarımı için inceleme yapılmış ve bu tasarımla gerçekleştirilen birleştirmelerin dayanımı incelenmiştir. Ayrıca birleşme kalitesine etki eden parametreler analiz edilmiştir. Bunlara ek olarak, termomekanik birleştirme yöntemlerinde sık olarak uygulanan metalin yüzey enerjisinin artırılması tekniği, fiziksel ve kimyasal olarak uygulanıp, birleşme kalitesine etkisi incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Termoplastikler ve/veya termoplastik kompozitlerin metallerle birleştirilmesi uzun yıllar boyunca mekanik sabitleme ve adeziv yapıştırma gibi geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilmiştir [1,4,5]. Günümüzde bu yöntemlerin doğası gereği karşılaşılan problemlere çözüm sunan bir çok alternatif yöntem bulunmaktadır. Bu teknikler “İleri Birleştirme Teknikleri” ya da “İleri Birleştirme Yöntemleri” adlarıyla anılmaktadır. İleri birleştirme yöntemlerinin bazıları geleneksel olarak kullanılan yöntemlerin zaman içerisinde mevcut teknoloji kullanılarak geliştirilmiş sürümleridir. Örneğin, ileride detaylıca bahsedilecek Kendinden Delici Perçinleme (SPR) günümüzde pek sık kullanılmayan perçinleme tekniğinin geliştirilmiş bir sürümüdür [6]. Öte yandan bir çok ileri birleştirme tekniği, metallerin metallerle birleştirilmesinde kullanılan geleneksel birleştirme ve kaynak yöntemlerinden miras alınan bilginin termoplastik kompozitlerle metaller gibi farklı malzemelerin birleştirilmesi için kullanılmasıyla sunulan yöntemlerdir. İleride detaylıca bahsedilecek İndüksiyon Kaynağı (IW), Ultrasonik Kaynak (USW) ve Lazerle Birleştirme (LDJ) bu tarz yöntemlere örnek verilebilir [7]. Bazı yöntemler ise termoplastiklerin termomekanik özelliklerini temel olarak yeni türetilmiştir. Örneğin, Sürtümlü Perçinleme (FricRiveting) bunlardan biridir [8]. Yukarıda ileri birleştirme tekniklerinin, birleştirme teknolojisinin gelişimine göre sınıflandırılmasına yönelik bir yaklaşım sunulmuştur. Ancak bir çok yöntem için bu sınıflar arasındaki yapı çok belirgin değildir. Bazı yöntemlerin birden fazla sınıfa dahil edilebileceği ve bu listeye hibrit yöntemlerin de eklenebileceği açıktır.

İleri birleştirme yöntemlerini genel olarak ele alan, bunu yaparken de bir farklı bir sınıflandırma sunan bir çok inceleme bulunmaktadır. Lambiase ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptığı incelemedeki sınıflandırma ileri birleştirme yöntemlerinin mekanizmalarını da açıklaması açısından önemlidir [9]. Bu çalışmaya göre ileri birleştirme yöntemleri ileri mekanik birleştirme yöntemleri (AMFP), termomekanik kenetleme yöntemleri (TMIP) ve termomekanik birleştirme yöntemleri (TMJP) olmak üzere üç ana başlıkta ele alınır.

İleri mekanik birleştirme yöntemleri (AMFP) Kendinden Delici Perçin (SPR) ve Mekanik Kenetleme (MC) gibi yalnız mekanik olarak olarak birleştirmeyi içerir ve bu yöntemler geleneksel yöntemlerden Mekanik Sabitlemenin devamı olarak görülebilir.

Avantaj olarak delik delme için fazladan bir işlem gerekmemesi, buna bağı olarak hızlı olmaları ve Mekanik Kenetleme (MC) için fazladan bir ağırlık getirmemeleri sayılabilir.

Termomekanik kenetleme yöntemleri (TMIP) ise Sürtünmeli Perçinleme (FricRiveting), Enjeksiyon Kenetlemeli Birleştirme (ICJ), Sürtünme Karıştırma Bindirme Kaynağı (FSLW) gibi yöntemleri içinde barındırır. Bu sınıftaki birleştirme yöntemleriyle yapılan birleştirmelerdeki birleştirme bölgelerinde belirgin bir deformasyon vardır ve bu sayede malzemelerin son haldeki durumlarında geometrik olarak bir kenetlenme elde edilmiştir.

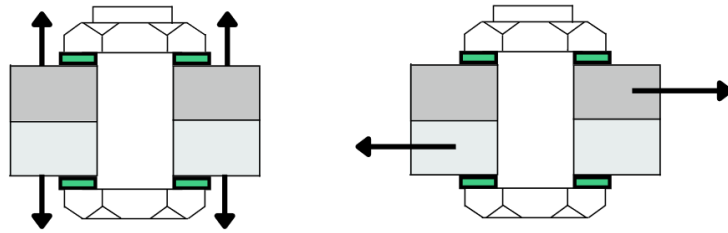
Termomekanik birleştirme yöntemlerinde (TMJP), termomekanik kenetleme yöntemlerinden (TMIP) farklı olarak birleşme bölgesinde belirgin bir bozulma gözükmez. Bunun yerine termoplastiklerin doğası gereği termal olarak birleştirilebilmesinden faydalanan yöntemler bir ısı kaynağı sayesinde mikro düzeyde kenetlemeyi sağlar [10]. Termomekanik birleştirme yöntemlerinde (TMJP), ısı kaynağı yöntemin adını belirler. Örneğin ısı kaynağı olarak lazer, sürtünme ya da ultrasonik teknolojileri kullanılabilir. Bu ısı kaynaklarını kullanan yöntemlere sırasıyla Lazer Birleştirmesi (LDJ), Sürtünme Destekli Birleştirme (FAJ) ve Ultrasonik Kaynak (USW) örnek gösterilebilir. Bu tür birleştirme yöntemlerinde mikro kenetlenme mekanizmalarının oluşturduğu dayanım diğerlerine göre çok zayıf kalacağından Termomekanik birleştirme yöntemlerinde (TMJP) genellikle metal yüzeyinin enerjisi artırılarak oluşturulan birleştirmelerin dayanımının artırılması amaçlanır [11].

Polimerler veya polimer kompozitlerle metallerin birleştirmesinde kullanılan yöntemler için bir çok başka sınıflandırma mevcuttur [7]. Ayrıca bazı yöntemler kendi içerisinde gruplandırılabilir ve/veya sınıflandırılabilir. Örneğin sürtünme tabanlı yöntemler, Lambiase ve arkadaşlarının çalışmasında kendi içerisinde Sürtünme Destekli Birleştirme (FAJ), Sürtünme Bindirme kaynağı (FLW), Sürtünmeli Perçinleme (FricRiveting), Sürtünme Nokta Kaynağı (FSpJ) ve Ultrasonik Kaynak (USW) olmak üzere beş bölümde incelenmiştir [12]. Anlaşılabilirlik göz önünde bulundurularak bu tez kapsamında sürtünme tabanlı yöntemler bu çalışmadaki gibi alt sınıflara ayrılmıştır.

2.1 Mekanik Birleştirme Yöntemleri

Basitliği nedeniyle, mekanik birleştirme yöntemleri (veya mekanik sabitleme), endüstrideki çeşitli malzemelerin birleştirilmesinde hala en popüler yöntemdir. Metallerin birleştirilmesi için geliştirilmiş olmasına rağmen, günümüzde benzer olmayan malzemeleri birleştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Vidalar, somunlar, cıvatalar ve rondelalar, mekanik bağlantı elemanlarının yaygın örnekleridir. Kalıcı ve kalıcı olmayan bağlantı elemanları, iki ana endüstriyel bağlantı elemanı türüdür. Kalıcı olmayan tutturucular, çıkarılabilen, değiştirilebilen ve yeniden kullanılabilen vidaları içerir. Ancak, ek montaj süresi nedeniyle bu parçalar ürün maliyetini artırır ve taşınması ve hizalanması daha zor olabilir. Sonuç olarak, kalıcı bağlantı elemanlarının kullanımını artmaktadır [13]. **Şekil 2.1**'de mekanik birleştirme yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan cıvatalı birleştirmede etkiyen kuvvetler gösterilmiştir.

Cıvatalı bağlantıların diğer birleştirme yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. En önemlileri şunlardır: montaj ve demontaj kolaylığı, parça değiştirme kolaylığı, onarım kolaylığı ve inceleme kolaylığı. Cıvatalı mafsallar çokça kullanılmasına ve bu tür avantajlara sahip olmasına rağmen önemli dezavantajları da vardır. Cıvatalı bağlantılarda, bir deliğin varlığından kaynaklanan gerilme yığılması önemli bir endişe kaynağıdır. Gerilme yığılması mekanik bağlantıların zayıf yönü olduğu için polimer matrisli kompozitlerin mekanik davranışı araştırma konusudur [14].



Şekil 2. 1: Cıvatalı birleştirmede etkiyen kuvvetler.

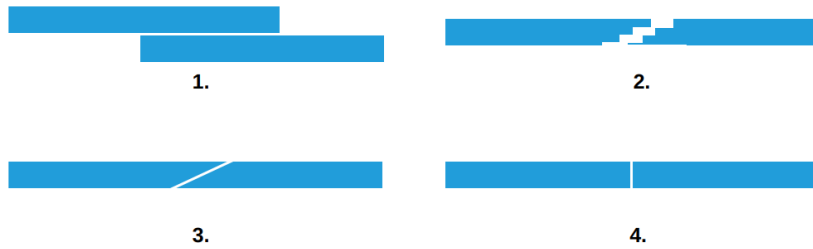
Gerilme yığılmasına ek olarak, cıvatalı bağlantıların bir diğer önemli dezavantajı, delme sonrasında yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltan elyaf sürekliliğinin kaybıdır [15,16]. Bu süreklilik kaybı metallerde olduğu gibi delik boyutlarıyla

ilişkilidir [17]. Elyaf süreksizliğine ek olarak delme işlemi zaman alan bir işlemdir. Ayrıca deliklerin delinmesi, delaminasyon, fiber çekilmesi ve mikroburkulma gibi istenmeyen hasarlara neden olur ve bunların tümü, yorulmaya karşı mukavemeti önemli ölçüde azaltır ve kompozitin uzun vadeli performansını etkiler [18]. Kompozitlerin civatalı bağlantı veriminin kompozitlerin ağırlık avantajını azalttığı için metallere göre daha kötü olduğu söylenebilir [19].

2.2 Adezif Yapıştırma

Adezif yapıştırma ya da kısaca yapıştırma, polimerleri ve kompozitleri metallere birleştirmek için yaygın olarak kullanılır. Termoplastikler için durum farklı olsa da termosetlerin ve termoset kompozitlerin metal ile birleştirilmesinde mekanik birleştirme ve/veya yapıştırma dışında bir yöntemin kullanılması mümkün değildir [20].

Şekil 2.2’de metal / kompozit birleştirmelerinde yapıştırmada da kullanılan bazı birleştirme türleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 2: Metal / kompozit birleştirme tiplerinden bazıları.

Bu yöntemin doğası gereği birçok dezavantajı olmasına rağmen, belirgin avantajları nedeniyle termoplastiklerin ve termoplastik kompozitlerin birleştirilmesinde de kullanılmaktadır. Bu avantajlar, nispeten kolay uygulama ve tasarım esnekliği olarak ifade edilebilir. Hemen hemen her tür plastiği başka herhangi bir malzemeyle birleştirmek mümkün olduğundan, çok yönlü bir birleştirme yöntemidir. Ek olarak, geleneksel üretim yöntemleriyle birleştirilmesi mümkün olmayan karmaşık polimer ve kompozit parçaları birleştirmek için adezif yapıştırma kullanılabilir. Örneğin, fiber takviyeli kompozitlerde mekanik birleştirme, genellikle fiberin kesilmesine ve dolayısıyla her ikisi de düzgün çalışmayı azaltan gerilme yığılmaları ortaya çıkmasına

neden olur. Öte yandan, yapıştırılmış bağlantılar daha sürekli ve mukavemet-ağırlık oranı, tasarım esnekliği ve üretim kolaylığı açısından avantajlar sunabilir [2].

Tipik bir adezif yapıştırma işlemi dört adımdan oluşur. Bunlar; yüzey hazırlığı, yapıştırıcıların uygulanması, yüzeylerin birleştirilmesi ve basınç ve/veya ısı uygulanması ve yapıştırıcının sertleşmesinin sağlanması veya solventin buharlaşarak kurumasına izin verilmesidir. Adezif yapıştırma ile birleştirme işlemi çok hassas olduğundan, gerekli mekanik özellikleri sağlamak için bu işlemin her adımı dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Her adımı titizlikle gerçekleştirme ihtiyacı, bu yöntemin ana dezavantajlarından biridir. Ayrıca her adım belirli bir süre alır. Örneğin, yapıştırma için gereken yüzey hazırlığı, yüzey yağının, gresin, tozun ve yüzey oksitinin giderilmesini içerir. Bu süreçlerin her biri aynı zamanda verimsiz ve doğa açısından yıkıcıdır [21]. Sonuç olarak, hem kompozit hem de metal elemanlarla düzgün çalışan bir yapıştırıcının seçimi ve yapıştırıcıyı yapıştırmak için uygun yüzey işleme yöntemi zorlu ve uğraştırıcı bir iştir.

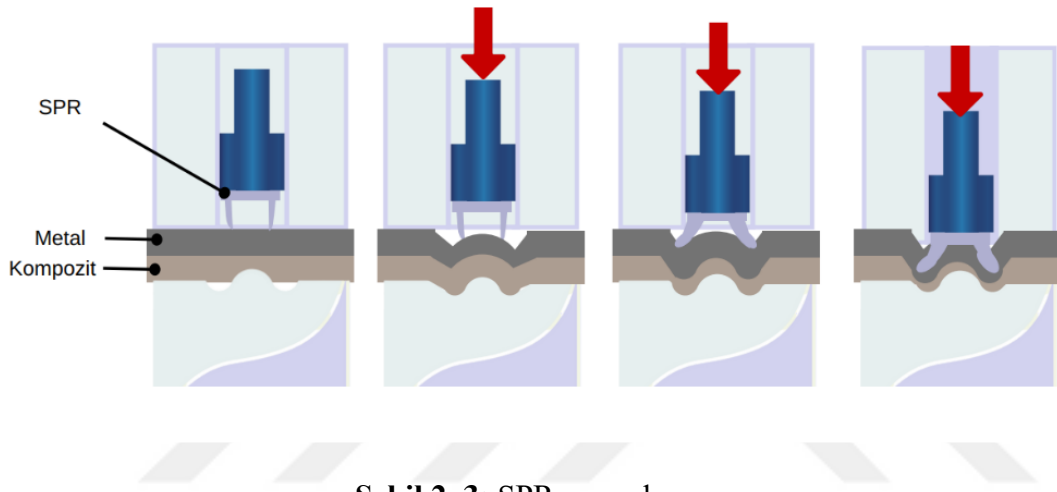
2.3 Kendinden Delici Perçinleme (SPR)

Kendinden delici perçinleme veya kısaca SPR, aynı veya farklı malzemelerden üst üste bindirilmiş iki levhanın, baskı sağlayan bir zımba yardımıyla çakılan bir perçin ile birleştirilmesi işlemidir ve yaygın olarak metal-polimer malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır [6,22–24]. Perçin üst malzemeyi tamamen, alt malzemeyi de kısmen deldiği için hem perçin hem de alt plaka plastik deformasyona uğrar. Böylece perçin, alt taraftaki kalıp sayesinde üst üste bindirilmiş malzemelerin altına uzanır ve işlem mekanik bir kilitleme ile sonuçlanır [25]. **Şekil 2.3**'te kendinden delici perçinlemenin aşamaları görülmektedir.

Kendinden delici perçinleme ile birleştirme yüksek montaj hızları nedeniyle geleneksel mekanik bağlantı elemanları ile birleştirmekten daha uygun maliyetlidir. Öte yandan perçinler, vida ve civataların aksine titreşimlere bağlı gevşemeye karşı daha az hassastır. SPR önceden delinmiş delikler gerektirmediğinden, tek bir adımda tamamlanarak üretim süresini ve maliyetlerini azaltır. Ancak perçinlemeden önce üst plakada bir delik açmak veya kesmek de bir seçenektir. Yüzeye ön işlem yapılmasına gerek yoktur. Yöntemin otomasyonunun kolay olduğu söylenebilir [26,27]. Ayrıca

SPR çok düşük gürültü seviyeleri sağlar ve duman vb. serpinti yaratmaz. Dolayısıyla operatör dostudur.

Diğer taraftan, perçinlerin birleşim yerleri cıvata ve vidalara göre daha düşük çekme ve yorulma dayanımlarına sahiptir [28]. Yöntemin diğer dezavantajları mekanik bağlantılarda da ortak görülen korozyon ve gerilme yığılması sorunlarıdır. SPR'nin elyaf takviyeli kompozit malzemelerin birleştirilmesi bağlamında en ciddi dezavantajı ise yöntem kaynaklı hasarlar gerçekleşebilmesidir ve bu nedenle de gevrek malzemeler için uygun olmamasıdır.



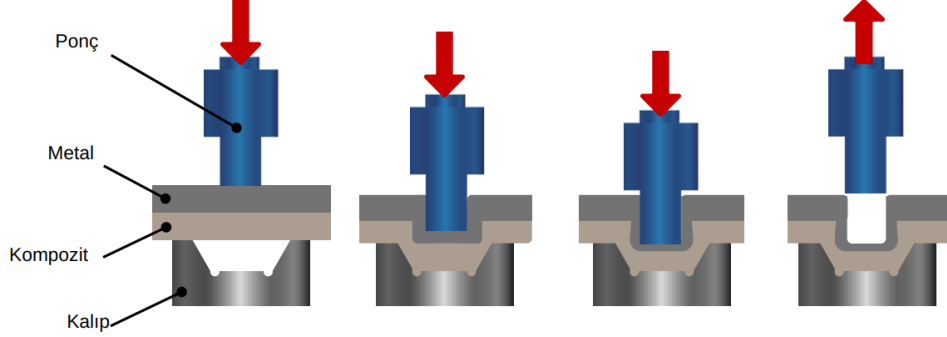
Şekil 2. 3: SPR aşamaları.

2.4 Mekanik Kenetleme (MC)

Mekanik kenetleme veya kısaca kenetleme, kompozitler gibi nispeten sünek malzemeleri birleştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Yaklaşık kırk yıldır otomotiv sektöründe ve “beyaz eşya” sektöründe yaygın olarak metalleri birleştirmek için kullanılmaktadır [29,30]. Audi A3'ün arka kapısının mekanik kenetleme yöntemiyle birleştirildiği bilinmektedir [31]. Bu teknik, yüksek mukavemetli çelikler ve alüminyum alaşımları gibi metal levhaları birleştirmek için geliştirilmiştir [32,33]. Daha sonra, elyaf takviyeli kompozitler gibi çeşitli malzemelerle metal birleştirilmesine uyarlanmıştır [34–38].

Kenetleme yönteminde iki veya daha fazla levha arasında plastik olarak şekil vererek mekanik bir kenetleme oluşturulur ve doğası gereği ek bileşenler olmadan birleştirme sağlanır. Şekil 2.4'te mekanik kenetleme yönteminin aşamaları gösterilmiştir. Panç

tarafındaki levha kenetleme sırasında önemli plastik deformasyona uğradığından, daha yüksek süneklığe sahip malzemenin kalıp tarafına yerleştirilmesi arzu edilir.



Şekil 2. 4: Mekanik kenetleme ile birleştirmenin aşamaları.

Yöntemin belirgin avantajları vardır. Bunlardan en önemlisi; ilave eleman gerektirmemesidir. Ek olarak termoplastik kompozitler için önceden delinmiş delikler ve/veya yüzey hazırlığı gerekli değildir. Bu avantajları sayesinde hızlı, düşük maliyetli ve hafif bir işlemdir [39]. En önemli dezavantajı ise doğası gereği plastik deformasyona uğraması ve bunun sonucunda dayanımda azalma olmasıdır.

2.5 Sürtünme Tabanlı Yöntemler

Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak boyunca hareket eden dönen bir aletin neden olduğu sürtünmeyle ısıtılan malzemenin plastik halde karıştırılmasıyla bir kaynak üreten birleştirme işlemidir. ISO/TR 25901-3:2016 'ya göre bir enerji taşıyıcı konsepti olarak bir kütle hareketini esas alan kaynak yöntemleri altında değerlendirilir [40]. Bu bağlamda ultrasonik kaynak (USW) ile benzer bir kaynak yöntemidir. Sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) işlemleri çeşitli şekillerde sınıflandırılır ve bu sınıflandırmalar genişletilebilir. Bu tez kapsamında sürtünme bindirme kaynağı (FLW) ve sürtünme nokta birleşmesi (FSpJ) olmak üzere iki ana başlık altında değerlendirilecektir. Ayrıca sürtünme karıştırma kaynak yöntemlerine benzer şekilde çalışan, ancak plastik şekil değiştirme olmaksızın sürtünmenin yarattığı ısının metalden kompozite geçmesiyle birleşmenin elde edildiği sürtünme destekli birleştirmeye (FAJ), sürtünmenin yarattığı ısı ile perçinlemeyi sağlayan sürtünmeli

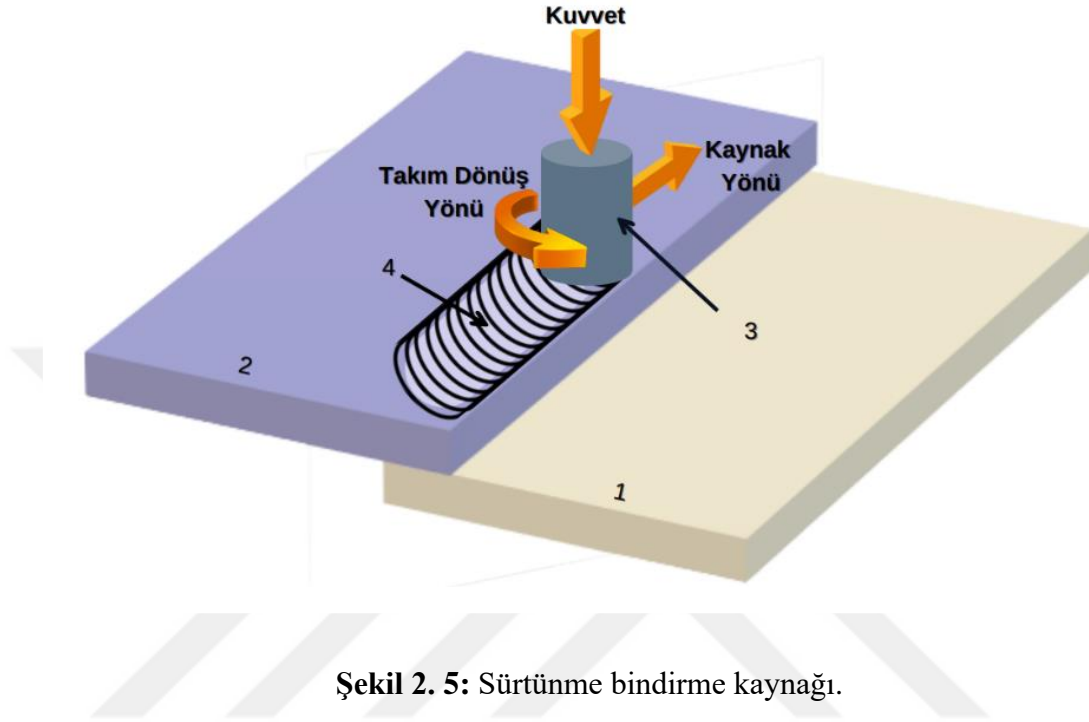
perçinlemeye (FricRiveting) ve yukarıda bahsedilen ultrasonik kaynağa (USW) da bu tez kapsamında sürtünme tabanlı yöntemler bağlamında yer verilmiştir.

Sürtünme nokta kaynağı (FSpJ) ve sürtünme bindirme kaynağı (FLW) arasında uygulanma açısından farklılıklar olmakla birlikte temelde ikisi de sürtünme karıştırma (FSW) kaynağını esas alır. FSW, 1991 yılında Birleşik Krallık'taki The Welding Institute (TWI)'de alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde geleneksel kaynak yöntemlerine alternatif olarak ve katı hal kaynak tekniği kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır [41–43]. Zaman içerisinde farklı metallerin ve alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı derinlemesine incelenmiştir [44–46]. İlerleyen zamanlarda uygulama listesine termoplastik ve termoplastik kompozitler gibi farklı malzemeler eklenerek kullanım alanları genişlemiştir [47–50]. Günümüzde metaller ve termoplastiklerin birleştirilerek bir dizi havacılık ve otomotiv uygulamasında kullanılmaktadır. Belirtmek gerekir ki, bu alandaki son gelişmeler sayesinde bu yöntemle yapılan bağlantıların dayanım değerleri erken araştırmalarda %47 iken, son çalışmalarda %99'a kadar yükselmiştir [51]. Bununla birlikte, termofiziksel davranıştaki değişikliklerin yanı sıra polimerlerin metallere kıyasla düşük termal iletkenliği nedeniyle, metaller üzerindeki sürtünme bindirme kaynağı ve sürtünme nokta birleştirmesi bilgisi tam olarak aktarılamaz. Zaman içinde polimerler için kullanılan sürtünme karıştırma yöntemleriyle ilgili detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [48,52].

2.5.1 Sürtünme bindirme kaynağı (FLW)

Sürtünme bindirme kaynağı (FLW), döner bir takım kullanarak sürtünme yoluyla ısı üretir ve alttaki malzemeyi yerel olarak yumuşatarak plastik şekil değişimi ile termomekanik bir kenetlenme sağlar. Dalma, bekleme (stabilizasyon), besleme (birleştirme) ve takım geri çekme aşamaları olmak üzere dört aşamada incelenebilir [53]. Dönme hızı, kaynak hızı, dalma derinliği, eğim açısı, takım profili, bu yöntemle yapılan birleştirmelerin kalitesini etkileyen parametrelerdir [52]. Bu ve diğer parametrelerin eklem kalitesi üzerindeki etkileri hakkında çok sayıda çalışma yapılmıştır [54–57]. Yöntemin önemli avantajları vardır. En önemlisi, doğası gereği daha az malzeme deformasyonu ve daha az gerilme yığılması ile sonuçlanan lokalize ve düşük enerji girdisi gerektirmesidir. Nispeten yüksek hızlı bir işlem ve

otomatikleştirilmesi kolaydır, böylece kaynak kusurları en aza indirilebilir [58]. Ayrıca FLW, kalite açısından hataları en aza indirdiğinden kalite güvence dostu bir yöntem olarak adlandırılabilir. Şekil 2.5'te yöntemin işleyişi gözükmemektedir.



Şekil 2. 5: Sürtünme bindirme kaynağı.

Avantajlarının yanı sıra, FSW'nin nispeten yüksek kuvvetlere ve kullanılan ekipmanın yüksek rijitliğine ihtiyaç duyduğu söylenebilir. Bu da yüksek yatırım maliyetlerine yol açar [59].

2.5.2 Sürtünme nokta birleştirmesi (FSpJ)

Sürtünme nokta birleştirmesinde (FSpJ) dönen bir takım, bindirme durumundaki malzemelere belirli bir miktarda dalarak termomekanik bir bağın oluşmasına neden olur. Yöntem sürtünme karıştırma kaynağının noktasal olarak uygulanmasından uyarlanmıştır [60,61]. Bu anlamda FLW'ye benzeyen olan FSpJ, dalma, bekleme, soğutma ve takım geri çekme olmak üzere dört aşamadan oluşur.

FSpJ, dikey olarak ileri geri hareket eden bir takımdan oluşur. Takım (bıçak) ve plastik malzeme arasında sürtünme ısısı oluşur. Bu ısı, kompozitin sınırlı termal iletkenliğinin bir sonucu olarak temasta birikir ve yerel bir sıcaklık artışına neden olur. Sıcaklık,

matrisin erime veya camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıktığında, nokta alanında ince bir erimiş veya yumuşatılmış polimer tabakası oluşur [62].

Dönme hızı, dalma derinliği, birleştirme süresi, birleştirme basıncı, kenetleme basıncı ve soğuma hızı, bazıları FLW'ye benzeyen kontrol edilebilen proses parametreleridir. Proses parametrelerinin FSpJ bağlantılarının mikro yapısı ve mekanik davranışı üzerindeki etkileri de çok sayıda çalışmada incelenmiştir [51,63,64].

FSpJ için; kısa birleştirme süreleri, otomatikleştirme kolaylığı ve kalite güvence dostu olması gibi FLW ile benzer avantajlardan bahsedebiliriz. Ağırlık tasarrufu sağlaması, işlem sonunda açık deliklerin olmaması, çevre temizliği ve onarılabirlik imkanları sunması, FLW ile birlikte FSpJ'nin diğer ortak avantajlarıdır [65].

FSpJ'de sınırlamalar ve dezavantajlar da yaygındır. İşlem yüksek kuvvetler altında gerçekleştirilir ve bu sebeple FSpJ takımının da yüksek sertliğe sahip olması gerekir. Ayrıca başlangıç ve işletme maliyetleri yüksektir, bağlantı geometrileri sınırlıdır ve bağlantı parçaları fiziksel ve kimyasal olarak birleştiğinden sökme ve yeniden birleştirme mümkün değildir [66].

2.5.3 Sürtünme destekli birleştirme (FAJ)

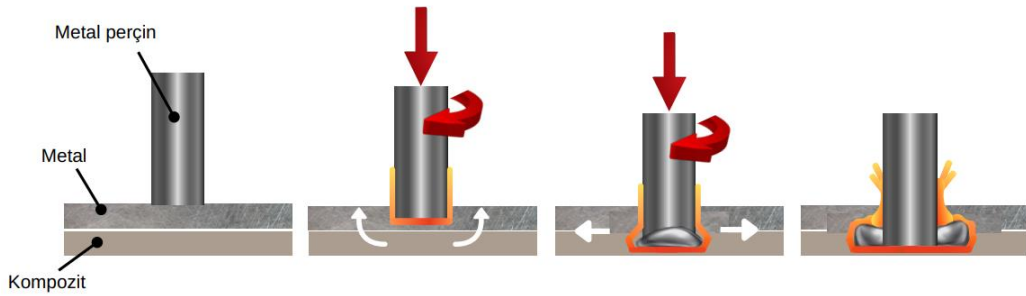
Sürtünme destekli birleştirme (FAJ), özellikle farklı malzemelerin birleştirilmesinde plastik olarak şekillendirerek mikro düzeyde mekanik kenetleme sağlayan bir yöntemdir. Yöntem genel anlamda sürtünme bindirme baynağı (FLW) ve sürtünme nokta birleştirmesine (FSpJ) çok benzerdir. Birleşme, sürtünme bindirme baynağı (FLW) ve sürtünme nokta birleştirmesi (FSpJ)'nin aksine mikro boyutta olduğu için genellikle işlem öncesi metalin yüzey enerjisi artırılarak birleşmenin de kalitesinin artırılması amaçlanır [12]. Aynı zamanda bu yöntemde baskı kuvveti ve tork, takımın malzemeye dalması için değil, birleşme için gereken ısıyı sağlamak için kullanılır. Böylelikle yöntem; dalma, bekleme ve takım geri çekme olmak üzere üç aşamada incelenebilir. Takım malzemesi FLW ve FSpJ'de olduğu gibi genellikle yüksek mukavemetli çelik veya Tungsten karbürdür.

Bu yöntem görece yeni olmakla birlikte bir takım çalışmalar mevcuttur. Sürtünme destekli birleştirme için yapılan çalışmalar polimerlerle metallerin birleştirilmesi

ağırlıklı olup yöntemin enerji verimliliği, çeşitli metallerle PEEK'in birleştirilmesi ve bu birleştirmelerin mekanik davranışları gibi konular incelenmiştir [67–69]. Ayrıca Lambiase ve arkadaşları sürtünme destekli birleştirme (FAJ) hibrit nümerik bir model sunmuştur [70]. Bununla birlikte, yöntem elyaf takviyeli kompozitler için de uygun olup karbon elyaf takviyeli kompozitlerle Alüminyum alaşımlarının mekanizmasını inceleyen çalışmalar mevcuttur [71]. Sürtünme destekli kaynak (FAJ), hızlı bir birleştirme teknolojisi olup termomekanik birleştirme konusundaki gelişmelerden faydalanmaya ve geliştirilmeye açıktır [72].

2.5.4 Sürtünmeli perçinleme (FricRiveting)

Sürtünmeli perçinleme, metal-polimer yapılarını birleştirmek için özel olarak Almanya'da Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) tarafından geliştirilmiştir ve hibrit metal-polimer yapılarını birleştirme yöntemi olarak FricRiveting adıyla 2009 yılında patentlenmiştir [8,73]. Bu yöntem, sürtünme ısısı kullanarak metal ve/veya termoplastik parçaları birleştirmek için silindirik bir perçin kullanır. Yöntem klasik bir CNC tezgahı dönüştürülerek kullanılabilir. **Şekil 2.6**'da yöntemin aşamaları görülmektedir.



Şekil 2. 6: Sürtünmeli perçinleme aşamaları.

FricRiveting günümüzde elyaf takviyeli termoplastiklerin metallerle kaynağı başta olmak üzere farklı malzemelerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [74–76]. Ayrıca yakın zamanda uçak sanayinde polimer-metal ve kompozit-metal bağlantıların yapılması bakımından kullanım alanı bulmuştur [77,78]. Yine günümüzde cam elyaf takviyeli kompozitleri Alüminyum alaşımlarıyla birleştirerek hafif köprü imalatında da kullanılması için fizibilite çalışması mevcuttur [79]. Buna

ek olarak can elyaf takviyeli termoset kompozitlerle metalleri de bu yöntemle birleştirmek mümkündür [80].

FricRiveting ile kendinden perçinleme yönteminin temel sorunlarından bazıları, hibrit bağlantıların kullanımına alternatif olarak geliştirilmiş bir kendinden perçinleme yöntemi olduğu için büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır. Açık deliklerle ilişkili çentik etkisinin varlığı nedeniyle, bu teknoloji ön delme gereksinimini ortadan kaldırarak işlem aşamalarının miktarını azaltır ve gerilim yığılması problemini en aza indirir. Sonuç olarak, bu teknoloji yüksek mekanik performanslı bağlantıların oluşturulmasını sağlar [81]. Yüzey hazırlığına gerek olmaması ve malzemede ön delme yapılmaması gibi bazı avantajlar SPR ile ortaktır. Bu nedenle bir çok yönteme kıyasla daha az montaj adımı vardır ve zaman kazandıran bir yöntem olarak kabul edilir.

2.5.5 Ultrasonik kaynak (USW)

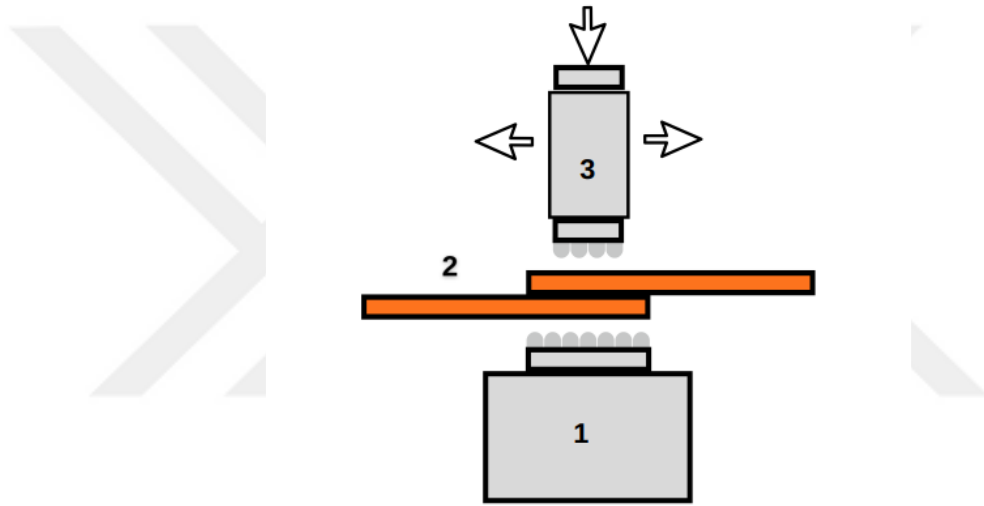
Ultrasonik (veya sesötesi) terimi, yaklaşık 20 kHz olan insan işitmesinin üst sınırından daha yüksek frekanslara sahip ses dalgalarını ifade eder. Ultrasonik kaynakta ultrasonik akustik titreşimler (20 - 80 kHz), katı hal kaynağı oluşturmak için basınç altında bir arada tutulan iş parçalarına lokal olarak uygulanır.

Ultrasonik kaynak (USW), 1955 yılında bir metal kaynak yöntemi olarak yeni yaratılmıştı ve hala araştırma ve geliştirme aşamasındaydı [82]. 60'lı yıllara gelindiğinde ultrasonik kaynakta birleşme mekanizması detaylı olarak açıklanmıştır [83]. Daha sonraki yıllarda ultrasonik kaynak mekanizması ihtiyaca uygun geliştirilerek çeşitli malzemelerin birleştirilmesi için uyarlandı. Örneğin 1976 - 1999 yılları arasında polimerlerin USW ile kaynağında bağlanma mekanizmalarını açıklayan çokça çalışma mevcuttur [84–87]. Polimerlerin USW ile kaynağını içeren çalışmalardan edinilen bilgi birikim ilerleyen zamanlarda geliştirilerek termoplastik kompozitlerin USW ile kaynağı ve tamiri için kullanılmaya başlamıştır [88–93]. Günümüzde USW, Alüminyum alaşımlarının karbon elyaf takviyeli kompozitlerle kaynağı başta olmak üzere metallerle termoplastik kompozitlerin birleştirilmesi için kullanılan yöntemlerden biridir [94–98].

Ultrasonik kaynak ekipmanının bileşenleri; güçlendirici, dönüştürücü, korna ve elektrik güç kaynağıdır. Çalışma prensibi kısaca, jeneratörden gelen elektrik sinyali

beslemesinin dönüştürücü tarafından alınıp malzeme arayüzüne katılmak üzere kornaya iletilecek olan mekanik titreşimlere dönüştürülmesi şeklindedir. **Şekil 2.7'**de yöntemin temel bileşenleri görülmektedir.

USW, yakın alan ve uzak alan ultrasonik kaynak olmak üzere şekilde ele alınır. Bağlantı arayüzünden kornaya 6 mm'den daha az bir mesafe varsa yöntem yakın alan ultrasonik kaynak olarak adlandırılır [99]. Tam tersi durumda, bağlantı arayüzü ile korna arasındaki mesafe 6 mm'den fazlaysa yöntem uzak alan ultrasonik kaynak olarak adlandırılır [100].



Şekil 2. 7: Ultrasonik kaynak yönteminin ana bileşenleri.

Kaynak kuvveti, titreşim genliği ve titreşim süresi, ultrasonik kaynak işleminde titreşim aşamasını belirleyen parametrelerdir. Titreşim frekansının her ultrasonik kaynak makinesi için önceden belirlenmiş bir değere sahip olduğu için genellikle bir parametre olarak ele alınmaz.

USW ile karmaşık kompozit parçaların metallere birleştirilmesi mümkündür. Aynı zamanda işlem esnasında herhangi bir duman ve ses üretimi olmadığı için operatör

güvenliği sağlanır. Enerji açısından son derecede verimli olduğu da göz önüne alındığında USW oldukça evre dostudur. Görece hızlı bir operasyon süresi vardır.

İşlem birleşmelerin kalitesi açısından ısı oluşumunu kontrol etmek için tasarlandığından, birleşmeler temizdir ve yukarı da belirtildiği gibi duman üretilmez. Bu avantajları sayesinde termoplastiklerin ultrasonik kaynağı, tıp endüstrisi, gıda endüstrisi gibi kontaminasyondan kaçınılan yerlerde tercih edilir.

Öte yandan yöntemin bazı dezavantajları mevcuttur. Bunlardan en önemlisi, büyük birleştirmelerde kullanılamaması ve büyük birleştirmelerde tek bir işlemde kaynak yapılamamasıdır. Ek olarak, özel tasarlanmış bağlantı elemanları gereklidir. Ayrıca, bazı durumlarda kaynak sisteminin bileşenleri maliyetli olabilir. Ultrasonik kaynak birleşimlerinde demontajın mümkün olmaması da önemli eksiklerindendir.

Günümüzde ultrasonik kaynak, rüzgar türbini, denizcilik, spor ve başta otomotiv olmak üzere diğer uygulamalar için kompozit üretim teknolojisinde en çok beklenen araştırma yönlerinden biridir. ve havacılık endüstrileri.

2.6 İndüksiyon Kaynağı (IW)

İndüksiyon kaynağı (IW), termoplastiklerin termomekanik olarak birleştirilebilme kabiliyetinden faydalanarak, metaller ve elyaf takviyeli termoplastik matrisli kompozitlerin birleştirilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Sürtünme tabalı yöntemlerden farklı olarak ısı üretmek için radyo frekansında (20 kHz–10 MHz) alternatif akım kullanarak elektromanyetik indüksiyon prensibi yardımıyla iki malzemenin ortak arayüzüne yerleştirilmiş bir implantı ısıtarak kaynak yapar [101].

İndüksiyon kaynağı ısıtma, basınç uygulama ve soğutma olmak üzere üç kısımda ele alınabilir. İlk olarak, indüktörün alternatif manyetik alanı metalik bileşeni ısıtır. Daha sonra numune tutucu, yumuşatılmış veya erimiş matris malzemesinin metalik yüzeyi nemlendirmesine ve metal bileşenin yüzey pürüzlerini doldurmasına izin vermek için iki parçanın birbirine bastırıldığı bileşene taşınır. Son olarak, üretilen bağlantı, termoplastik kompozitin camsı geçiş sıcaklığının altına soğutulur [102,103]. Genellikle diğer termomekanik birleştirmelerde olduğu gibi metal bileşen, bağlantı kalitesini

iyileştirmek için yüzey ön işleme tabi tutulur. Bu işlemler temizleme işlemleri ve mekanik, kimyasal ve fiziksel işlemler olarak sıralanabilir. İndüksiyon kaynağında ön işlemlerin yanı sıra tutma sıcaklığı, bekleme süresi ve soğuma hızı bağlantıların kalitesini etkileyen ana parametrelerdir [104,105].

İndüksiyon kaynağının ana avantajı yüksek esnekliktir [106]. Isı tesiri altındaki bölge (ITAB), termal birleştirmeyi içeren diğer kaynak yöntemlerine kıyasla küçüktür. İndüksiyon kaynağı aynı zamanda enerji açısından verimlidir, otomatikleştirilmesi kolaydır ve nispeten hızlıdır. Yönteme özgü implant maliyeti, optimizasyon maliyeti ve ek montaj işlemlerini içeren ek maliyetler yönteme özgü dezavantajlardır.

Günümüzde indüksiyon kaynağı, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın kullanılan bir yöntemdir [107]. Örneğin, BMW M3 CSL için, hafif arka koltuk arkılığı desteği indüksiyon kaynağı kullanılarak üretilmiştir [2]. Bir başka örnek de havacılık endüstrisinden; Gulfstream G650 uçağının termoplastik asansörleri ve dümeni indüksiyon kaynağı ile birleştirilmiştir ve örnekler çoğaltılabilir [108]. Metallerin ve termoplastik kompozitlerin indüksiyon kaynağı güncel bir araştırma konusudur [109].

2.7 Lazerle Birleştirme (LDJ)

Lazerle birleştirme (LDJ), ısı kaynağı olarak lazer kullanan termomekanik bir birleştirme yöntemidir. Lazerlerin bir çok kullanım alanı vardır ve kaynak bunlardan biridir. Yöntem, esasen metallerin kaynağından uygulanan lazer kaynağının sürekli dalga kullanan bir alt türü olarak lazer destekli metal ve plastik birleştirmesi olarak geliştirilmiştir ve LAMP adıyla da anılır [110–112]. Birleşme kalitesini etkileyen yöntem parametreleri; lazer gücü, ilerleme hızı, iş parçasına olana uzaklık ve fikstür basıncıdır [113,114].

Diğer termomekanik yöntemlerde olduğu birleşme kalitesini arttırmak gibi işlem öncesi metal yüzeyinin enerjisinin artırılması uygulamaları mevcuttur [7,115,116]. Diğer yöntemlerden farklı olarak lazerle birleştirme yerel ısı girdisi sağladığı için kaynak yapılan bölgede tam kontrol sağlarlar ve buna karşılık farklı tarama desenleri ile uygulanabilirler [117]. Yöntem doğru parametreler uygulandığında güçlü

bağlantıların elde edilmesini sağlar [115,118]. Düşük ısı girdisi sayesinde enerji açısından verimlidir ve galvaniz kaplı çelikler gibi yüksek ısı girdisinde yapısı bozulan malzemelerin elyaf takviyeli termoplastiklerle birleştirilebilmesini sağlar [119].

Yöntemin en büyük dezavantajı işletme maliyetlerine karşın ilk yatırım maliyetinin oldukça yüksek olmasıdır.

2.8 Sıcak Baskı Yöntemi (HPJ)

Sıcak baskı yöntemi (veya sıcak baskı birleştirmesi) ile termoplastik ve/veya termoplastik matrisli kompozitlerin kaynağı ile ilgili yapılan çalışmalar görece çok yenidir. Yöntem temel olarak ısıtılmış bir plakanın baskı ile ısı transferini metale, metalden de termoplastiğe olacak şekilde gerçekleştirilmesi ve metalle termoplastik arasında mikrokenetlenme mekanizmalarının oluşturulması sonucu iki malzemenin birleştirilmesine dayanır.

Klotzbach ve arkadaşları 2017'deki çalışmasında metal olarak paslanmaz çelik, yumuşak çelik ve alüminyum, kompozit olarak da %47 cam elyaf içeren PA6 kullanarak 400 °C'de ve farklı basınçlarda ve farklı yüzey işlemlerine tabii tutarak sıcak baskı yöntemi ve lazer kaynağı ile birleştirmişlerdir [116]. Bu çalışmada sıcak baskı yöntemi ve lazer kaynak arasında hız dışında belirgin bir fark gözlenmemiştir.

Hussein ve arkadaşları Al 6061-T6'nin PE ile kaynağını farklı sıcaklık, basınç ve süre için optimizasyonunu [120] ve Al 6061-T6'nin ayrıca PA ile [121] ve PA66, 1% CNT PA66 ve CF30 PA66 ile [122] sıcak baskı yöntemiyle birleştirilmesini araştırmışlardır. Al 6082'nin yüzey etkisinin PA6 ile kaynak kabiliyetine etkisi [123] ve Al 5052'nin yüzey etkisinin GF30 PBT ile kaynak kabiliyetine etkisi [124] de araştırılmıştır.

Havacılık sanayinde yaygın olarak kullanılan bir başka Alüminyum alaşımı olan AZ31'in cam elyaf takviyeli PA6 ve karbon elyaf takviyeli TPU ile kaynak kabiliyetleri araştırılmış [125,126] ve bu çalışmalarda farklı yüzey işlemlerinin yanı

sıra özellikle tavlamanın yüzeydeki oksit tabakasını arttırarak birleşme kabiliyetinin arttırıldığı sonucuna varılmıştır.

Uzay sanayi ve biomedikal uygulamalarda sık kullanılan Ti6Al4V'in %30 karbon elyaf takviyeli PEEK ile kaynağında metal yüzeyinde lazerle doku oluşturmanın etkisi araştırılmıştır [127]. Çalışmada kullanılan AISI 304 paslanmaz çeliğin PE ile sıcak baskı yöntemi kullanılarak birleştirilmesinde yüzey etkisi araştırılmıştır [128]. Yapılan literatür taramasında AISI 304 ile PA malzemelerinin sıcak baskı yöntemi ile birleştirilmesini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır.





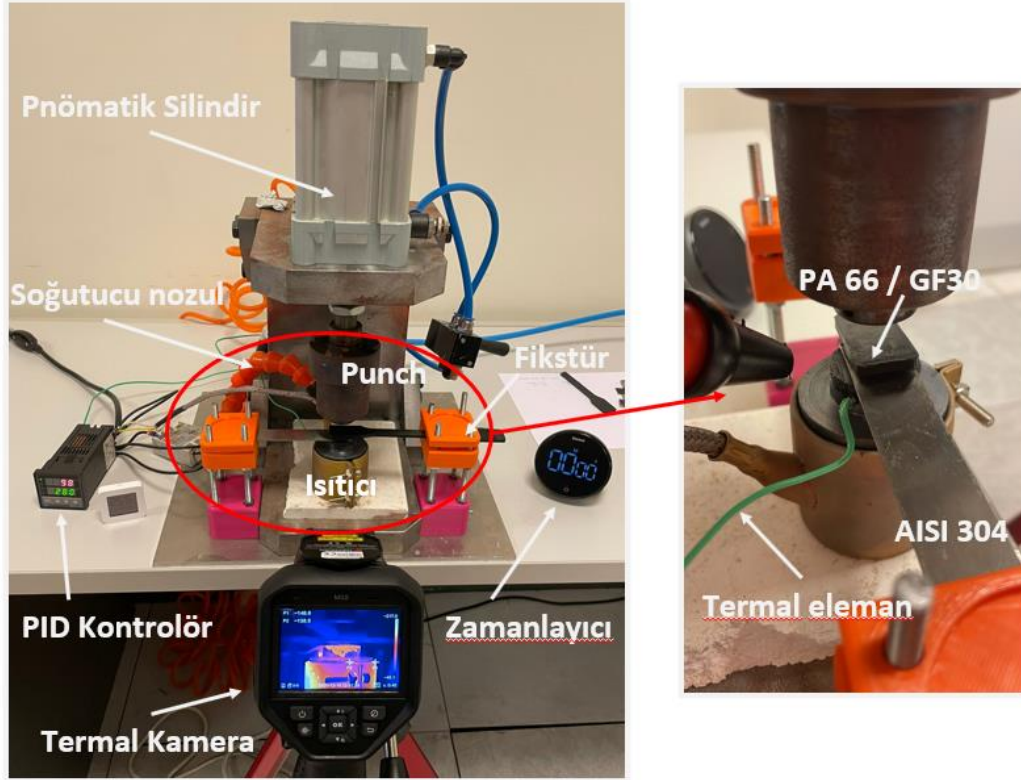
Deney düzeneğindeki bileşenlerin tamamı aşağıda listelenmiştir:

1. Isıtıcı Blok
2. Kelepçe Rezistans
3. Metal numune
4. Kompozit Numune
5. Panç
6. Pnömatik silindir
7. PID Kontrolcü
8. Termokupl
9. Vorteks tüpü
10. Fikstürler
11. Birinci kompresör
12. İkinci kompresör
13. Regülatör
14. 3/2 Pnömatik Valf
15. Zamanlayıcı
16. Sıcaklık ve nem ölçer
17. Termal kamera

Numuneler sıcaklık değeri ayarlanmış ısıtıcı blok üzerine uygun şekilde yerleştirildikten ve numune sabitleyicilere sabitlendikten sonra, sisteme bağlı valf çalıştırılarak numunelere ayarlanmış olan basınç değeri kadar baskı yapılması sağlanır. Aynı anda PID kontrolcü sisteme daha fazla enerji girmesini önlemek için kapatılır ve bir zamanlayıcı kullanılarak süre başlatılır. Soğutma başlayıncaya kadar geçen bu süre (t_h) boyunca birleşme alanı sıcaklığı artar.

Birleşmenin tamamlanması için birleşme bölgesinin sıcaklığının PA66'nın erime noktasının altına düşürülmesi gerekir. Bunun için birleşme alanı soğutma nozulu yardımıyla soğutulur. Bu işlem ikinci bir kompresör kullanılarak yapılır. Bu

kompresörden gelen basınçlı hava vorteks tüpü kullanılarak soğutulur ve soğutma nozulu vasıtasıyla birleşme alanına iletilir. Atmosfere açılan sıkıştırılmış havanın basıncı zamanla düşeceğinden soğutma nozulundan çıkan havanın sıcaklığı da zamanla artacak, ancak yine de GF30 PA66'nın erime noktasına göre çok düşük kalacaktır.



Şekil 3. 2: Deney düzeneği.

Sıcaklığı bu şekilde erime noktasının altındaki bir sıcaklığa düşürülen GF30 PA66 numune katılabilir ve böylelikle birleşme sağlanır. Testlerin tümünde soğutma süresi 30 saniyeyle sınırlandırılmıştır ($t_c = 30 s$). Bu süre katılma için yeterli süreyi sağlamaktadır. Soğutma işlemi biten test parçası numune sabitleyiciler çözülerek test düzeneğinden çıkarılır.

Operasyon süresi ısıtma süresi ve soğutma süresi toplamı kadardır ($t_t = t_h + t_c$). Operasyondan sonra test parçasına markalama işlemi yapılır ve test için oda sıcaklığına gelmesi sağlanır. Ortam sıcaklığı sonuçlara doğrudan etkisi olduğu gözlemlenmemiştir. Birleşme esnasındaki nem oranının bazı özel durumlarda birleşme kalitesine etkideğini gösteren çalışmalar mevcuttur. Ortam sıcaklığı ve nem oranı daha sonra değerlendirilmek üzere gözlenmiş ve not edilmiştir.

3.1 Malzemeler ve Numune Hazırlama

Bu çalışmada kompozit olarak PA66 matrisli %30 elyaf içeren bir cam elyaf takviyeli kompozit kullanılmıştır. Bu malzeme çalışmanın geri kalanında kısaca GF30 PA66 olarak anılacaktır. Termoplastik matris olarak polyamid 66, %30 cam elyaf içeren ürün, Tisan Mühendislik Plastikleri San. Tic. Ltd. Şti.'nin ürettiği Tislamid® B 30D03 K04 R01 adlı ticari ürünüdür. Yoğunluğu 1300 kg/m^3 'tür, erime noktası 260 – 265 °C arasındadır. Çeşitli termoplastiklerin ve çalışmada kullanılan GF30 PA66'nın ısı özellikleri **Çizelge 3.1**'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 3. 1: Çeşitli termoplastiklerin ısı özellikleri.

Fiziksel Özellikler	PP	PA6	PA66	GF30 PA66
Camsı geçiş sıcaklığı	-25 °C	49 °C	65 °C	66 °C
Erime sıcaklığı	126 °C	191 °C	235 °C	260 – 265 °C
Ayrışma sıcaklığı	390 °C	360 °C	390 °C	390 °C

Metal numune olarak testlerin çoğunluğunda AISI 304 östenitik paslanmaz çelik kullanılmakla birlikte bazı testler Alüminyum 1050 alaşımıyla tekrar edilerek test sonuçları gözlemlenmiştir. Çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri bir tablo halinde verilmiştir.

3.2 Deneyin Yapılışı

Yöntemin uygulama adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- PID kontrolcü yardımıyla ısıtıcı bloktaki sıcaklık istenilen dereceye ve birinci kompresörün çıkış basıncı istenen değere ayarlanır.
- Sıcaklığın belirlenen değere geldiği PID kontrolcü üzerinden okunur ve bu değer termal kamera ile doğrulanır. Termal kamera ile sıcaklık ölçümüne ait görüntü **Şekil 3.3**'te mevcuttur.
- Regülatörden gelen havanın basıncı regülatör yardımıyla deney basıncına düşürülür.

- Sistem ayarlanan sıcaklığı ulaştığında AISI 304 numune üstte olacak şekilde GF30 PA66 numune ile 20 mm²'lik bir alan oluşturacak şekilde üst üste bindirilerek ısıtıcı blok ile panç arasına yerleştirilirler ve fikstürleme işlemi gerçekleştirilir.
- Bir sonraki aşama 3/2 bir valf yardımıyla hareket ettirilen pançın prosesi başlatmasıdır. Valf çalıştırıldığı anda PID kontrolcü kapatılır ve kronometre yardımıyla süre tutulmaya başlanır. Belirlenen ısıtma zamanı sonunda belirli bir süre soğutma yapacak şekilde bir vorteks tüpü ikinci bir kompresör tarafından çalıştırılır.



Şekil 3. 3: Termal kamera ile ısı ölçümü.

Isıtıcı bloktan AISI 304 numuneye, AISI 304 numuneden GF30 PA66 numuneye gerçekleşen ısı transferi sonucu GF30 PA66 numunenin metalle temas ettiği alandaki sıcaklık değeri PA66'nın erime noktasına ulaştığında PA66 eriyerek birleşme alanını ıslatır ve birleşme başlar.

3.3 Mekanik Testler

Birleştirilen numune üniversal çekme cihazında çekme testine tabii tutulmuştur ve birleşmenin maksimum dayanımı ölçülmüştür. Bunun için, birleştirilen numune; çekme testi cihazının üst çenesine GF30 PA66, alt çeneye ise AISI 304 gelecek şekilde bağlanmıştır. İki malzemenin üst üste bindiği durumda eksen kaçıklığı oluşacağından

bu durumu sübvans etmek ve aksnel bir çekme testi yapılmasını sağlamak için alttaki çeneye ilave bir GF30 PA66 eklenmiştir. İlave parça ve AISI 304 arasındaki sürtünme kuvveti, birleşen alanın maksimum kuvvetinden çok daha fazla olduğu için ilave bir birleştirmeye gerek görülmemiştir. Test hazır durumdaki numune 10 mm/dak hızla hasara uğrayana kadar çekilmektedir. Şekil 3.4'te çekme testinin yapılışı görülmektedir.



Şekil 3. 4: Çekme testinin yapılışı.

Çekme esnasındaki anlık olarak uygulanan kuvvet ve uzama verileri zamana bağlı olarak grafikte gösterilir. Bütün numuneler 20x20 mm²'lik bir birleşme alanına sahiptir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Deney Parametrelerin Belirlenmesi ve Öncül Testler

Sıcak baskı yönteminde sıcaklık, baskı kuvveti ve zamanın arayüz dayanımını etkileyen üç temel parametre olduğu bilinmektedir. Metallerle termoplastik kompozitlerin -ve/veya termoplastiklerin- sıcak baskı yöntemi kullanılarak birleştirilmesinde ara yüzey sıcaklığı, termoplastiğin camsı geçiş sıcaklığının (T_g) ve erime sıcaklığının (T_m) arasında ve erime sıcaklığına (T_m) daha yakın değerlerde olduğu yapılan literatür taramasından anlaşılmaktadır. Bundan dolayı çalışmada kullanılan PA66 matrisli kompozit malzemenin, camsı geçiş sıcaklığının ($T_g = 66\text{ °C}$) üzerinde ve erime sıcaklığının ($T_m = 260\text{ °C}$) altında birleşme olup olmayacağını araştırılması için deney sıcaklıkları erime sıcaklığına yakın olacak şekilde 220 °C ve 260 °C arasında seçilmiştir. Sıcaklığın zamanın bir fonksiyonu olarak ara yüzeyin ulaşacağı sıcaklık değeri tezin ilerleyen aşamalarında detaylandırıldığı bir sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiştir. İki farklı malzemenin birleşmesindeki diğer önemli bir faktör olan baskı kuvveti veya uygulanan basınç değerleri çalışmada 2 ve 6 bar arasında seçilmiştir. Isıtma ve soğutma süreleri (t_h) ve (t_c), sırasıyla 15 – 120 saniye ve 15 – 30 saniye olacak şekilde belirlenmiştir. Bu şekilde operasyon süreleri (t_t) 30 – 180 saniye arasında tutulmuştur. **Çizelge 4.1**'de öncül testlerde kullanılan sıcaklık, basınç, ısıtma süresi, soğutma süresi ve toplam operasyon süresi özetlenmiştir.

Yapılan öncül çalışmalarda birleşme gözlenmemekle birlikte metal numune makroskopik olarak incelendiğinde kompozit numuneden eriyen PA66'nın bir miktarının metal yüzeyinde katılaştığı gözlemlenmektedir. **Şekil 4.1**'de 230 °C ve 5 bar'da gerçekleştirilen bir deneye ait ara yüzey fotoğrafında bu durum görülebilmektedir. Deney sonucunda birleşme olmayabileceği gibi, bazı durumlarda birleşme gerçekleşmiş ancak numunenin soğuma sonrası birleşmenin bozulduğu görülmüştür. Metal yüzeyinde kalan termoplastik malzeme incelenerek birleşme ile ilgili daha fazla bilgi elde edilmiştir.

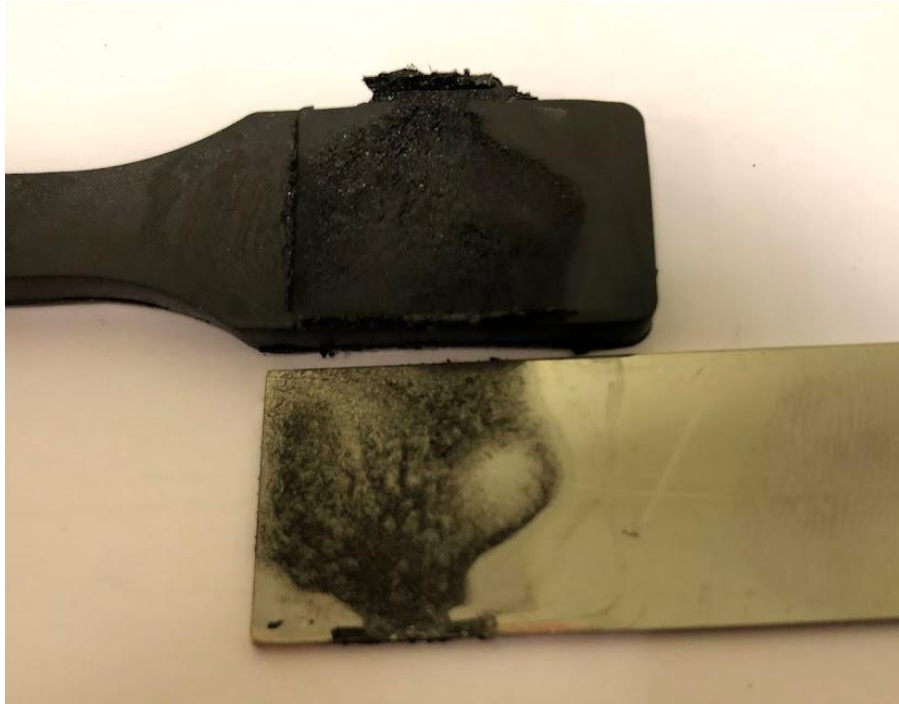
Çizelge 4. 1: Öncül testlerde kullanılan parametreler.

Sıcaklık	Basınç	Isıtma süresi	Soğutma süresi	Operasyon süresi
260 °C	3 bar	15 s	15 s	30 s
260 °C	3 bar	15 s	30 s	45 s
260 °C	3 bar	15 s	15 s	30 s
240 °C	3 bar	15 s	15 s	30 s
240 °C	4 bar	15 s	15 s	30 s
240 °C	5 bar	15 s	15 s	30 s
240 °C	6 bar	15 s	15 s	30 s
240 °C	6 bar	30 s	15 s	45 s
240 °C	6 bar	25 s	25 s	50 s
240 °C	4 bar	20 s	20 s	40 s
240 °C	4 bar	27 s	30 s	60 s
240 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s
240 °C	4 bar	25 s	25 s	50 s
200 °C	5 bar	90 s	30 s	120 s
230 °C	5 bar	45 s	30 s	75 s
230 °C	5 bar	30 s	30 s	60 s
220 °C	5 bar	90 s	30 s	120 s
250 °C	5 bar	30 s	30 s	60 s
240 °C	5 bar	45 s	30 s	75 s
250 °C	2 bar	30 s	30 s	60 s
260 °C	2 bar	15 s	30 s	45 s
240 °C	2 bar	15 s	30 s	45 s
240 °C	2 bar	20 s	30 s	50 s
230 °C	2 bar	15 s	30 s	45 s
220 °C	2 bar	30 s	30 s	60 s
220 °C	2 bar	20 s	30 s	50 s
220 °C	2 bar	45 s	30 s	75 s
220 °C	2 bar	60 s	30 s	90 s
220 °C	2 bar	30 s	30 s	60 s
220 °C	2 bar	45 s	30 s	75 s
220 °C	2 bar	60 s	30 s	90 s
230 °C	2 bar	30 s	30 s	60s
230 °C	2 bar	45 s	30 s	75 s
230 °C	2 bar	60s	30 s	90 s
260 °C	2 bar	30 s	30 s	60 s
260 °C	2 bar	30 s	30 s	60 s
260 °C	2 bar	15 s	30 s	45 s
260 °C	2 bar	15 s	30 s	45 s



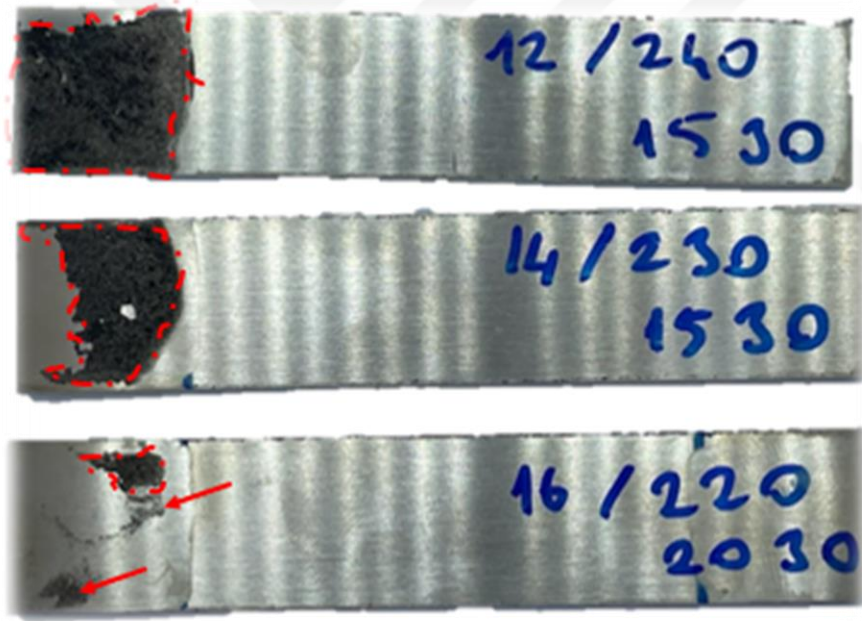
Şekil 4. 1: 230 °C ve 5 bar basınçta gerçekleştirilen deney numunesi.

Farklı parametrelerle yapılan birleştirme denemelerinde farklı birleşme yüzey alanlarının oluştuğu görülmüştür. Örneğin, **Şekil 4.1**'de görülen deney numunesi **Şekil 4.2**'deki numune ile aynı sıcaklık ve basınç parametrelerine sahip olmakla birlikte, ısıtma süresi olarak 150 saniye seçilmiştir. Görüldüğü gibi artan sıcaklık ile beraber metal numune üzerinde katılaşan malzeme miktarında bir artış söz konusudur.



Şekil 4. 2: 150 saniye ısıtma süresine sahip deney numunesine ait görüntü.

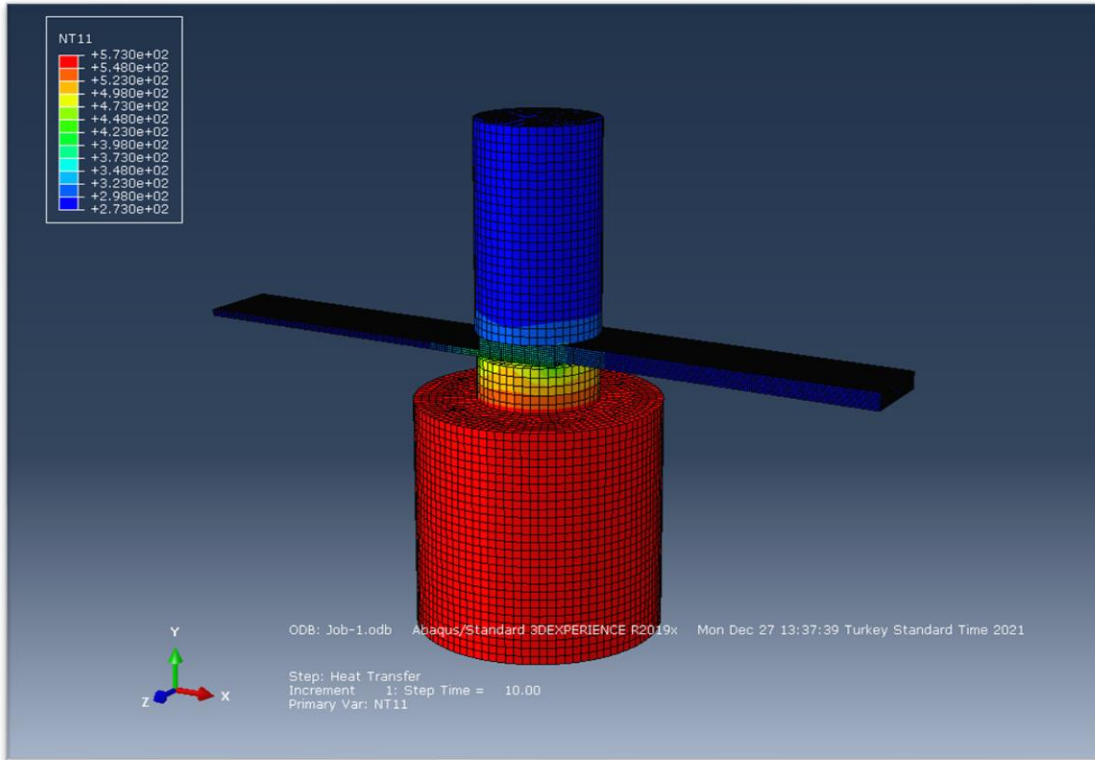
İki numuneyi “birleştirme kalitesi”, başka bir deyişle “birleşme alanı” açısından karşılaştırırsak; ısıtma süresi (dolayısıyla ara yüzey sıcaklığı) arttıkça birleşmede olumlu etki görülmektedir. Ancak bu durum ara yüzey sıcaklığıyla ilgili olabileceği gibi iki yüzey arasındaki birleşmenin oluşması için gerekli zamanla da alakalı olabilir. Sıcaklığın doğrudan etkisini gözlemlemek için **Şekil 4.3**'teki yaklaşık olarak aynı sürelerde gerçekleşen ancak farklı sıcaklıklarda uygulanan deney numunelerini karşılaştırabiliriz. 12, 14 ve 16 numaralı deney numuneleri yaklaşık olarak aynı sürelerde uygulanmış (15, 15 ve 20 saniye ısıtma süresi) ancak farklı başlangıç sıcaklıklarıyla gerçekleştirilmişlerdir. Sırasıyla 220 °C, 230 °C ve 240 °C’lerde gerçekleştirilen bu deneylerde sıcaklığın birleşme alanının artmasına olumlu etkisi gözlemlenebilmektedir. Ancak kesin bir korelasyon kurulması için çok daha fazla sayıda numune ile detaylı bir analiz yapılması gerektiği aşikardır.



Şekil 4. 3: 12, 14 ve 16 numaralı numuneler.

Şekil 4.4'te ilgili numunelerden 15 kadarı görülebilmektedir. Burada; 240 °C ve üstünde yapılan deneylerin bir çoğunda, PA66'nın birleşme alanının tamamını ıslattığı ve buna bağlı olarak birleşme alanının ideale yakın olduğu gözlemlenmektedir. Bu sıcaklığın altında yapılan testlerdeki numuneler birleşme alanı açısından istenilen şartları sağlamamaktadır. Ayrıca 240 °C civarındaki deneyler için birleşme alanı diğer parametrelere bağlıdır. Diğer bir deyişle, numuneler gözle muayene edildiğinde;

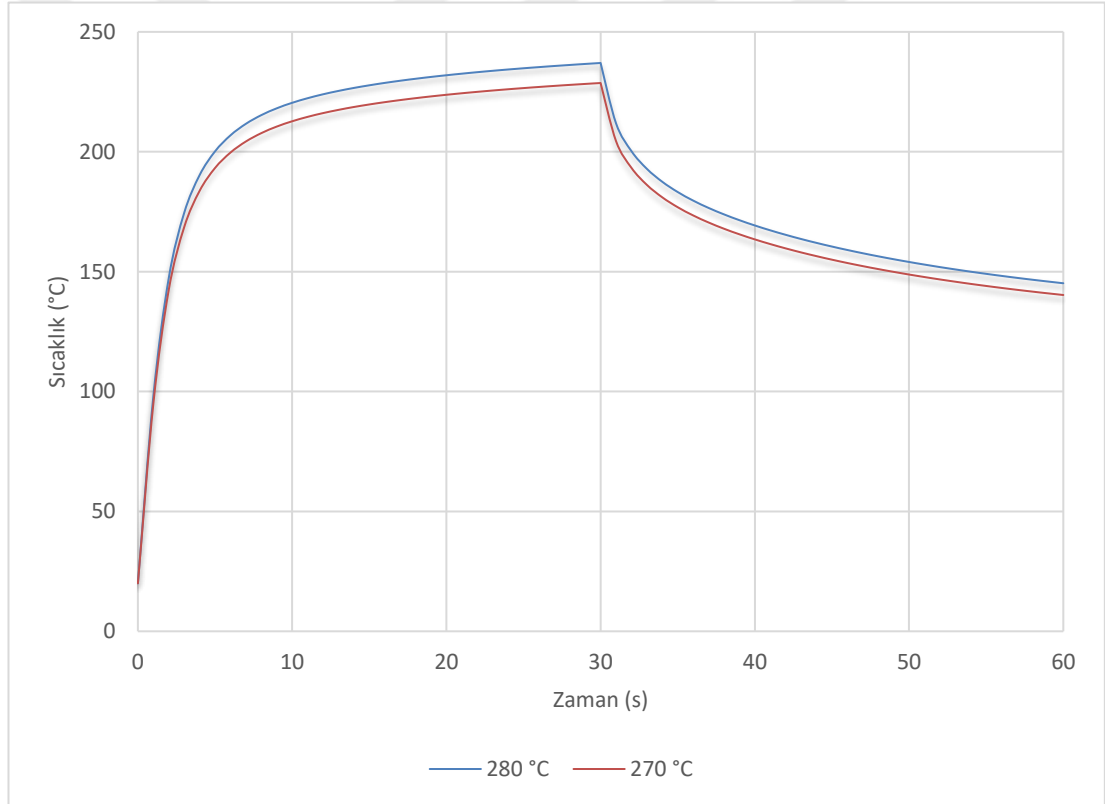
zamana bağılı değişimi incelenmiştir. **şekil 4.5**'te modele ait görüntü mevcuttur. ncl testlerde termal kamera ile yapılan gözlemler sonucunda sağlıklı bir birleşmenin gerçekleşebilmesi için ara yüzey sıcaklığının 240 C civarında olması gerektiği belirlenmiştir. Bu sıcaklığın altında numuneler birbirlerine kenetlenmemekteyken, bu sıcaklığın üzerinde polimer malzemenin vizkositesinin artmasına bağlı olarak polimer malzeme yanlardan fişkirmektedir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda ısıtıcı blok sıcaklığının sırasıyla 260 C, 270 C ve 280 C olduğu durumlarda farklı ısıtma sürelerinde istenen ara yüzey sıcaklıklarına ulaşılabildiği belirlenmiştir.



şekil 4. 5: Sonlu elemanlar analizi için kullanılan model.

Sonlu elemanlar analizi iki farklı analiz adımımdan oluşmaktadır. İlk adımında 30 saniye boyunca alttaki ısıtma plakasından numuneye bir ısı transferi gerçekleştirilmiştir ($t_h = 30$ s). ısıtma işlemi gerçekte olduğu gibi ısıtıcı bloğa başlangıç sıcaklığı verilerek yapılmıştır. Daha sonraki adımda ise hem ısıtıcı plakadan bir ısı transferi söz konusu iken hem de soğutucu akışkan tarafından zorlanmış taşınım ile ara yüzeyin soğuması söz konusudur. İkinci adım da 30 saniye sürmektedir ($t_c = 30$ s). Soğutma işlemi için deney dzenede vorteks tüpünden üflenen havanın sıcaklığı termal eleman yardımıyla ayrıca ölçülmüş ve 15 C olarak bulunmuştur.

270 °C ve 280 °C için yapılan analizlerde ara yüzeyin zamana göre sıcaklık değişimi **Şekil 4.6**'daki grafikte görülebilir. Buna göre 15 saniye'de 270 °C ve 280 °C'deki testler için ara yüzey sıcaklığı sırasıyla yaklaşık olarak 220 °C ve 230 °C, 30 saniye sonunda ise yine sırasıyla ve yaklaşık olarak 230 °C ve 240 °C sıcaklıklara ulaşmaktadır. Her iki koşul (270 °C ve 280 °C) için yapılan testlerde 30 saniye uygulanan soğutma sonucu ara yüzey sıcaklığı 150 °C'nin biraz altına düşmüştür. Bu sıcaklık değeri PA66'nın erime noktasının çok çok altında olmasına karşın, camı geçiş sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıktır. Bu şekilde ara yüzeyin tam olarak katılaştığını söyleyemesek de; deneyler boyunca, her operasyon sonrası test numunesi deney düzeneğinden alınarak oda sıcaklığına gelene kadar soğuması sağlanmıştır.



Şekil 4. 6: Ara yüzeyde sıcaklığın zamanla değişimi.

Yapılan analiz sonuçları dikkate alınarak yeni parametreler belirlenmiş ve testlere bu parametrelerle devam edilmesi kararlaştırılmıştır. Buna göre deney parametreleri; sıcaklık 260 °C, 270 °C ve 280 °C, basınç 2 bar, 4 bar ve 6 bar, ısıtma süresi, $t_h =$

15 s ve 30 s, soğutma süresi ise $t_c = 30$ s sabit olacak şekilde belirlenmiştir. Bu parametreler **Çizelge 4.2**'de bir arada verilmiştir.

Çizelge 4. 2: Deney parametreleri.

	260 °C
Sıcaklık	270 °C
	280 °C
	2 bar
Basınç	4 bar
	6 bar
	15 saniye
Isıtma süresi	30 saniye
	30 saniye
Soğutma süresi	30 saniye

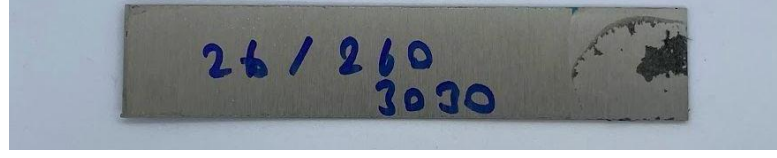
4.3 İyileştirilmiş Parametrelerle Yapılan Testler ve İlk Birleştirmeler

Çizelge 4.2'deki parametrelerle deneyler gerçekleştirilmiş ve bu deneyler sonucunda birleşmenin gerçekleştiği görülmüştür. Birleştirilen numuneler bir önceki bölümde anlatıldığı şekilde çekme testine tabii tutulmuş ve sıyrılmaya kuvvetleri ölçülmüştür. 26 numaralı test numunesine ait çekme testi grafiği **Şekil 4.7**'te görülmektedir.



Şekil 4. 7: 26 numaralı test numunesi.

Şekil 4.8'de 260 °C, 2 bar ve $t_h = 30$ s'de gerçekleştirilen bir teste ait 26 numaralı numune görülmektedir. Birleşme alanının az olmasına karşın birleşme gerçekleştirilmiş ve çekme testi sonucu sıyrılma kuvveti 65 N olarak ölçülmüştür.



Şekil 4. 8: 260 °C, 2 bar ve $t_h = 30$ s'de gerçekleştirilen test numunesi.

Şekil 4.9'da basınç ve ısıtma süreleri aynı, sıcaklığın ise 270 °C olduğu bir teste ait 32 numaralı numune görülmektedir. Bu numune için yapılan çekme testi sonucu 125 N değeri elde edilmiştir. Beklenildiği gibi birleşme alanı ve buna karşılık sıyrılma kuvveti değeri artmıştır.



Şekil 4. 9: 270 °C, 2 bar ve $t_h = 30$ s'de gerçekleştirilen test numunesi.

Şekil 4.10'da ise diğer parametreler aynı kalmakla birlikte sıcaklık 280 °C'ye çıkartılmıştır. 37 numaralı bu numune ile 32 numaralı numune karşılaştırıldığında birleşme alanları açısından bariz bir fark görülmemekle birlikte sıcaklık 280 °C'ye çıkartıldığında sıyrılma kuvvetinin 70 N'a düştüğü görülmüştür.



Şekil 4. 10: 280 °C, 2 bar ve $t_h = 30$ s'de gerçekleştirilen test numunesi.

26, 32 ve 37 numaralı numunelere bakılarak sıcaklığın birleşme alanına etkisi olduğu söylenmekle birlikte sıcaklık ve birleşme alanı arasında lineer bir ilişki olduğu da

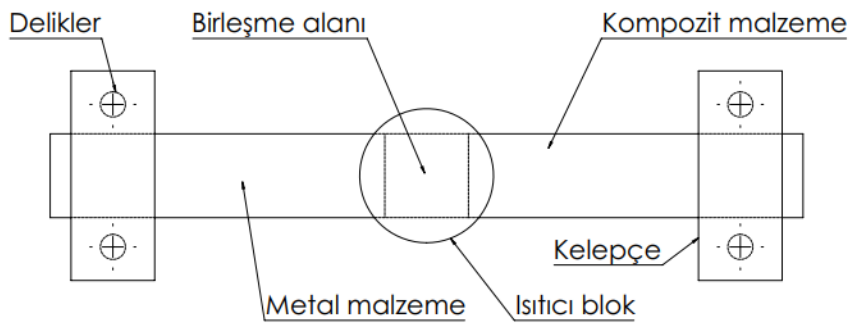
görülmektedir. Bu tez kapsamında ileriki bölümlerde birleştirme parametrelerin ayrıca analizi yapılmıştır.

Elde edilen bulguların yanı sıra aynı parametrelerde gerçekleştirilen bazı testlerin sıyrılma kuvvetleri karşılaştırıldığında tutarsız sonuçlarla karşılaşılabilir. Tutarsız gözüken sonuçlara etki edebilecek parametreler düşünülmüştür. Bunun sonucunda nem ve ortam sıcaklığı gibi tam olarak kontrol edilmeyen parametrelerin deneye etki etme ihtimali düşünülerek benzer nem oranı ve oda sıcaklığı koşullarında deneyler tekrarlanmıştır.

Sabit tutulan ortam sıcaklığı ve nem oranı değerleriyle yapılan deney sonuçlarında da sıyrılma kuvveti açısından tutarsızlıklar görülmeye devam etmiştir. Buna karşın problemin fikstür tasarımıyla ilgili olabileceği düşünülerek fikstür tasarımı ayrıca incelenmiştir.

4.4 Fikstür Tasarımının İncelenmesi

Deney düzeneği bölümünde de bahsedildiği üzere fikstür tasarımı geleneksel kaynak yöntemlerinde de karşımıza çıkan çarpılma problemine çözüm olması açısından yalnızca sabitleme yapması düşünülerek tasarlanmıştır. **Şekil 4.11**'de geleneksel bir fikstür tasarımı görülmektedir.



Şekil 4. 11: Geleneksel fikstür tasarımı.

Bir çok çalışmada fikstür tasarımı olarak benzer bir fikstür tasarımı görülmektedir [126,127]. Deney numunelerine uygulanan sıyrılma testi sonucu elde edilen sıyrılma kuvveti farklılık gösterdiğinden varolan fikstürden karşılanabilecek problemler incelenmek istenmiştir. Bu problemlere var olan fikstür tasarımının yol açıp

açmadığını incelemek amacıyla 280 °C sıcaklık ve 4 bar basınç parametreleri seçilerek ve fikstürleme koşulları değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan fikstür tasarımı **Şekil 4.12**'de görülebilir. Bu şekilde fikstür tasarımının birleşme kalitesine ve dolayısıyla sıyırılma kuvvetine etkisi araştırılmıştır. Fikstürleme ile ilgili koşullar dört bölümde incelenmiştir:

- **Birinci Koşul :** Operasyon boyunca fikstürleme işlemi yapılmamıştır
- **İkinci Koşul :** Yalnızca ısıtma işleminin yapıldığı süre boyunca fikstürleme işlemi yapılmış, daha sonra işleme fikstürleme olmadan devam edilmiştir
- **Üçüncü Koşul :** Operasyon süresi boyunca fikstürleme işlemi yapılmış ancak numuneler üzerindeki kuvvet kaldırılmadan hemen önce fikstürlemeyi bırakılmıştır
- **Dördüncü Koşul :** Operasyon süresi boyunca fikstürleme işlemi yapılmıştır, fikstürleme işlemi panç ile uygulanan kuvvet kaldırıldıktan sonra bitirilmiş ve bu şekilde birleştirilmiş numune ısıtıcı bloğun üzerinden alınmıştır.

Elden edilen sonuçlar **Çizelge 4.3**'te listelenmiştir.

- **Birinci Koşul** için değerlendirme:

Fikstürleme yapılmadan gerçekleşen deneylerde yapılan testler sonucu sıyırılma kuvveti değerlerinin 11 N ve 107 N arasında değiştiği görülmüştür.

- **İkinci Koşul** için değerlendirme:

Fikstürleme işleminin yalnızca ısıtma süresi boyunca yapıldığı durumda ortalama sıyırılma kuvveti değeri 110 N olmuştur ve değerler arasında çok fazla değişiklik görülmemiştir.

Çizelge 4. 3: Farklı fikstür tasarımlarının sıyırılma kuvvetine etkisi.

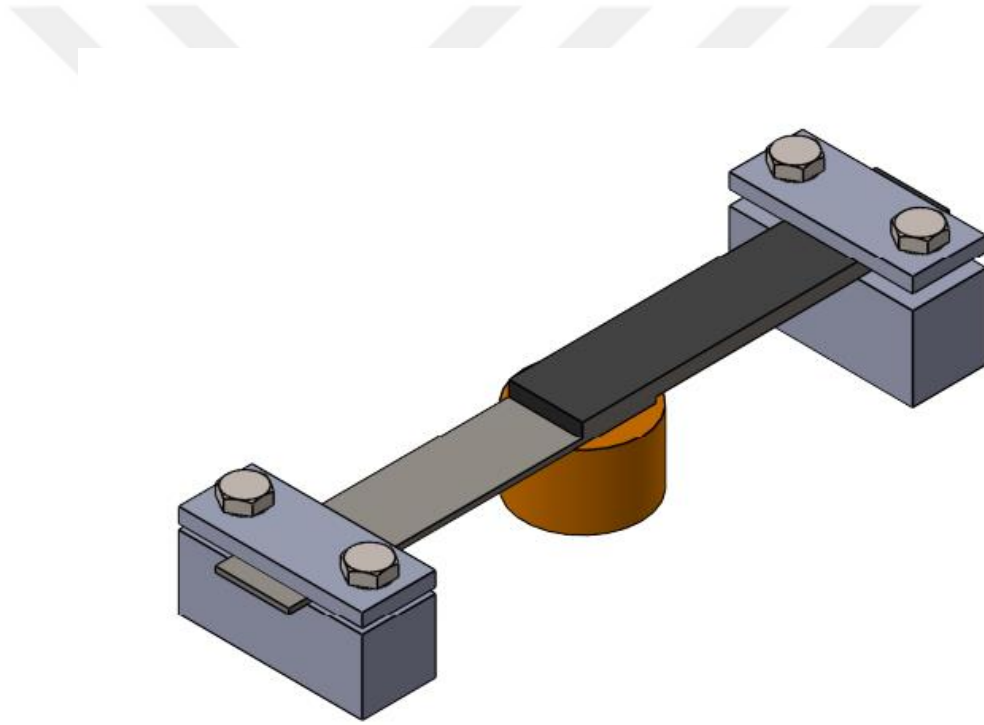
Koşul	Sıcaklık	Basınç	Isıtma Süresi	Soğutma Süresi	Operasyon Süresi	Ortam Sıcaklığı	Nem Oranı	Sıyırılma Kuvveti
1 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	100 N
1 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	55 N
1 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	11 N
1 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	64 N
2 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	50 N
2 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	110 N
3 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	270 N
3 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	253 N
4 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	181 N
4 numaralı koşul	280 °C	4 bar	30 s	30 s	60 s	23 °C	55%	19 N

- **Üçüncü Koşul** için değerlendirme:

Fikstürlemenin operasyon süresi boyunca yapıldığı, paç başlangıç konumuna gelmeden hemen önce bırakıldığı durumda ise 235 N ve 350 N arasında değişiklik göstermiştir. Bu koşul aynı zamanda en yüksek değerlerin elde edildiği koşuldur.

- **Dördüncü Koşul** için değerlendirme:

Son olarak fikstürlemenin paç başlangıç pozisyona geldikten sonra kaldırıldığı koşul incelenmiş ve en fazla 181 N değeri elde edilmiştir. Değerlerin çok fazla değişken olmasının yanı sıra bazı numunelerde deney birleşme olmadan tamamlanmıştır.



Şekil 4. 12: Deneyde kullanılan fikstür tasarımı.

Testler 270 °C ve 6 bar için tekrarlanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Her iki durum için de üçüncü koşul en iyi sonuçları vermiştir. En iyi koşul, fikstürlemenin

operasyon süresi boyunca yapıldığı, ancak birleşme alanındaki basıncın kaldırılmadan önce fikstürlemenin iptal edildiği koşul, en iyi sonuçları vermektedir.

Bu duruma aşağıdaki maddeler sebep olarak gösterilebilir:

1. Metallerle kompozitlerin kaynağında, metal – metal kaynaklarına göre; görece çok düşük dayanımlar elde edildiğinden fikstürlemenin oluşturduğu iç gerilmelerin birleşme alanında elde edilen dayanımı yenmesi
2. Operasyon sonundaki sıcaklığın (150 °C) polimerin camsı geçiş sıcaklığının (65 °C) altında tamamlanması sonucu katılaşmanın henüz tamamlanmaması

Deney düzeneğinin doğası gereği operasyon süreleri fazla uzatılmadığından testlere üçüncü koşul baz alınarak devam edilmiştir.

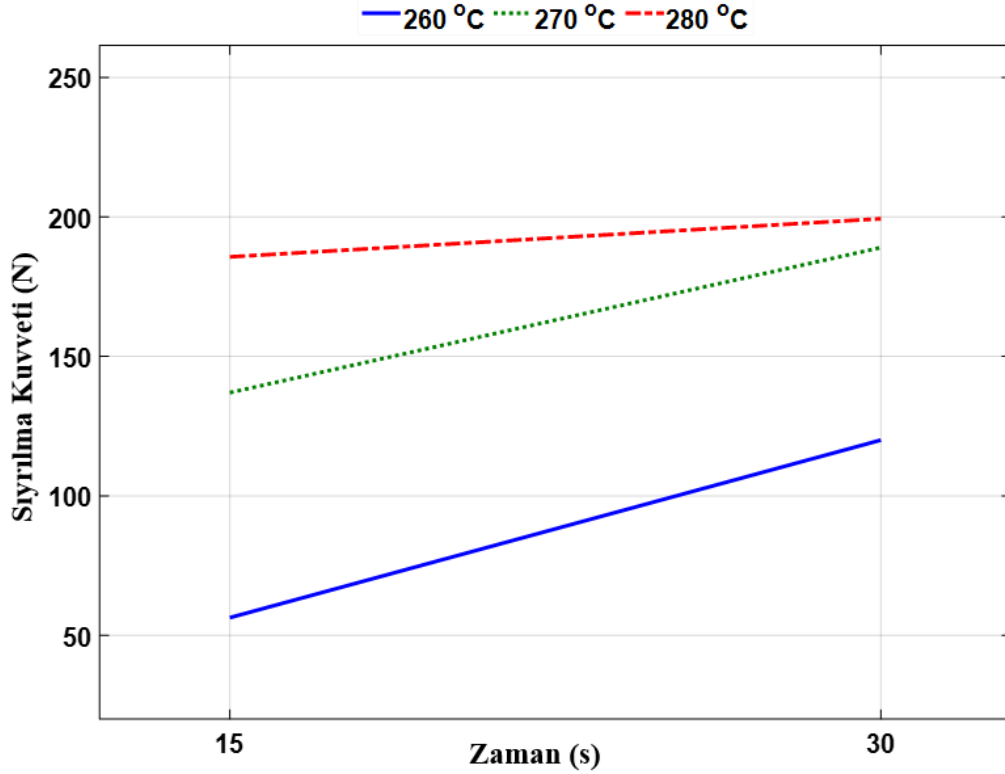
4.5 Birleştirme Parametrelerin Sıyırılma Kuvvetine Etkisi

Üçüncü koşul dikkate alınarak fikstürleme yapılan testler için **Çizelge 4.2**'deki parametrelerin sıyırılma kuvvetine olan etkisi ANOVA (Varyans Analizi) yardımıyla incelenmiştir. ANAVO tablosu **Çizelge 4.4**'te verilen varyans analizi tablosunda görülebilir.

Çizelge 4. 4: Varyans Analizi (ANOVA) tablosu.

Kaynak	Kareler Toplamı	S. D.	Ortalama Kare	F	Olasılık > F
Basınç	67716.8	2	33858.4	5.11	0.0792
Zaman	8363.6	1	8363.6	1.26	0.3242
Sıcaklık	34711.4	2	17355.7	2.62	0.1875
Basınç * Zaman	9152.1	2	4576.1	0.69	0.5526
Basınç * Sıcaklık	18061.6	4	4515.4	0.68	0.6405
Zaman * Sıcaklık	2052.8	2	1026.4	0.15	0.8614
Hata	26511.6	4	6627.9		
Toplam	166569.8	17			

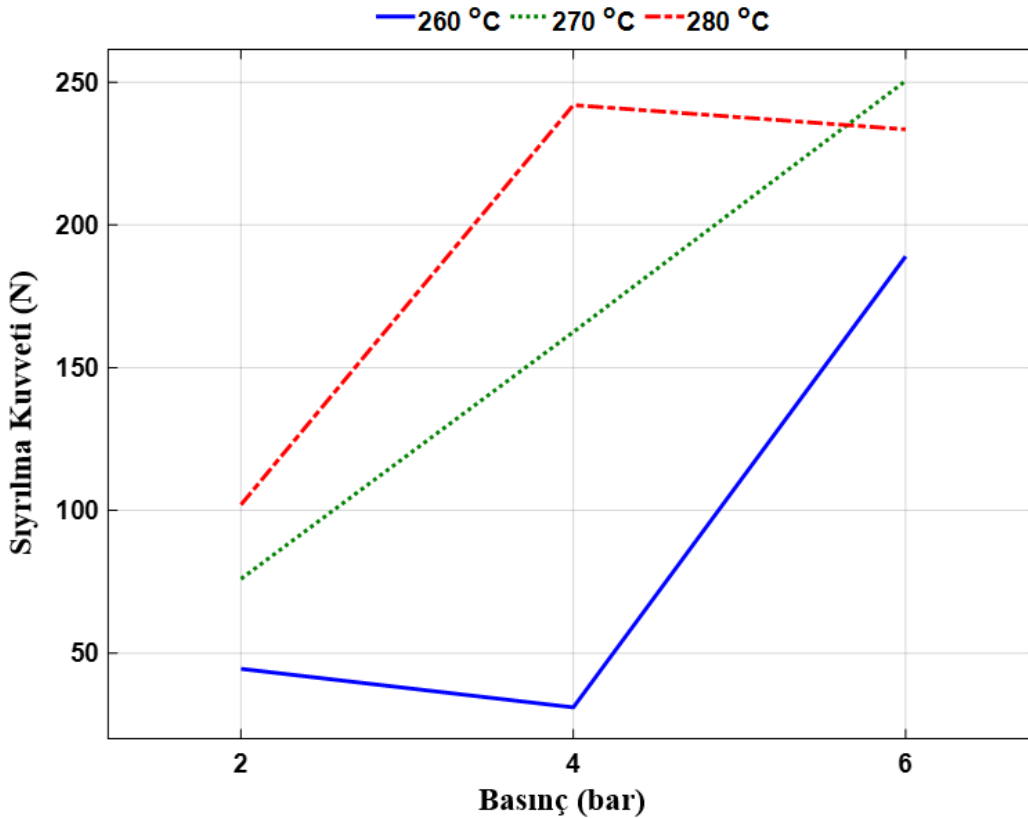
İlgili çizelge yardımıyla oluşturulan grafikler incelendiğinde optimize parametreler elde edilebilir. **Şekil 4.13:** 260 °C, 270 °C ve 280 °C için Zaman – Sıyırılma Kuvveti grafiğinde basıncı etkisi sabit tutularak ısıtma süresinin sıyırılma kuvvetine olan etkisi incelenmiştir. Buna göre 260 °C için yapılan deneylerde 15 saniye ile 30 saniye ısıtma süresi uygulamak sıyırılma kuvveti açısından ciddi bir fark oluştursa da en iyi değer dahi 270 °C ve 280 °C’de gerçekleşen en kötü sıyırılma kuvvetine sahip deneylerden daha kötü değerler elde edildiği görülmektedir. 260 °C’de gerçekleşen deneylerin birleşme açısından başarısız veya yetersiz olacağı ilk deneylerde de görülmüştü. Fikstürleme işlemi optimize edildikten sonra da benzer sonuçları görerek 260 °C’nin var olan deney düzeneğinde AISI 304 ve GF30 PA66’nın kaynağı için yeterli olmadığı söylenebilir.



Şekil 4. 13: 260 °C, 270 °C ve 280 °C için Zaman – Sıyırılma Kuvveti grafiği.

270 °C ve 280 °C için yapılan testlerde 150 N’un üzerinde sıyırılma kuvvetleri elde edilmiştir. 30 saniye ısıtma süresine sahip deneyler sıyırılma kuvveti açısından daha iyi sonuç vermişlerdir. Isıtma süresinin 270 °C için yapılan deneylerde 30 saniye olmasının çarpıcı bir etkisi olsa da 280 °C için yapılan deneylerde ısıtma süresinin 15 saniye veya 30 saniye olması arasında ciddi bir fark yoktur. Ayrıca 270 °C ve 280 °C

için ısıtma süresi 30 saniye olduğunda sonuçlar açısından yine ciddi bir fark gözlenmemektedir. Sonlu elemanlar analizinde 270 °C için 30 saniyede elde edilen ara yüzey sıcaklığıyla 280 °C için 15 saniyede elde edilen ara yüzey sıcaklıkları yaklaşık olarak birbiriyle aynıdır (230 °C). Birleşme için ideal ara yüzey sıcaklığının 230 °C'nin üzerinde olması gerektiği sonucu çıkmaktadır. **Şekil 4.14:** 260 °C, 270 °C ve 280 °C için Basınç – Sıyırılma Kuvveti grafiğinde sıcaklığın etkisi dondurularak basıncın sıyırılma kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna göre 260 °C'deki testlerde basınç 6 bara çıktığında sıyırılma kuvveti dikkate değer artış gösterse de daha önce de bahsedildiği gibi bu sıcaklıktaki deneyler birleşme açısından yetersiz sonuç verdiği için dikkate alınmamalıdır. 270 °C'de basıncın etkisi sıyırılma kuvvetini lineer olarak etkilemektedir. 4 bar basınçta yapılan deneyler 2 barda yapılan deneylere göre daha yüksek sıyırılma kuvvetinin elde edilmesini sağlamaktadır. Yine aynı şekilde 6 bar'daki deneyler diğer basınçtaki deneylerden daha fazla sıyırılma kuvvetlerinin görülmesini sağlamıştır.



Şekil 4. 14: 260 °C, 270 °C ve 280 °C için Basınç – Sıyırılma Kuvveti grafiği.

280 °C'deki deneyler için baktığımızda 270 °C'deki deneylerdeki gibi lineer bir sonuç görmemekteyiz. Buna göre en iyi sonuçlar 4 bar'da elde edilmiş, 6 bar'da ise sıyırılma

kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak daha önce de bahsedilen fişkıma problemi öne sürülebilir. Her ne kadar yüksek sıcaklıklara çıkılmak istenirse de yüksek sıcaklıklarda polimerin akışkanlığı çok artacağından dolayı yüksek basınçta fişkıma miktarı artmakta, bu nedenle de sıyırılma kuvvetinde azalma görmekteyiz. Buradan sıcak baskı yönteminde ara yüzey sıcaklığının ve basınç değerlerinin ara yüzeydeki mikro kenetlenme mekanizmalarını genel olarak lineer arttığını, ancak yine ara yüzey sıcaklığı ve basınç değerlerinin fişkıma miktarına etkilediği için parametrelerin optimize edilmesinin, birleşmenin gerçekleşmesi ve birleşmenin kalitesi, bir başka deyişle sıyırılma kuvveti açısından çok önemli olduğu sonucunu çıkartabiliriz. Elde edilen bulgular için birbirine en yakın ve en iyi sonuçları veren parametrelerin 270 °C ve 6 bar'da 30 saniye ısıtma süresine ve 280 °C ve 4 bar'da 30 saniye ısıtma süresine sahip parametreler olduğu görülmüştür. Deneyler bu parametrelerle Al 1050 için de tekrarlanmış **Çizelge 4.5**'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4. 5: Al 1050 ile gerçekleştirilen deneyler.

Metal	Kompozit	Sıcaklık	Basınç	Isıtma Süresi	Soğutma Süresi	Sıyırılma Kuvveti
Al 1050	GF30 PA66	280 °C	4 bar	30 s	30 s	227 N
Al 1050	GF30 PA66	270 °C	6 bar	30 s	30 s	308 N

4.6 Farklı Yüzey Varyasyonlarının Sıyırılma Kuvvetine Etkisi

Metallerle termoplastik kompozitlerin kaynağında metalin yüzey koşullarının değişmesiyle birleşme kalitesi arasındaki ilişki değişebilmektedir. Bu ilişkileri inceleyen çalışmalar literatür bölümdeki sıcak baskı yönteminde ve lazerle birleştirme başlıklarında verilmiştir.

Çizelge 4.6 Metal / kompozitlerin indüksiyon kaynağında kullanılan genel yüzey işlemleri tablosunda indüksiyon kaynağında kullanılan bazı yüzey işlemleri

sınıflandırılmıştır [105]. Bu tez kapsamında metal yüzeyinde bir adet kimyasal ve bir adet de fiziksel yüzey işleminin sıyırılma kuvvetine etkisi araştırılmıştır. Bunlar:

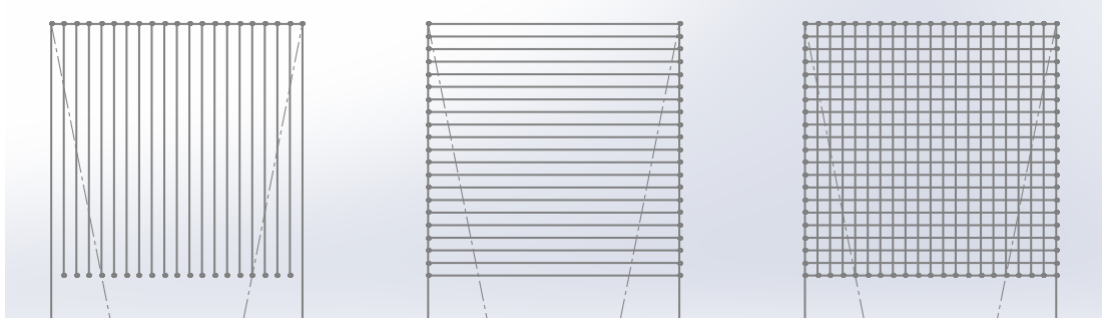
1. Kimyasal İşlem: AISI 304 çelik 300°C’de 30 dakika tavlansmıştır.
2. Fiziksel İşlem: Lazer yardımıyla AISI 304 yüzeyinde 320 µm genişliğinde ve 3 farklı desende kanallar açılmıştır.

Çizelge 4. 6: İndüksiyon kaynağında kullanılan genel yüzey işlemleri.

Yöntem	İşlem	Etkisi
Temizleme	<ul style="list-style-type: none">• Solvent ile temizleme (Ör: aseton)	<ul style="list-style-type: none">• Birleşme alanını temizler
Mekanik işlemler	<ul style="list-style-type: none">• Yüzey parlatma• Taşlama• Kumlama	<ul style="list-style-type: none">• Yüzey pürüzlülüğünü artırır• Birleşme yüzeylerindeki kontaminasyonu ve oksidasyonunu giderir
Kimyasal işlemler	<ul style="list-style-type: none">• Dekapaj• Dağlama• Anodizasyon	<ul style="list-style-type: none">• Çift taraflı tabaka oluşturur• Yüzeyde kimyasal değişiklik yapar
Fiziksel işlemler	<ul style="list-style-type: none">• Plazma ile temizlik	<ul style="list-style-type: none">• Organik yapıyı bozar• Yüzey enerjisini artırır

4.6.1 Birleşme Yüzeyinde Lazerle Doku Oluşturma

Metal yüzeyinde lazer ile üç farklı desende doku oluşturulmuş ve bu şekilde birleştirme yapılarak yüzey enerjisinin artırılmasının sıyırılma kuvvetine etkisi incelenmiştir. Bu desenler **Şekil 4.15**’de görülmektedir.

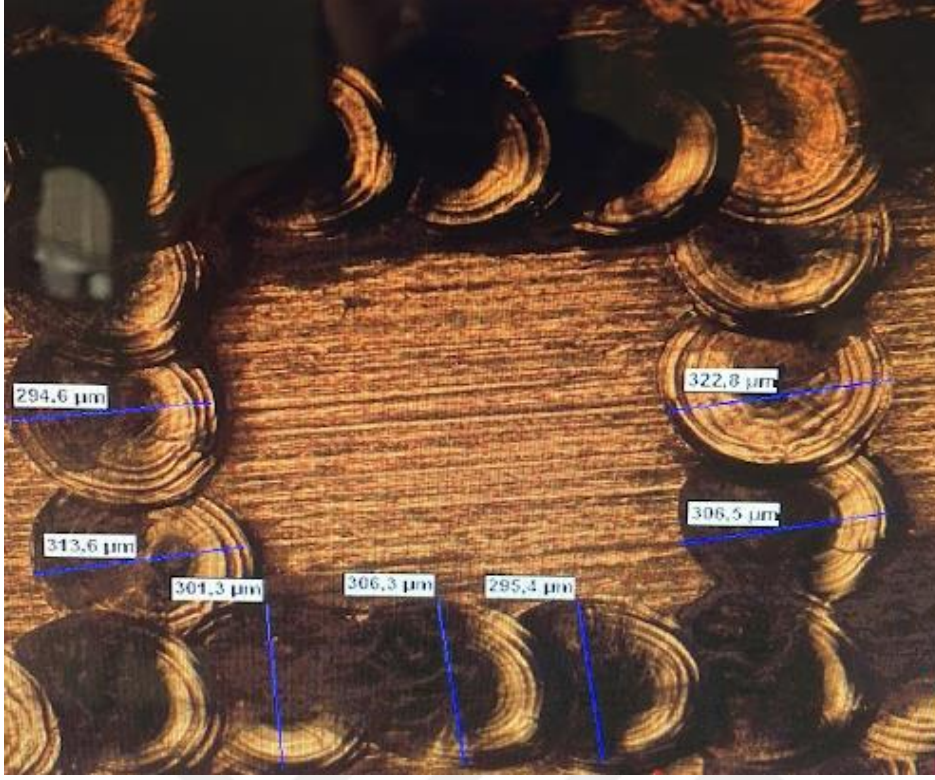


Şekil 4. 15: Farklı desen türleri. Sırasıyla dikey, yatay ve kare.

Her bir kanal arası 1 mm olup kanal genişlikleri ortalama 300 – 350 μm arasındadır (Ortalama 320 μm). **Şekil 4.16'** da dikey desen için bir kanalın mikroskopik görüntüsü görülmektedir. **Şekil 4.17'** de ise kare desen için üst üste binen kanalların mikroskopik görüntüsü görülebilmektedir.



Şekil 4. 16: Dikey desen mikroskopik görüntüsü.



Şekil 4. 17: Kare desen mikroskopik görüntüsü.

Deneyler parametre optimizasyonu sonrası dondurulan optimize parametrelerle ikişer tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4. 7: Optimize parametreler.

Parametre	Sıcaklık	Basınç	Isıtma Süresi	Soğutma Süresi
A	270 °C	6 bar	30 s	30 s
B	280 °C	4 bar	30 s	30 s

Lazerle doku oluşturulmuş 3 farklı desen için Çizelge 4.7’deki parametrelerle yapılan testlerin sıyrılma kuvvetine etkisi ortalama olarak Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4. 8: Lazerle doku oluşturulmuş numunelerin birleştirilmesi.

Metal	Kompozit	Desen	Parametre	Sıyırılma Kuvveti
AISI 304	GF30 PA66	Yatay	A	90 N
AISI 304	GF30 PA66	Dikey	A	156 N
AISI 304	GF30 PA66	Kare	A	113 N
AISI 304	GF30 PA66	Yatay	B	139 N
AISI 304	GF30 PA66	Dikey	B	150 N
AISI 304	GF30 PA66	Kare	B	216 N

Metalin yüzey enerjisini lazerle arttırmanın sıyırılma kuvvetini arttırmadığı, aksine azalttığı görülmüştür. Sonuç olarak herhangi bir yüzey işlemi yapılmadan gerçekleştirilen deneyler için yapılan parametre analizi lazerle yüzey enerjisi arttırılmış metal numune ile gerçekleştirilen deneyler için geçerli değildir. Uygun parametreler için yeni bir optimizasyon çalışması yapılmalıdır. Bu farklılığı iki ana başlıkta inceleyebiliriz. İlki metalle ilgilidir ve metalin yüzey koşulları birleşme esnasındaki ısı geçişini de değiştirecektir, dolayısıyla yeni deneyler ve yeni bir analiz çalışması yapılmalıdır. İkincisi, polimerle ilgilidir ve metalin yüzey koşulları değiştiğinde polimerin fişkırtma ve buna karşın bağ oluşturma şartları da değişir. Bu da birleşme kalitesi ve sıyırılma kuvvetini olumsuz etkiler.

4.6.2 Isıl İşleme Metal Yüzeyindeki Oksidasyonu Arttırma

Metal numuneler 300 °C'deki fırına koyularak 30 dakika boyunca tavlanmıştır. Bu şekilde metal yüzeyindeki oksidasyonun arttırılması ve buna bağlı olarak birleştirme işlemi sırasında yüzeydeki oksijenlerin polimer bileşimindeki karbon atomlarıyla fazladan bağlar yapılması sağlanarak sıyırılma kuvvetinin arttırılması

amaçlanmıştır. Deneylet yine **Çizelge 4.7**'deki parametreler kullanılarak tekrarlanmıştır. Sonuçlar **Çizelge 4.9**'de paylaşılmıştır.

Çizelge 4. 9: Tavllanmış metal ile gerçekleştirilen deneylet.

Metal	Kompozit	İşlem	Parametre	Sıyrılma kuvveti
AISI 304	GF30 PA66	Tavlama	A	488 N
AISI 304	GF30 PA66	Tavlama	B	214 N
AISI 304	GF30 PA66	Tavlama	A	144 N
AISI 304	GF30 PA66	Tavlama	A	341 N
AISI 304	GF30 PA66	Tavlama	A	209 N
AISI 304	GF30 PA66	Tavlama	B	138 N

Metalin yüzeyindeki oksidasyonun arttırılması sonucu özellikle 280 °C ve 4 bar'da yapılan testler için bir artış gözlenmemiş, herhangi bir şekilde yüzey işlemine tabii tutulmamış numunelerle 280 °C ve 4 bar'da yapılan testler karşılaştırıldığında bu değerlere ancak yakın olduğu gözlemlenmiştir. 270 °C ve 6 bar'da yapılan testlerde ise yüzey enerjisi arttırılmamış numunelere göre genellikle bir artış görülmüş, ancak her zaman bu sağlanmamıştır. Testler arasında iyi değer olan 488 N ancak tavlama sayesinde mümkün olmuştur. Bu da metal yüzeyindeki oksidasyonu arttırarak polimerdeki karbonla yeni bağlar kurulmasında bir potansiyel olduğunu göstermiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerle metallerin Sıcak Baskı Yöntemi ile birleştirilmesi incelenmiştir. Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerle metallerin geleneksel ve ileri birleştirme yöntemleriyle birleştirilmesini içeren bir literatür özeti sunulmuştur.

Metal olarak AISI 304 ve kompozit olarak da GF30 PA66 seçilmiştir. Sıcaklık, süre ve baskı kuvvetini kontrol etme imkanı sunan bir Sıcak Baskı Yöntemi deney düzeneği kurulmuş ve testler bu düzenekte gerçekleştirilmiştir.

Öncül deneylerde başarılı olmayan birleştirmeler elde edilmiştir. Buna karşılık sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilip deney parametreleri sonuçlar göz önüne alınarak güncellenmiştir.

Belirlenen parametreler sıcaklık için 260, 270 ve 280 °C, basınç için 2, 4 ve 6 bar ve ısıtma süresi için 15, 30 ve 60 saniyedir. Deneyler bu parametrelerle tekrar edilerek başarılı birleştirmeler elde edilmiştir ve deney sonucunda elde edilen birleştirme numuneleri mekanik testler gerçekleştirilerek sıyrılma kuvvetleri not edilmiştir.

Tekrarlanan deneylerdeki farklı sıyrılma kuvveti değerlerinin sebepleri araştırılmış ve elde edilen bulgular sonucunda fikstür tasarımının sonuçlara etkisi araştırılmıştır.

Fikstürleme koşulları dörde ayrılarak sınıflandırılmıştır. En iyi sıyrılma kuvveti değerleri fikstürlemenin operasyon boyunca yapıldığı, ancak baskı kuvveti kalkmadan hemen önce fikstürlemenin kaldırıldığı koşulda gerçekleştirilen deneylerde kaydedilmiştir.

Fikstür tasarımının ısıl etkilerinin olduğu da bilinmektedir. Lambiase ve arkadaşları, makalesinde termomekanik bağlanma yöntemlerinde fikstür tasarımının ısıl etkilerinden bahsetmiş ve metal-kompozit arayüzündeki sıcaklığın uniform şekilde dağılmayacağını belirtmiştir [9]. İlgili çalışmada termomekanik birleştirme yöntemlerinde fikstür tasarımı bağlamında ısı ile ilgili genel problemler metale temas eden ısı yüzeyi ölçülerinin yetersiz olması, fikstür elemanlarının varlığının yerel ısı değişimlerine sebep olması ve metal ve kompozit temas arayüzünün kısıtlı olması olmak üzere üç ana başlık altında toplanmıştır.

Sonuç olarak fikstür tasarımı diğer termomekanik birleştirme yöntemlerinde olduğu gibi Sıcak Baskı Yönteminde de zorlayıcı ve geliştirilmeye açık bir konudur.

Belirlenen parametreler en iyi fikstür koşulu ile tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi sonucunda en iyi değeri veren parametre çifti 4 bar - 280 °C ve 6 bar - 270 °C olmuştur. Termoplastiğin sıcaklıkla artan viskozitesi yüksek basınçlarda fişkırmının artmasıyla sonuçlanarak birleşme dayanımının düştüğü gözlenmiştir.

Deneyler elde edilen optimize parametrelerle Al 1050 için tekrar edilmiş ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Metalin farklı yüzey varyasyonlarının birleşmeye olan etkisi araştırılmıştır. Bu sebeple AISI 304'ün yüzey enerjisi, kimyasal ve fiziksel olarak artırılarak yeni deneyler gerçekleştirilmiş ve dayanımları incelenmiştir.

AISI304 yüzeyinde lazerle üç farklı desende dokular oluşturulmuştur. Bu üç farklı numuneyle gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarında dayanımın düşünüldüğü gibi artmadığı gözlenmiştir. Yüzeyinde fiziksel işlem yapılan numunelerde ısıl koşullar değiştiğinden yeni bir parametre analizi yapılarak yeni deneyler gerçekleştirilmelidir.

Kimyasal işlem olarak 300 °C'de 30 dakika tavlanan metalin yüzeyde artan oksidasyon sonucu termoplastikle bağ yapma kapasitesinin ve buna karşılık birleştirme dayanımının arttığı gözlenmiştir.

Sıcak Birleştirme Yöntemi henüz görece yeni olduğundan geliştirmeye açık, ucuz ve diğer termomekanik birleştirme yöntemlerine alternatif bir yöntem olarak sunulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Messler, R. W.** (2004). Joining Composite Materials and Structures: Some Thought-Provoking Possibilities. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 17(1), 51-75. <https://doi.org/10.1177/0892705704033336>
- [2] **Amancio-Filho, S. T., & Blaga, L. A. (Ed.).** (2018). *Joining of polymer-metal hybrid structures: Principles and applications* (First Edition). John Wiley & Sons, Inc.
- [3] **Murray, R. E., Roadman, J., & Beach, R.** (2019). Fusion joining of thermoplastic composite wind turbine blades: Lap-shear bond characterization. *Renewable Energy*, 140, 501-512. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.085>
- [4] **Gasson, P. C.** (2001). *Composite Airframe Structures: Practical Design Information and Data*. M. C. Y. Niu Third edition. Distributed by Adaso/Adastra Engineering Center, PO Box 3552, Granada Hills, CA 91394, USA. 2000. 664pp. Illustrated. \$65. ISBN 962-7128-06-6. *The Aeronautical Journal*, 105(1050), 459-459. <https://doi.org/10.1017/S0001924000012471>
- [5] **Grewell, D., & Benatar, A.** (2007). Welding of Plastics: Fundamentals and New Developments. *International Polymer Processing*, 22(1), 43-60. <https://doi.org/10.3139/217.0051>
- [6] **Li, D., Chrysanthou, A., Patel, I., & Williams, G.** (2017). Self-piercing riveting—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5), 1777-1824. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0156-x>
- [7] **Huang, Y., Gao, X., Zhang, Y., & Ma, B.** (2022). Laser joining technology of polymer-metal hybrid structures—A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 934-961. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.026>
- [8] **Amancio-Filho, S. T., & Santos, J. F. dos.** (2009). *FricRiveting: A New Technique for Joining Polymer-Metal Hybrid Structures* (SAE Technical Paper Sy 2009-01-0033). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0033>
- [9] **Lambiase, F., Scipioni, S. I., Lee, C.-J., Ko, D.-C., & Liu, F.** (2021). A State-of-the-Art Review on Advanced Joining Processes for Metal-Composite and Metal-Polymer Hybrid Structures. *Materials*, 14(8), 1890. <https://doi.org/10.3390/ma14081890>
- [10] **Schricker, K., Diller, S., & Bergmann, J. P.** (2018). Bubble formation in thermal joining of plastics with metals. *Procedia CIRP*, 74, 518-523. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.132>

- [11] Nestler, D., Döhler, C., Wielage, B., & Wagner, G. (2015). Surface and Fracture Surface Analysis of Thermally Bonded Metal/FRP Joints. *Materials Science Forum*, 825-826, 328-335.
- [12] Lambiase, F., Balle, F., Blaga, L.-A., Liu, F., & Amancio-Filho, S. T. (2021). Friction-based processes for hybrid multi-material joining. *Composite Structures*, 266, 113828. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113828>
- [13] Troughton, M. J. (2008). *Handbook of plastics joining a practical guide*. William Andrew ; TWI/The Welding Institute. <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780815515814>
- [14] Thoppul, S. D., Finegan, J., & Gibson, R. F. (2009). Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review. *Composites Science and Technology*, 69(3-4), 301-329. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.037>
- [15] Cheng, X., Wang, S., Zhang, J., Huang, W., Cheng, Y., & Zhang, J. (2017). Effect of damage on failure mode of multi-bolt composite joints using failure envelope method. *Composite Structures*, 160, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.042>
- [16] Choi, J.-I., Hasheminia, S. M., Chun, H.-J., Park, J.-C., & Chang, H. S. (2018). Failure load prediction of composite bolted joint with clamping force. *Composite Structures*, 189, 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.037>
- [17] Zafer, A., Yilmaz, O., & Bekiroğlu, S. (2018). A Study on Effect of Sizing Bolt Hole in Single-Lap Connection Using FEA. *Journal of Scientific Research and Reports*, 19(1), 1-14. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2018/40498>
- [18] Mishra, R., Malik, J., Singh, I., & Davim, J. P. (2010). Neural network approach for estimating the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates. *Materials & Design*, 31(6), 2790-2795. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.011>
- [19] Galińska, A. (2020). Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part I: Bolted Joining. *Polymers*, 12(10), 2252. <https://doi.org/10.3390/polym12102252>
- [20] Vendan, S. A., Natesh, M., Garg, A., & Gao, L. (2019). *Confluence of Multidisciplinary Sciences for Polymer Joining*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0626-6>
- [21] Molitor, P., Barron, V., & Young, T. (2001). Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21(2), 129-136. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(00\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(00)00044-0)
- [22] Galińska, A., & Galiński, C. (2020). Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part II: Riveting, Clinching, Non-Adhesive Form-Locked Joints, Pin and Loop Joining. *Polymers*, 12(8), 1681. <https://doi.org/10.3390/polym12081681>

- [23] **Settineri, L., Atzeni, E., & Ippolito, R.** (2010). Self piercing riveting for metal-polymer joints. *International Journal of Material Forming*, 3(S1), 995-998. <https://doi.org/10.1007/s12289-010-0937-3>
- [24] **Fratini, L., & Ruisi, V. F.** (2008). Self-piercing riveting for aluminium alloys-composites hybrid joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(1), 61. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1690-3>
- [25] **Di Franco, G., Fratini, L., Pasta, A., & Ruisi, V. F.** (2013). On the self-piercing riveting of aluminium blanks and carbon fibre composite panels. *International Journal of Material Forming*, 6(1), 137-144. <https://doi.org/10.1007/s12289-011-1067-2>
- [26] **Hewitt, R.** (2014). 11—Self-piercing riveting (SPR) in automated vehicle construction. İçinde A. Chrysanthou & X. Sun (Ed.), *Self-Piercing Riveting* (ss. 181-207). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098849.2.181>
- [27] **Troughton, M. J. (Ed.)**. (2009). Chapter 18—Mechanical Fastening. İçinde *Handbook of Plastics Joining (Second Edition)* (ss. 175-201). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1581-4.50020-2>
- [28] **Gay, A., Lefebvre, F., Bergamo, S., Valiorgue, F., Chalandon, P., Michel, P., & Bertrand, P.** (2016). Fatigue performance of a self-piercing rivet joint between aluminum and glass fiber reinforced thermoplastic composite. *International Journal of Fatigue*, 83, 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.004>
- [29] **Varis, J. P.** (2003). The suitability of clinching as a joining method for high-strength structural steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1), 242-249. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00933-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00933-0)
- [30] **Busse, S., Merklein, M., Roll, K., Ruther, M., & Zürn, M.** (2010). Development of a mechanical joining process for automotive body-in-white production. *International Journal of Material Forming*, 3(1), 1059-1062. <https://doi.org/10.1007/s12289-010-0953-3>
- [31] **Amancio-Filho, S. T., & dos Santos, J. F.** (2009). Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends. *Polymer Engineering & Science*, 49(8), 1461-1476. <https://doi.org/10.1002/pen.21424>
- [32] **He, X.** (2017). Clinching for sheet materials. *Science and Technology of Advanced Materials*, 18(1), 381-405. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1320930>
- [33] **Lambiase, F., Di Ilio, A., & Paoletti, A.** (2015). Joining aluminium alloys with reduced ductility by mechanical clinching. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(5), 1295-1304. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6556-2>
- [34] **Lambiase, F.** (2015). Mechanical behaviour of polymer-metal hybrid joints produced by clinching using different tools. *Materials & Design*, 87, 606-618. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.037>

- [35] **Lambiase, F., & Ko, D.-C.** (2016). Feasibility of mechanical clinching for joining aluminum AA6082-T6 and Carbon Fiber Reinforced Polymer sheets. *Materials & Design*, 107, 341-352. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.061>
- [36] **Lee, C.-J., Kim, B.-M., Kang, B.-S., Song, W.-J., & Ko, D.-C.** (2017). Improvement of joinability in a hole clinching process with aluminum alloy and carbon fiber reinforced plastic using a spring die. *Composite Structures*, 173, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.010>
- [37] **Lee, S. H., Lee, C. J., Kim, B. H., Ahn, M. S., Kim, B. M., & Ko, D. C.** (2014). Effect of Tool Shape on Hole Clinching for CFRP with Steel and Aluminum Alloy Sheet. *Key Engineering Materials*, 622-623, 476-483. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.476>
- [38] **Lee, S.-H., Lee, C.-J., Lee, K.-H., Lee, J.-M., Kim, B.-M., & Ko, D.-C.** (2014). Influence of Tool Shape on Hole Clinching for Carbon Fiber-Reinforced Plastic and SPRC440. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 810864. <https://doi.org/10.1155/2014/810864>
- [39] **Eshtayeh, M. M., Hrairi, M., & Mohiuddin, A. K. M.** (2016). Clinching process for joining dissimilar materials: State of the art. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(1-4), 179-195. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7363-0>
- [40] **ISO.** (t.y.). *ISO/TR 25901-3:2016*. Geliş tarihi 14 Haziran 2022, gönderen <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/25/62522.html>
- [41] **Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple-Smith, P., & Dawes, C. J.** (1995). *Friction welding* (United States Patent Sy US5460317A). <https://patents.google.com/patent/US5460317A/en>
- [42] **Thomas, W.** (1998). *Friction stir welding and related friction process characteristics*.
- [43] **Mishra, R. S., & Ma, Z. Y.** (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1), 1-78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- [44] **Uzun, H., Dalle Donne, C., Argagnotto, A., Ghidini, T., & Gambaro, C.** (2005). Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 stainless steel. *Materials & Design*, 26(1), 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.04.002>
- [45] **Taban, E., Gould, J. E., & Lippold, J. C.** (2010). Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization. *Materials & Design (1980-2015)*, 31(5), 2305-2311. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.010>
- [46] **DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H.** (2010). Friction stir welding of dissimilar alloys – a perspective. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(4), 266-270. <https://doi.org/10.1179/174329310X12726496072400>

- [47] **Azarsa, E., & Mostafapour, A.** (2013). On the feasibility of producing polymer–metal composites via novel variant of friction stir processing. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4), 682-688. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.08.007>
- [48] **Eslami, S., Tavares, P. J., & Moreira, P. M. G. P.** (2017). Friction stir welding tooling for polymers: Review and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5), 1677-1690. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9205-0>
- [49] **Huang, Y., Meng, X., Xie, Y., Wan, L., Lv, Z., Cao, J., & Feng, J.** (2018). Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 105, 235-257. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.005>
- [50] **Dong, H., Tang, Z., Li, P., Wu, B., Hao, X., & Ma, C.** (2021). Friction stir spot welding of 5052 aluminum alloy to carbon fiber reinforced polyether ether ketone composites. *Materials & Design*, 201, 109495. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109495>
- [51] **Lambiase, F., Derazkola, H. A., & Simchi, A.** (2020). Friction Stir Welding and Friction Spot Stir Welding Processes of Polymers—State of the Art. *Materials*, 13(10), 2291. <https://doi.org/10.3390/ma13102291>
- [52] **Mosavvar, A., Azdast, T., Moradian, M., & Hasanzadeh, R.** (2019). Tensile properties of friction stir welding of thermoplastic pipes based on a novel designed mechanism. *Welding in the World*, 63(3), 691-699. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-00698-6>
- [53] **Nandan, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H.** (2008). Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53(6), 980-1023. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>
- [54] **Liu, F. C., Nakata, K., Liao, J., Hirota, S., & Fukui, H.** (2014). Reducing bubbles in friction lap welded joint of magnesium alloy and polyamide. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(7), 578-587. <https://doi.org/10.1179/1362171814Y.0000000228>
- [55] **Liu, F. C., Liao, J., & Nakata, K.** (2014). Joining of metal to plastic using friction lap welding. *Materials & Design (1980-2015)*, 54, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.056>
- [56] **Liu, F. C., Liao, J., Gao, Y., & Nakata, K.** (2015). Effect of plasma electrolytic oxidation coating on joining metal to plastic. *Science and Technology of Welding and Joining*, 20(4), 291-296. <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000012>
- [57] **Kimiaki, N., Hironobu, T., Bolyu, X., Atsuki, T., & Kazuhiro, N.** (2018). Effect of silane coupling on the joint characteristics of friction lap joined Al alloy/CFRP. *Welding International*, 32(5), 328-337. <https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1346819>
- [58] **Liu, F. C., Dong, P., & Pei, X.** (2020). A high-speed metal-to-polymer direct joining technique and underlying bonding mechanisms. *Journal of Materials Processing Technology*, 280, 116610. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116610>

- [59] **Nagatsuka, K., Yoshida, S., Tsuchiya, A., & Nakata, K.** (2015). Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining. *Composites Part B: Engineering*, 73, 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.029>
- [60] **Schilling, C., & Santos, J. dos.** (2004). *Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding* (United States Patent Sy US6722556B2). <https://patents.google.com/patent/US6722556B2/en>
- [61] **Amancio-Filho, S. T., & dos Santos, J. F.** (2012). *Method for joining metal and plastic workpieces* (Patent Sy EP2329905B1).
- [62] **Goushegir, S. M.** (2016). Friction spot joining (FSpJ) of aluminum-CFRP hybrid structures. *Welding in the World*, 60(6), 1073-1093. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0368-y>
- [63] **Goushegir, S. M., dos Santos, J. F., & Amancio-Filho, S. T.** (2015). Influence of process parameters on mechanical performance and bonding area of AA2024/carbon-fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) friction spot single lap joints. *Materials & Design*, 83, 431-442. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.044>
- [64] **Esteves, J. V., Goushegir, S. M., dos Santos, J. F., Canto, L. B., Hage, E., & Amancio-Filho, S. T.** (2015). Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide): Effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength. *Materials & Design*, 66, 437-445. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.070>
- [65] **Amancio-Filho, S. T., Bueno, C., dos Santos, J. F., Huber, N., & Hage, E.** (2011). On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures. *Materials Science and Engineering: A*, 528(10-11), 3841-3848. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.085>
- [66] **Kiss, Z., & Czigány, T.** (2007). Applicability of friction stir welding in polymeric materials. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 51(1), 15-18. <https://doi.org/10.3311/pp.me.2007-1.02>
- [67] **Lambiase, F., Paoletti, A., Grossi, V., & Genna, S.** (2017). Improving energy efficiency in friction assisted joining of metals and polymers. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 379-389. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.005>
- [68] **Lambiase, F., & Paoletti, A.** (2018). Friction Assisted Joining of titanium and polyetheretherketone (PEEK) sheets. *Thin-Walled Structures*, 130, 254-261. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.05.020>
- [69] **Lambiase, F., & Paoletti, A.** (2018). Mechanical behavior of AA5053/polyetheretherketone (PEEK) made by Friction Assisted Joining. *Composite Structures*, 189, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.045>
- [70] **Lambiase, F., Di Ilio, A., & Paoletti, A.** (2020). Hybrid numerical modeling of Friction Assisted Joining. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 233-243. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.031>

- [71] **Lambiase, F., Paoletti, A., & Durante, M.** (2021). Mechanism of bonding of AA7075 aluminum alloy and CFRP during friction assisted joining. *Composite Structures*, *261*, 113593. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113593>
- [72] **Lambiase, F., Grossi, V., & Paoletti, A.** (2022). High-speed joining of hybrid metal-polymer joints during the friction-assisted joining process. *Composite Structures*, *280*, 114890. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114890>
- [73] **Filho, S. D. T. A., Beyer, M., & Santos, J. F. D.** (2009). *Method of connecting a metallic bolt to a plastic workpiece* (United States Patent Sy US7575149B2). <https://patents.google.com/patent/US7575149/en?q=US+7.575.149>
- [74] **Sankaranarayanan, R., & Hynes, N. R. J.** (2019). *Friction riveting for joining of wide range of dissimilar materials*. 150004. <https://doi.org/10.1063/1.5122553>
- [75] **Cordeiro de Proença, B., Blaga, L., Fernandez dos Santos, J., Bresciani Canto, L., & de Traglia Amancio Filho, S.** (2017). Friction riveting ('FricRiveting') of 6056 T6 aluminium alloy and polyamide 6: Influence of rotational speed on the formation of the anchoring zone and on mechanical performance. *Welding International*, *31*(7), 509-518. <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1218627>
- [76] **Blaga, L., Bancilă, R., dos Santos, J. F., & Amancio-Filho, S. T.** (2013). Friction Riveting of glass-fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints. *Materials & Design*, *50*, 825-829. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.061>
- [77] **Borba, N. Z., Blaga, L., dos Santos, J. F., & Amancio-Filho, S. T.** (2018). Direct-Friction Riveting of polymer composite laminates for aircraft applications. *Materials Letters*, *215*, 31-34. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.033>
- [78] **Hynes, N. R. J., Vignesh, N. J., & Velu, P. S.** (2020). Low-speed friction riveting: A new method for joining polymer/metal hybrid structures for aerospace applications. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *42*(8), 434. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02519-8>
- [79] **Blaga, L., dos Santos, J. F., Bancila, R., & Amancio-Filho, S. T.** (2015). Friction Riveting (FricRiveting) as a new joining technique in GFRP lightweight bridge construction. *Construction and Building Materials*, *80*, 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.001>
- [80] **Zocoller Borba, N., Blaga, L. A., dos Santos, J., Bresciani Canto, L., & Amancio-Filho, S.** (2014). Friction riveting of pultruded thermoset glass fiber reinforced polyester composite and TI6AL4V hybrid joints. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, *2*.
- [81] **Gagliardi, F., Conte, R., Ciancio, C., Simeoli, G., Pagliarulo, V., Ambrogio, G., & Russo, P.** (2018). Joining of thermoplastic structures by Friction Riveting: A mechanical and a microstructural investigation on pure and

glass reinforced polyamide sheets. *Composite Structures*, 204, 268-275.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.092>

- [82] **Graff, K. F.** (1981). 1—A History of Ultrasonics. İçinde W. P. Mason & R. N. Thurston (Ed.), *Physical Acoustics* (C. 15, ss. 1-97). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-477915-0.50006-3>
- [83] **Okada, M., Shin, S., Miyagi, M., & Matsuda, H.** (1963). Joint Mechanism of Ultrasonic Welding. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 4(4), 250-255. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.4.250>
- [84] **Shoh, A.** (1976). Welding of thermoplastics by ultrasound. *Ultrasonics*, 14(5), 209-217. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(76\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0041-624X(76)90020-2)
- [85] **Frankel, E. J., & Wang, K. K.** (1980). Energy transfer and bond strength in ultrasonic welding of thermoplastics. *Polymer Engineering & Science*, 20(6), 396-401. <https://doi.org/10.1002/pen.760200604>
- [86] **Tolunay, M. N., Dawson, P. R., & Wang, K. K.** (1983). Heating and bonding mechanisms in ultrasonic welding of thermoplastics. *Polymer Engineering & Science*, 23(13), 726-733.
<https://doi.org/10.1002/pen.760231307>
- [87] **Sancaktar, E.** (1999). Polymer adhesion by ultrasonic welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 13(2), 179-201.
<https://doi.org/10.1163/156856199X00389>
- [88] **Benatar, A., & Gutowski, T. G.** (1989). Ultrasonic welding of PEEK graphite APC-2 composites. *Polymer Engineering & Science*, 29(23), 1705-1721. <https://doi.org/10.1002/pen.760292313>
- [89] **Taylor, N. S., Jones, S. B., & Weld, M.** (1989). The feasibility of welding thermoplastic composite materials. *Construction and Building Materials*, 3(4), 213-219. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(89\)90016-0](https://doi.org/10.1016/0950-0618(89)90016-0)
- [90] **Offringa, A. R.** (1996). Thermoplastic composites—Rapid processing applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(4), 329-336. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(95\)00048-7](https://doi.org/10.1016/1359-835X(95)00048-7)
- [91] **Harras, B., Cole, K. C., & Vu-Khanh, T.** (1996). Optimization of the Ultrasonic Welding of PEEK-Carbon Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 15(2), 174-182.
<https://doi.org/10.1177/073168449601500203>
- [92] **Welder, S. M., Lause, H. J., & Fountain, R.** (1986). Structural repair systems for thermoplastic composites. *Materials & Design*, 7(3), 147-149.
[https://doi.org/10.1016/0261-3069\(86\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0261-3069(86)90007-5)
- [93] **Davies, P., Cantwell, W. J., Jar, P.-Y., Bourban, P.-E., Zysman, V., & Kausch, H. H.** (1991). Joining and repair of a carbon fibre-reinforced thermoplastic. *Composites*, 22(6), 425-431.
[https://doi.org/10.1016/0010-4361\(91\)90199-Q](https://doi.org/10.1016/0010-4361(91)90199-Q)
- [94] **Balle, F., Wagner, G., & Eifler, D.** (2007). Ultrasonic spot welding of aluminum sheet/carbon fiber reinforced polymer—Joints. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 38(11), 934-938.
<https://doi.org/10.1002/mawe.200700212>

- [95] **Balle, F., Wagner, G., & Eifler, D.** (2009). Ultrasonic Metal Welding of Aluminium Sheets to Carbon Fibre Reinforced Thermoplastic Composites. *Advanced Engineering Materials*, 11(1-2), 35-39. <https://doi.org/10.1002/adem.200800271>
- [96] **Balle, F., & Eifler, D.** (2012). Statistical test planning for ultrasonic welding of dissimilar materials using the example of aluminum-carbon fiber reinforced polymers (CFRP) joints. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 43(4), 286-292. <https://doi.org/10.1002/mawe.201200943>
- [97] **Lionetto, F., Balle, F., & Maffezzoli, A.** (2017). Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 247, 289-295. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.002>
- [98] **Staab, F., Liesegang, M., & Balle, F.** (2020). Local shear strength distribution of ultrasonically welded hybrid Aluminium to CFRP joints. *Composite Structures*, 248, 112481. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112481>
- [99] **Benatar, A., Eswaran, R. V., & Nayar, S. K.** (1989). Ultrasonic welding of thermoplastics in the near-field. *Polymer Engineering & Science*, 29(23), 1689-1698. <https://doi.org/10.1002/pen.760292311>
- [100] **Benatar, A., & Cheng, Z.** (1989). Ultrasonic welding of thermoplastics in the far-field. *Polymer Engineering & Science*, 29(23), 1699-1704. <https://doi.org/10.1002/pen.760292312>
- [101] **Mitschang, P., Velthuis, R., Emrich, S., & Kopnarski, M.** (2009). Induction Heated Joining of Aluminum and Carbon Fiber Reinforced Nylon 66. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 22(6), 767-801. <https://doi.org/10.1177/0892705709105969>
- [102] **Mitschang, P., Velthuis, R., & Didi, M.** (2013). Induction Spot Welding of Metal/CFRPC Hybrid Joints. *Advanced Engineering Materials*, 15(9), 804-813. <https://doi.org/10.1002/adem.201200273>
- [103] **Didi, M., & Mitschang, P.** (2018). Induction Welding of Metal/Composite Hybrid Structures. İçinde *Joining of Polymer-Metal Hybrid Structures* (ss. 101-125). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119429807.ch4>
- [104] **Feistauer, E. E., dos Santos, J. F., & Amancio-Filho, S. T.** (2020). An investigation of the ultrasonic joining process parameters effect on the mechanical properties of metal-composite hybrid joints. *Welding in the World*, 64(9), 1481-1495. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00927-x>
- [105] **Mitschang, P., & Velthuis, R.** (2008). *PROCESS PARAMETERS FOR INDUCTION WELDING OF METAL/COMPOSITE JOINTS*. 10.
- [106] **Kagan, V. A., & Nichols, R. J.** (2005). Benefits of Induction Welding of Reinforced Thermoplastics in High Performance Applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24(13), 1345-1352. <https://doi.org/10.1177/0731684405048846>

- [107] **Costa, A. P. da, Botelho, E. C., Costa, M. L., Narita, N. E., & Tarpani, J. R.** (2012). A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 4, 255-265. <https://doi.org/10.5028/jatm.2012.04033912>
- [108] **van Ingen, J. W., Buitenhuis, A., van Wijngaarden, M., & Iii, F. S.** (2010). *Development of the Gulfstream G650 Induction Welded Thermoplastic Elevators and Rudder*. 17.
- [109] **Velmurugan, P., Manohar, J., Kannan, C. R., Manivannan, S., Vairamuthu, J., & Stalin, B.** (2020). A Study On development of Induction Welding of Thermoplastic Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 988(1), 012109. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/988/1/012109>
- [110] **Kawahito, Y., & Katayama, S.** (2010). Characteristics of LAMP joining structures for several materials. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2010(1), 1469-1473. <https://doi.org/10.2351/1.5062004>
- [111] **Katayama, S., & Kawahito, Y.** (2008). Laser direct joining of metal and plastic. *Scripta Materialia*, 59(12), 1247-1250. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.08.026>
- [112] **Niwa, Y., Kawahito, Y., Kubota, S., & Katayama, S.** (2007). Development and improvement in laser direct joining of metal and plastic. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2007(1), 902. <https://doi.org/10.2351/1.5061099>
- [113] **Ghorbel, E., Casalino, G., & Abed, S.** (2009). Laser diode transmission welding of polypropylene: Geometrical and microstructure characterisation of weld. *Materials & Design*, 30(7), 2745-2751. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.027>
- [114] **Sheng, L., Jiao, J., Du, B., Wang, F., & Wang, Q.** (2018). Influence of Processing Parameters on Laser Direct Joining of CFRTP and Stainless Steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, e2530521. <https://doi.org/10.1155/2018/2530521>
- [115] **Jiao, J., Jia, S., Xu, Z., Ye, Y., Sheng, L., & Zhang, W.** (2019). Laser direct joining of CFRTP and aluminium alloy with a hybrid surface pre-treating method. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106911. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106911>
- [116] **Klotzbach, A., Langer, M., Pautzsch, R., Standfuß, J., & Beyer, E.** (2017). Thermal direct joining of metal to fiber reinforced thermoplastic components. *Journal of Laser Applications*, 29(2), 022421. <https://doi.org/10.2351/1.4983243>
- [117] **Kuzu, A. T., Karaguzel, U., Erbay, B., & Bakkal, M.** (2021). Effect of scanning strategies and laser parameters on metal-composite joining. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(10), 1199-1207. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1905827>
- [118] **Jung, K.-W., Kawahito, Y., Takahashi, M., & Katayama, S.** (2013). Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to aluminum alloy.

- [119] **Jung, K. W., Kawahito, Y., Takahashi, M., & Katayama, S.** (2013). Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel. *Materials & Design*, 47, 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.015>
- [120] **Hussein, S. K., Mhessan, A. N., & Alwan, M. A.** (2017). Hot Press Joining Optimization of Polyethylene to Aluminium Alloy AA6061-T6 Lap Joint Using Design of Experiments. *Engineering Journal*, 21(7), 157-169. <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.7.157>
- [121] **Barrak, O. S., Saad, M. L., Mezher, M. T., Hussein, S. K., & Hamzah, M. M.** (2020). Joining of Double Pre-Holed Aluminum Alloy AA6061-T6 to Polyamide PA using Hot Press Technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 881(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012062>
- [122] **Tolephih, M. H., Abood, A. N., & Saad, H. M.** (2020). Hot Press Bonding of Aluminum Alloy AA6061-T6 to Polyamide and Polyamide Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012029>
- [123] **Saborowski, E., Dittes, A., Steinert, P., Lindner, T., Scharf, I., Schubert, A., & Lampke, T.** (2019). Effect of Metal Surface Topography on the Interlaminar Shear and Tensile Strength of Aluminum/Polyamide 6 Polymer-Metal-Hybrids. *Materials*, 12(18), 2963. <https://doi.org/10.3390/ma12182963>
- [124] **Wannapa, N., Tangwaradomnukun, V., & Uthaisangasuk, V.** (2020). Investigation of Joining Dissimilar Materials Using Hot Pressing Process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 886(1), 012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/886/1/012058>
- [125] **Lizzul, L., Sorgato, M., Ghiotti, A., & Bruschi, S.** (2021). Surface Treatment to Promote Joining of Glass Fiber Reinforced Plastic and AZ31 Magnesium Alloy for Fiber Metal Laminates via Hot Metal Pressing. *Key Engineering Materials*, 883, 111-118. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.883.111>
- [126] **Arkhurst, B. M., Kim, J. H., & Lee, M.-Y.** (2019). Hot metal pressing joining of carbon fiber reinforced plastic to AZ31 Mg alloy and the effect of the oxide surface layer on joint strength. *Applied Surface Science*, 477, 241-256. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.009>
- [127] **Liu, Y., Su, J., Ma, G., Han, X., Tan, C., Wu, L., Chen, B., & Song, X.** (2021). Effect of the laser texturing width on hot-pressing joining of AZ31B and CFRTP. *Optics & Laser Technology*, 143, 107350.
- [128] **Hamzah, M. M., & Hussein, S. K.** (2020). Effect of Surface Pretreatment on Hot Press Lap joining of High Density Polyethylene to Stainless Steel Alloy AISI 304L. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 745(1), 012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012058>

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Burak KILIÇ

ÖĞRENİM DURUMU

2014 Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği Lisans, 2014

2015 GEV / Türk Kaynak Teknolojisi Akademisi
Uluslararası Kaynak Mühendisliği, 2015

2022 İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fak.
Malzeme ve İmalat YL Programı, 2022

MESLEKİ DENEYİM

2014 – 2015 Mast Metal Çelik Yapı, Kalite Mühendisi

2015 – 2016 Stark Mekatronik, İmalat Mühendisi

2016 Universal Certification, Kaynak Mühendisi

2017 – 2018 Türk Standardları Enstitüsü, Muayene Uzmanı

2018 – günümüz Işık Üniversitesi, Araştırma Görevlisi

