



**ULTRASONİK BİRLEŞME DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI VE
ULTRASONİK BİRLEŞME İLE ALÜMİNYUM FOLYOLARIN
KATMANLI BİRLEŞTİRİLMESİ**

Muhammet KURT

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

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

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

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

Muhammet KURT

06/01/2023

ULTRASONİK BİRLEŞME DENEY DÜZENEGİ TASARIMI VE ULTRASONİK BİRLEŞME İLE ALÜMİNYUM FOLYOLARIN KATMANLI BİRLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammet KURT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Konvansiyonel üretim teknolojileri ile karşılaştırıldığında, son zamanların en çok rağbet gören üretim yöntemlerinden olan metal eklemeli imalat teknolojileri; muhtemel kullanım alanları, çeşitli parçaları üretim kolaylığı, geleneksel tasarım kısıtlamalarından bağımsız oluşu, tasarım optimizasyonlarına uygunluğu ve hızla gelişen teknolojik alt yapısıyla oldukça parlak bir geleceğe sahiptir. Metal eklemeli imalat teknolojilerinin bu potansiyeli dolayısıyla, bu teknolojiye dahil edilebilecek çeşitli alt sınıflarda, farklı bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Bu alt sınıflardan birisi olan ultrasonik metal eklemeli imalat (UMEM); aynı veya farklı tipteki ince metal folyoların katmanlı bir şekilde, bir katı hâl kaynağı olan ultrasonik birleşme ile birleştirilmesi üzerinde temellenmiş bir katmanlı imalat yöntemidir. Bu çalışma kapsamında, UMEM'in temellerinin incelenmesi adına, bir ultrasonik birleştirme düzeneği tasarlanıp üretilmiş ve ince alüminyum folyoların katmanlı bir şekilde birleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe istinaden yapılan deney tasarımı ile temel ultrasonik birleşme parametrelerinden statik yükleme, genlik ve kaynak hızı arasındaki ilişkinin irdelenmesi ve bu parametrelerin ultrasonik birleşme kalitesine etkisinin anlaşılması için, 45-55 μm arası genlik, 30-50 kg arası statik yükleme ve 4-10 rpm arası kaynak hızları ile dört adet alüminyum folyonun katmanlı ultrasonik birleştirmesine istinaden 15 farklı parametre seti ile birleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden 11 adedi başarılı, 4 adedi başarısız olmuştur. Başarılı olan birleştirmeler, soyma testine tabi tutulmuştur. Bu testler sonucunda; 55 μm genlik, 40 kg statik yükleme ve 10 rpm kaynak hızından oluşan deney setiyle, 185 N seviyesindeki en yüksek soyma testi değeri elde edilmiştir. Ultrasonik birleştirme sonrasında üç adet numune hazırlanıp bu numunelerin taramalı elektron mikroskobu altında ultrasonik bağlantı arayüzleri incelenerek bağlanma arayüzlerindeki yüzey hataları tespit edilmiş ve ultrasonik birleşme hattı boyunca oluşan lineer kaynak yoğunluğu %90 olarak hesaplanmıştır.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Ultrasonik metal eklemeli imalat, ultrasonik kaynak, ultrasonik birleşme parametreleri.

Sayfa Adedi : 89

Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

DESIGN OF AN ULTRASONIC CONSOLIDATION EXPERIMENTAL SETUP AND ULTRASONIC CONSOLIDATION OF LAMINATED ALUMINUM FOILS

(Master Thesis)

Muhammet KURT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Compared with conventional manufacturing technologies, metal additive manufacturing technologies which are one of the most popular manufacturing methods of recent times, has a very bright future with its possible application fields, ease of manufacturing of various parts, independence from traditional design constraints, compatibility for design optimizations and rapidly developing technological infrastructure. Due to this potential of metal additive manufacturing technologies, different scientific studies are carried out in various subclasses that can be included in this technology. Ultrasonic metal additive manufacturing, which is one of these subclasses is an additive manufacturing method based on the consolidation of thin metal foils of the same or different types in a layered manner by ultrasonic welding which is a solid state welding. In this study, in order to examine the foundations of ultrasonic additive manufacturing, an ultrasonic additive consolidation device was designed and manufactured. It was aimed to weld thin aluminum foils in a layered manner. In order to examine the relationship between static loading, amplitude and welding speed, which are the basic ultrasonic bonding parameters, and to understand the effect of these parameters on the ultrasonic bonding quality, the amplitude between 45-55 μm , static loading between 30-50 kg and welding speed between 4-10 rpm are specified. Consolidation experiments were carried out with 15 different parameter sets based on the ultrasonic additive consolidation of four aluminum foils. 11 of these experiments were successful and 4 were unsuccessful. Successful experiments were subjected to the peel test. As a result of these tests, with the experimental set consisting of 55 μm amplitude, 40 kg static loading and 10rpm welding speed, the highest peel test value of 185 N was obtained. After ultrasonic bonding, three specimens were prepared and the ultrasonic bonding interfaces of these specimens were examined under a scanning electron microscope and surface defects at the bonding interfaces were detected and the linear weld density along the ultrasonic bonding interfaces was calculated as 90%.

Science Code : 91438

Key Words : Ultrasonic metal additive manufacturing, ultrasonic welding, ultrasonic bonding parameters.

Page Number : 89

Supervisor : Prof. Dr. Oguzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını hazırlarken desteklerini, yardımlarını ve yönlendirmelerini eksik etmeyen danışman hocam Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a, ekip liderimiz Sn. Mustafa DEMİRCAN'a, Sn. Dr. Erdinç ERÇİL'e, kıymetli meslektaşım Sn. Taha YILMAZ'a, değerli brazing atölyesi ekibine, ASELSAN A.Ş. çalışanlarına, ASELSAN A.Ş.'ye ve ismini sayamadığım, her türlü yardımı elinden geldiğince yapan herkese teşekkürü bir borç bilirim. Ve elbette bu süreçte gerek maddi gerek manevi hiçbir desteği esirgemeyen aileme ve her şartta yanımda olup varlığıyla beni motive eden sevgili eşim Sümeyye'ye şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ULTRASONİK EKLEMELİ İMALAT.....	5
2.1. Kapalı İç Geometrilili Parçaların Üretimi	5
2.2. Ultrasonik Metal Kaynağının Alt Elemanları	10
2.2.1. Ultrasonik jeneratör	11
2.2.2. Dönüştürücü	11
2.2.3. Yükseltici	11
2.2.4. Ultrasonik kafa (horn, sonotrot).....	11
2.2.5. Örs	12
2.3. Ultrasonik Metal Kaynağı Sistemleri	12
2.3.1. Ultrasonik nokta kaynağı	12
2.3.2. Ultrasonik dikiş kaynağı	14
2.4. Ultrasonik Kaynak Parametreleri	14
2.4.1. Titreşim genliği ve frekans.....	15
2.4.2. Statik yükleme.....	16

	Sayfa
2.4.3. Zaman	16
2.4.4. Ön ısıtma.....	16
2.4.5. Folyo kalınlığı	17
2.4.6. Takım özellikleri.....	17
2.5. Ultrasonik Kaynak Mekanizması	17
2.6. Ultrasonik Birleşmede Mikro Yapı	21
3. MALZEME, METOT VE TEST DÜZENİĞİ KURULUMU	25
3.1. Ultrasonik Birleşme Deney Düzenliği Hazırlanışı	25
3.1.1. Tezgâh ön tasarımı	25
3.2. Ultrasonik Birleştirme Deney Düzenliğinin Üretilmesi ve Kurulması	27
3.2.1. Ultrasonik birleştirme cihazı	27
3.2.2. Pnömatik basınçlandırma	29
3.2.3. Kuvvet ölçümü	30
3.2.4. Folyo besleme sistemi	33
3.2.5. Ultrasonik birleştirme deneyleri öncesi son kontroller	36
4. ULTRASONİK BİRLEŞTİRME DENEYLERİ	41
4.1. Deney Tasarımı.....	45
4.2. Ultrasonik Birleştirme Deney Aşamaları.....	46
4.3. Ultrasonik Birleştirme Deney Sonuçları	49
5. SOYMA TESTLERİ VE BAĞLANTI ARAYÜZÜ İNCELEMELERİ	57
5.1. Soyma Testleri	57
5.2. Soyma Testi Sonuçları	59
5.3. Bağlantı Arayüzü İncelemeleri	66
5.3.1. Yüzey hazırlama işlemleri.....	66

Sayfa

5.3.2. Taramalı elektron mikroskobu ile bağlantı arayüzü incelemeleri.....	69
5.3.3. Lineer kaynak yoğunluğunun hesaplanması	76
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	81
EKLER.....	85
EK-1. Matlab Kodu.....	86
EK-2. Parametre Aralığı Belirleme Çalışmasının Kalitatif Sonuçları	88
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Ultrasonik birleştirme parametre aralıkları	45
Çizelge 4.2. Ultrasonik birleştirme deneyi parametreleri	46
Çizelge 4.3. Ultrasonik birleştirme deneyi sonuçları	50
Çizelge 5.1. Soyma testi sonuçları	59

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Düzeltme öncesi ölçüm.....	38
Şekil 3.2. Düzeltme sonrası ölçüm	38
Şekil 4.1. Deney-12; 50 µm, 50 kg, 10 rpm, katman-1	51
Şekil 4.2. Deney-12; 50 µm, 50 kg, 10 rpm, katman-2	51
Şekil 4.3. Deney-15; 50 µm, 40 kg, 7 rpm, katman-1	52
Şekil 4.4. Deney-15; 50 µm, 40 kg, 7 rpm, katman-2	52
Şekil 4.5. Deney-9; 50 µm, 30 kg, 4 rpm, katman-1	53
Şekil 4.6. Deney-9; 50 µm, 30 kg, 4 rpm, katman-2	53
Şekil 5.1. Genlik-soyma testi sonucu grafiği	61
Şekil 5.2. Statik yükleme-soyma testi sonucu grafiği.....	61
Şekil 5.3. Kaynak hızı-soyma testi sonucu grafiği	62
Şekil 5.4. Genlik ve statik yükleme-soyma testi sonucu grafiği.....	63
Şekil 5.5. Kaynak hızı ve statik yükleme-soyma testi sonucu grafiği	64
Şekil 5.6. Kaynak hızı ve genlik-soyma testi sonucu grafiği.....	65
Şekil 5.7. Genlik/statik yükleme ve kaynak hızı-soyma testi sonucu grafikleri.....	65
Şekil 5.8. Genlik ve statik yükleme-soyma testi sonucu grafiği.....	66

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Soğuk plaka üretimi.....	5
Resim 2.2. İşlenmiş bir soğuk plaka.	6
Resim 2.3. Radar alt elemanları-I.	6
Resim 2.4. UMEM metal kombinasyonları.	8
Resim 2.5. Ultrasonik metal eklemeli imalat.	9
Resim 2.6. Katı hal birleştirme yöntemleri.	9
Resim 2.7. UMK alt elemanları.....	11
Resim 2.8. Ultrasonik kaynak tipleri.....	12
Resim 2.9. Wedge-reed ve lateral-drive sistemleri.....	13
Resim 2.10. Ultrasonik dikiş kaynağı.	14
Resim 2.11. Ultrasonik kaynak mekanizması.....	18
Resim 2.12. UMK’da atomların difüzyonu.	18
Resim 2.13. Ovalama hareketi.....	19
Resim 2.14. Ultrasonik birleştirme değiş-tokuş dengesi.....	20
Resim 2.15. Akıllı nesneler	21
Resim 2.16. Tip-1 boşluk hatası.	21
Resim 2.17. Tip-3 boşluk hatası.	22
Resim 3.1. Ultrasonik birleştirme deney düzeneği.....	25
Resim 3.2. Branson ultraseam 20	27
Resim 3.3. Ultrasonik birleştirme cihazı.	27
Resim 3.4. Kontrol ünitesi ve kaynak cihazı.	28
Resim 3.5. Tezgâhın üretim aşamaları.....	28
Resim 3.6. Kol mekanizmasının tezgâh üzerinde iken konumu.	29

	Sayfa
Resim 3.7. Barometre ve basınçlı hava girişi.	30
Resim 3.8. Yük hücreleri ve veri işleme cihazı	30
Resim 3.9. Yük hücresi kalibrasyonu.	31
Resim 3.10. Yük hücrelerinin montajı.	31
Resim 3.11. Revizyonlar sonrası tezgâh	32
Resim 3.12. Anlık yükleme okuma arayüzü.	33
Resim 3.13. Hizalanmadığı için birleşme sırasında kayan folyo	34
Resim 3.14. Folyo besleme sistemi	34
Resim 3.15. Folyo hizalama arayüzü.....	34
Resim 3.16. Folyo tutucu araba-1.....	35
Resim 3.17. Folyo tutucu araba-2.....	35
Resim 3.18. Hizalı ve gergin duran folyo	36
Resim 3.19. Folyo besleme yolu strok uzatma.....	36
Resim 3.20. Kayar tabla kalibrasyonu	37
Resim 3.21. Ayar vidaları ve komparatör ile sonotrodun ayarlanması	37
Resim 3.23. Tezgâhın havaya kalkması problemi ve sonotrot.....	39
Resim 3.23. Yapay ağırlıklar	40
Resim 4.1. 75 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan birleştirme denemeleri.....	42
Resim 4.2. 100 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan denemeler-1	42
Resim 4.3. 100 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan denemeler-2.	42
Resim 4.4 100 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan denemeler-3.	42
Resim 4.5. 100 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan denemeler-4.	42
Resim 4.6. Sonotroda yapışan folyo.	43
Resim 4.7. 15 mm x 420 mm ebatlarında ve 200 µm kalınlığında folyolar	43

	Sayfa
Resim 4.8. 300 mm x 60 mm ebatlarında alüminyum ana plaka.....	44
Resim 4.9. 200 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan bazı denemeler-1.....	44
Resim 4.10. 200 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan bazı denemeler-2.	44
Resim 4.11. 200 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan bazı denemeler-3.....	44
Resim 4.12. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-I.....	47
Resim 4.13. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-II	47
Resim 4.14. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-III	47
Resim 4.15. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-IV.....	48
Resim 4.16. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-V	48
Resim 4.17. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-VI.....	49
Resim 4.18. Ultrasonik birleşme deneyi numuneleri.....	50
Resim 4.19. Folyo katmanlarının birbirini altında tam hizalanamaması.....	54
Resim 5.1. Soyma testi yapılacak numuneler.....	57
Resim 5.2. Soyma testi deneyleri.....	58
Resim 5.3. Soyma testi yapılmış numuneler.	58
Resim 5.4. Deney-3 soyma testi	59
Resim 5.5. Deney-9 soyma testi	60
Resim 5.6. Deney-14 soyma testi.	60
Resim 5.7. Bağlantı arayüzü inceleme numuneleri	67
Resim 5.8. Numunelerin kesilmesi.....	67
Resim 5.9. Bağlantı arayüzü incelemeleri için hazırlanan numunelerin kesilme yönleri	68
Resim 5.10. Hazırlanan numunelerin bakalite gömülmesi işlemleri.....	68
Resim 5.11. Numunelerin yüzey aşındırma ve parlatma işlemleri.....	69
Resim 5.12. Numunelerin parlatma işlemlerinde kullanılan solüsyonlar.....	69

	Sayfa
Resim 5.13. Taramalı elektron mikroskobu	70
Resim 5.14. Numune-1'in kesim yönü ve elektron mikroskobuna yerleştirilmesi.....	70
Resim 5.15. Ultrasonik birleşme arayüzleri	71
Resim 5.16. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları	72
Resim 5.17. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları	72
Resim 5.18. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları	73
Resim 5.19. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları	73
Resim 5.20. Numune-2'nin kesim yönü ve elektron mikroskobuna yerleştirilmesi.....	74
Resim 5.21. Ultrasonik birleşme arayüzleri	75
Resim 5.22. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları	75
Resim 5.23. Numune-3'ün kesim yönü ve elektron mikroskobuna yerleştirilmesi.....	76
Resim 5.24. Ultrasonik birleşme arayüzleri	76
Resim 5.25. Numune-1'e ait birleşme hataları	77
Resim 5.26. Numune-1'de yer alan birleşme hataları-1	77
Resim 5.27. Numune-1'de yer alan birleşme hataları-2.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

Q

Isı

σ_{PL}

Plastisite için gerekli gerilme

σ_N

Normal gerilme

σ_T

Kayma gerilmesi

Kısaltmalar

Açıklamalar

EBM

Elektron ışını ergitme

EDM

Elektron boşalımlı işleme

FDM

Ergiyik biriktirmeli modelleme

LWD

Lineer kaynak yoğunluğu

RF

Radyo frekansı

RSM

Yanıt yüzeyi yöntemi

SEM

Taramalı elektron mikroskobu

SLA

Stereolitografi

UMEM

Ultrasonik metal eklemeli imalat

UMK

Ultrasonik metal kaynağı

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişim hızı ile farklı teknolojik alanlarda kullanılacak çeşitli parçalara duyulan ihtiyaç, kullanım adetleri ve nitelikli olmaları bakımından birbirine paralellik göstermektedir. Bu ihtiyaçların giderilmesi adına, geleneksel olarak adlandırılan üretim yöntemleri, bunların kullanılmasıyla oluşan tecrübe neticesinde güvenle kullanılmaya devam etmektedir. Günümüz şartlarında üretim sektöründe hızlı prototipleme, tasarruf, çevre bilinci, verim ve zaman gibi kavramlarla ilgili farkındalıkların artmasına istinaden, alışılmış imalat yöntemlerinin dışına çıkılması hususunda doğrudan bir ihtiyaç oluşmuştur. Konvansiyonel üretim teknolojileri ile karşılaştırıldığında, son zamanların en çok rağbet gören üretim yöntemlerinden olan eklemeli imalat teknolojilerini; hızlı üretim çıktısı verebilme imkânı, muhtemel kullanım alanları, farklı parçaları üretim kolaylığı, geleneksel tasarım kısıtlamalarından bağımsız oluşu, tasarım optimizasyonlarına uygunluğu ve hızla gelişen teknolojik alt yapısıyla, yukarıda bahsi geçen ihtiyaca cevap verme noktasında pek çok sektörün ve bilim adamının ilgisini çekmiş olması dolayısıyla farklı birçok alanda kendisine çalışma imkânı bulmuştur. Bu çalışmalar sonucunda, farklı eklemeli imalat metotları ortaya çıkmıştır.

Savunma sanayisinde ve çeşitli endüstri kollarında da günümüz şartlarında ortaya çıkan ihtiyaçlara istinaden, geleneksel imalat yöntemlerinden farklı üretim şekillerinin de değerlendirilerek kullanıma alınması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma da radar sistemlerinde yer alan ve geleneksel olarak vakumlu sert lehimleme yöntemi ile üretilen dalga kılavuzu, anten vb. radar komponentlerinin, “alışılmamış eklemeli imalat yöntemleri ile üretimi mümkün olabilir mi” motivasyonu ile ortaya çıkmıştır.

Alışılmamış metal eklemeli imalat yöntemlerinden olan ultrasonik metal eklemeli imalat (UMEM) günümüz itibarıyla EBM, SLA, FDM gibi popüler eklemeli imalat yöntemleri kadar kendisine çalışma alanı henüz bulamamış olsa da muhtemel kullanım alanları ve yapılan araştırma çalışmaları ile popüler eklemeli imalat yöntemlerinin kullanıldığı pek çok alanda kendine kullanım fırsatı oluşturma konusunda potansiyeli yüksek bir eklemeli imalat yöntemidir.

Bugünün şartlarında UMEM ile üretim yapan çok sınırlı sayıda ticari işletme bulunmaktadır ancak bu işletmelerin piyasaya sürdükleri UMEM cihazları ile soğuk plakalar, radyatörler, RF dalga kılavuzları, RF antenler, içerisine fiber-optik, kuvvet ölçer vb. farklı sensörler gömülmüş akıllı parçalar ve birbiriyle kombine edilen farklı metallerin kendi mekanik, ısı, elektriksel vb. özelliklerinden farklı özelliklere sahip parçalar üretilmesi gibi çeşitli birçok alanda başarılı üretimler yapıldığı görülebilmektedir. Tüm bu parçaların üretilmesi, ultrasonik birleştirmede etkili olan parametrelerin optimizasyonu ile mümkün olmaktadır.

Bu alanda önceden yapılan çalışmalarda genellikle ultrasonik birleşme parametrelerinin birbirleriyle olan ilişkileri irdelenmiştir. Ultrasonik birleşme sonucu oluşan bağlanma arayüzlerinin, bu parametrelerin değişiminden nasıl ve ne derece etkilendiğinin değerlendirilmesi hususunda ise genellikle soyma testleri ve mikroskop altında bağlantı arayüzlerinin incelenmesi şeklinde çalışmalar yapılmıştır. Örneğin 2004 yılında yayınlanan bir çalışmada, alüminyum 3003 serisi folyolarla yapılan ultrasonik birleştirme denemelerinde, titreşim genliği, kontak basıncı ve kaynak hızı parametreleri arasındaki ilişkiyi belirleyen deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki deney şartlarında, 100 μm kalınlığındaki 3003-H18 serisi alüminyum folyolar için ideal kontak basıncının 172-276 kPa arasında olduğu, ideal genlik değerlerinin 8.4-14.3 μm arasında olduğu, ideal kaynak hızının ise 34.5 mm/s'den daha küçük hızlar olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada, düşük genlik değerlerinin, düşük kontak basınçlarının ve yüksek hızların kullanımında, soyma testleri sonucuna istinaden, folyolar arasında kalitesiz bağlar kurulduğu tespit edilmiştir. Tam tersi durumda, genlik ve temas basıncının arttığı ve kaynak hızlarının azaldığı durumda ise folyolar arasında oluşan bağların daha kuvvetli olduğu ve kaynak kalitesinin optimum seviyede yakalanabilmesinin bu üç parametre arasındaki ilişkiye bağlı olduğu ifade edilmiştir [1].

2009 yılında yapılan bir çalışmada, en önemli ultrasonik birleştirme parametrelerinin titreşim genliği, normal kuvvet ve kaynak hızı olduğu ifade edilmiştir. Bu üç parametrenin farklı değerleriyle gerçekleştirilen deney çalışmalarının sonucunda ise, titreşim genliği ve normal kuvvetin, ultrasonik birleşme kalitesini incelemeye yönelik kullanılan lineer kaynak yoğunluğu değeri üzerinde ciddi etkileri olduğu, kaynak hızının lineer kaynak yoğunluğu üzerindeki etkilerinin ise titreşim genliği ve normal kuvvete göre daha az olduğu belirtilmiştir [2].

2006 yılında yayınlanan bir çalışmada, ultrasonik birleşmede oluşan metalurjik bağların, proses parametrelerinden ciddi bir şekilde etkilendiği ifade edilmiştir. Bu parametrelerin ise genellikle malzemenin plastik deformasyonunu arttırıcı parametrelerden olan yüksek titreşim genlikleri, yüksek normal kuvvetler, düşük kaynak hızları ve yüksek alt plaka sıcaklıkları olduğu belirtilmiştir. Bu değerlerin belirli bir sınırın altında kalması durumunda malzeme oksidasyonu dolayısıyla düşük kaliteli bağların oluşacağı, belli sınırların üzerinde olması durumunda ise yorulma kaynaklı ortaya çıkan deformasyonlar dolayısıyla yine düşük kaliteli bağların oluşacağı ifade edilmiştir [3].

2003 yılında yapılan bir diğer çalışmada, alüminyum 6061 numuneleri ile gerçekleştirilen ultrasonik birleştirme denemelerinde, ultrasonik birleştirme öncesi yağ alma ve yüzey temizliği işlemleri yapılan folyoların ve herhangi bir yüzey işlemi yapılmayan folyoların ultrasonik birleşme sonrasında birleşme kalitesi noktasında nasıl bir performans gösterdiği incelenmiştir. Yapılan soyma mekanik testleri sonucunda, ultrasonik birleşme öncesi yapılan basit bir yüzey temizliği işleminin, yüzeyler arasındaki metalurjik bağ yoğunluğunu %45 arttırdığı tespit edilmiştir. Yine bu çalışmada, parametre optimizasyonunun önemini vurgulamak adına, düşük normal kuvvet değerlerinde, hangi genlik değerinde birleştirme yapılırsa yapılsın, soyma testi sonuçlarının düşük çıktığı tespit edilmiştir. Normal kuvvetin nispeten yüksek seviyelere çıkarıldığı durumlarda ise, lineer kaynak yoğunluğunda azalmalar meydana geldiği ortaya konulmuştur [4].

2009 yılında yayınlanan bir makalede, sonotrot yüzey dokusunun ultrasonik birleşme için çok önemli olduğundan bahsedilmiştir. Sonotrot yüzeyinin pürüzlülüğü düşük olduğunda ultrasonik kaynak cihazı tarafından sağlanan ultrasonik enerjinin kaynak bölgesine aktarılabilen miktarında genlik değeri itibarıyla belirli bir sınır olduğu, bu genlik değerinin üstüne çıkıldığında, sonotrot ve folyolar arasındaki kayma durumu dolayısıyla kaynak bölgesine yapılan enerji aktarımı noktasında ciddi kayıplar olduğu ortaya konmuştur. Bunlara ek olarak, düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip sonotrolarda, ultrasonik birleşme sırasında folyoların sonotrodun altından kaymasına istinaden folyoların kırışması durumunun ortaya çıktığından bahsedilmiştir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü değerine sahip olan sonotrotların ise, ultrasonik birleşme sonrasında folyolar arasında oluşan birleşme arayüzlerindeki boşlukları arttırdığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara istinaden sonotrot yüzey pürüzlülüğü noktasında da bir optimizasyon yapılması gerektiği kanaatine vararak optimum yüzey pürüzlülüğünün $6 \mu m R_a$ civarında olması gerektiği ifade edilmiştir [5].

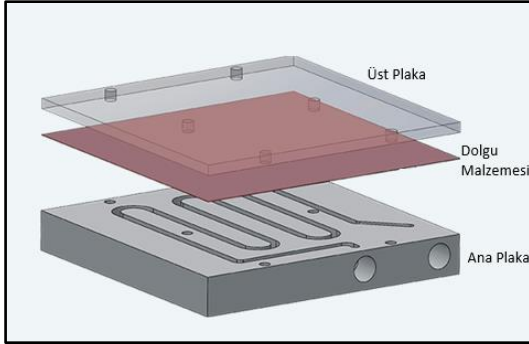
Bu tez çalışması kapsamında da UMEM'e etki eden temel parametrelerin incelenmesi adına bir ultrasonik birleştirme düzeneği tasarlanıp üretilmiş ve 200 µm kalınlığında alüminyum folyoların, katmanlı bir şekilde birleştirilmesiyle, temel ultrasonik birleşme parametreleri olan statik yükleme, genlik ve kaynak hızının birbirleriyle olan ilişkilerinin incelenmesi için çeşitli ultrasonik birleştirme deneyleri yapılması amacıyla bir deney tasarımı oluşturulmuştur. Birleştirme işlemleri sonrasında her deney setinin soyma testleri yapılmıştır. Soyma testi sonuçlarına istinaden ultrasonik birleştirme parametrelerinin birleşme kalitesine olan etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Soyma testi sonrası oluşturulan bazı numunelerin ultrasonik bağlanma arayüzleri, taramalı elektron mikroskobu ile incelenerek bağlantı arayüzlerindeki yüzey hatalarının tespit edilip literatürdeki hata tipleri ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. Numunelerden birinin kaynak hattı boyunca yüzey hataları analiz edilip bunların büyüklükleri ölçülmüştür. Bu ölçümlere istinaden lineer kaynak yoğunluğunun hesaplanması hedeflenmiştir.

Bu çalışma, ultrasonik metal birleştirmenin temel özelliklerinin incelenmesi adına, Türkiye'de bir ilk olma özelliği taşımaktadır.

2. ULTRASONİK EKLEMELİ İMALAT

2.1. Kapalı İç Geometrilili Parçaların Üretimi

Geçmişten günümüze farklı endüstri kollarında farklı projeler için, dalga kılavuzları, antenler, soğuk plakalar, eşanjörler vb. kapalı iç geometrilere sahip parçalara ihtiyaç duyulmuştur. Kapalı iç geometrilere sahip parçalar; iç geometrileri, parçanın dışından bir müdahaleyle oluşturulamayan parçaları ifade eder. Günümüzde kapalı karmaşık geometrilili parçaların üretimi konusunda; eklemeli imalat yöntemleri, vakumlu sert lehimleme, sürtünme kaynağı, difüzyon birleşmesi gibi farklı üretim metotları bulunmaktadır. Aşağıda, kapalı iç geometriye sahip parçaların geleneksel olarak vakumlu sert lehimleme yöntemi ile üretilmesi hususunda soğuk plakalar üzerinden bir örnek verilmiştir. Soğuk plakaların işlenme ve birleştirme süreçleri de radar komponentleri ile aynıdır.



Resim 2.1. Soğuk plaka üretimi [6]

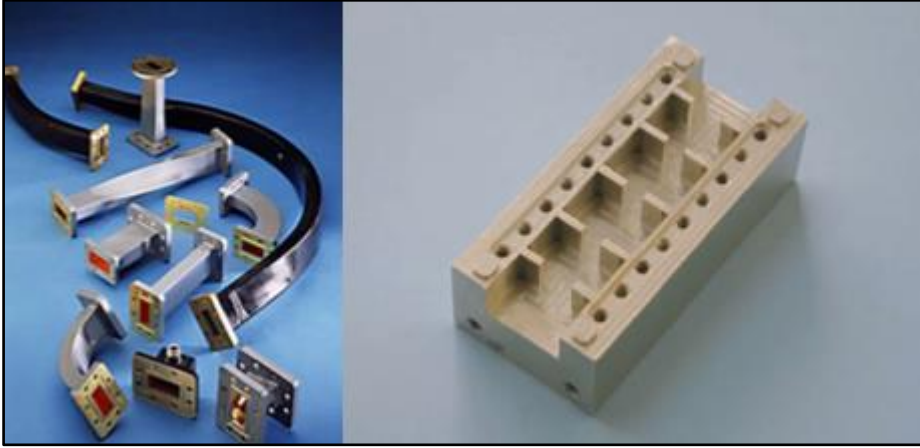
Soğuk plakalar, kapalı iç geometrilere sahip ve vakumlu sert lehimleme ile üretilen soğutma elemanlarıdır. Resim 2.1.'de [6], kanal şeklinde kapalı bir iç geometriye sahip bir soğuk plakanın, vakumlu sert lehimleme süreci öncesindeki durumu görülmektedir. Genelde gövde ve kapak şeklinde iki ana parçadan oluşan soğuk plakalarda karmaşık iç geometri, CNC frezelerde düşük yüzey pürüzlülükleri ile gövdeye işlenir ve gövdeye vakumlu sert lehimleme yöntemiyle dolgu metali kullanılarak birleştirilen kapak ile bu iç geometri kapalı bir hale getirilir. Resim 2.2.'de [7], vakumlu sert lehimleme işleminden geçerek üst ve alt katmanları birleştirilmiş, devamında CNC frezede işlenerek son haline getirilmiş ve kullanıma hazır bir soğuk plaka görülmektedir. Çoğu radar komponentinin üretim süreçleri de bu şekildedir. Yukarıda üretim süreçlerinden bahsedilen radar komponentlerinin metal

eklemeli imalat yöntemleri ile üretimi konusunda değerlendirme yapıldığında, aşağıdaki durumlar ortaya çıkmaktadır.



Resim 2.2. İşlenmiş bir soğuk plaka [7]

Farklı alanlarda kullanım konusunda kendisine yer bulan EBM, SLM gibi popüler metal eklemeli imalat yöntemlerinin, radar alt sistemlerinin üretiminde kullanımı konusunda çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Kimi radar sistemlerinde kullanılan alt eleman sayıları oldukça fazla iken kimilerinde bu sayı az fakat kullanılan parçaların iç geometrileri kompleks olabilmektedir (Resim 2.3. [8]).



Resim 2.3. Radar alt elemanları [8]

Popüler metal eklemeli imalat yöntemleri, hem radar alt sistemlerinde kullanılan parça sayısını azaltma konusunda hem de kompleks iç geometrilere sahip parçaların üretimi konusunda tasarımcıya çeşitli avantajlar sunabilmektedir ancak bu sistemlerin kullanımında birinci motivasyon radar birimlerinin elektromanyetik performansları olduğu için, metal

eklemeli imalat teknolojilerinin kullanımı noktasında pek çok dezavantajlar da ortaya çıkmaktadır.

Popüler metal eklemeli imalat yöntemlerinin anten ve anten alt parçalarının üretimi konusundaki en büyük dezavantajları, parçalarının yüzey pürüzlülükleri ve askıda kalan yüzeyler içeren parçaların üretiminde gereken destek yapılarıdır. Standart bir CNC frezede işlenen parçanın yüzey pürüzlülüğü değerleri $0.4 \mu\text{m Ra}$ civarında olabilmektedir. Radar alt sistemlerinde kullanılan parçaların, RF dalgalar ile temas ettiği yüzeylerinin yüzey pürüzlülüklerinin de bu seviyelerde olması beklenmektedir. Ancak popüler metal eklemeli imalat yöntemlerinde, kompleks iç geometrilere sahip radar komponentlerinin içeride kalan yüzeylerinde bu değerlerin yakalanması, günümüz teknolojileri ile çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Askıda kalan yüzeylerin bulunduğu parçaların eklemeli imalat yöntemleri ile üretiminde her zaman destek yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır ancak bu yapıların, parçaların üretiminden sonra anten ve dalga kılavuzlarının içerisinde çıkarılması konusunda yaşanacak sorunlar, geleneksel yöntemlerle üretilen radar alt komponentlerinin, popüler metal eklemeli imalat yöntemleri ile üretimini oldukça zorlaştırmaktadır. Popüler eklemeli imalat yöntemlerinin dezavantajlarına aşağıdaki maddeler ilave edilebilir:

- Örneğin toz beslemeli eklemeli imalat yöntemlerinde genellikle belirli seviyelerde sünellik, tokluk ve korozyon direnci olan gözenekli yapılar elde edilmektedir ancak deneysel kanıtların gösterdiği kadarıyla, UMEM ile oluşan bağ kuvveti neredeyse ana metalin bağ kuvvetine yakın olabilmektedir [9].
- SLS, FDM ve SLA gibi yöntemlerde ise düşük mukavemetli ve düşük erime sıcaklıklarına sahip polimerler kullanılır [12].
- Ultrasonik eklemeli imalatın ise bu noktada avantajı, yukarıda bahsedilen zayıf malzeme özelliklerini göstermiyor oluşudur [12].
- Bazı eklemeli imalat yöntemlerinde koruyucu inert gazların kullanımı gerekirken ultrasonik eklemeli imalatta böyle bir ihtiyaç söz konusu değildir [12].
- Lazer ergitmeli eklemeli imalat yöntemlerinde, farklı tipteki metal tozlarının bir araya getirilerek kullanıldığı durumlarda patlama şeklinde ortaya çıkabilecek tehlikeli senaryolar oluşabilmektedir [9].

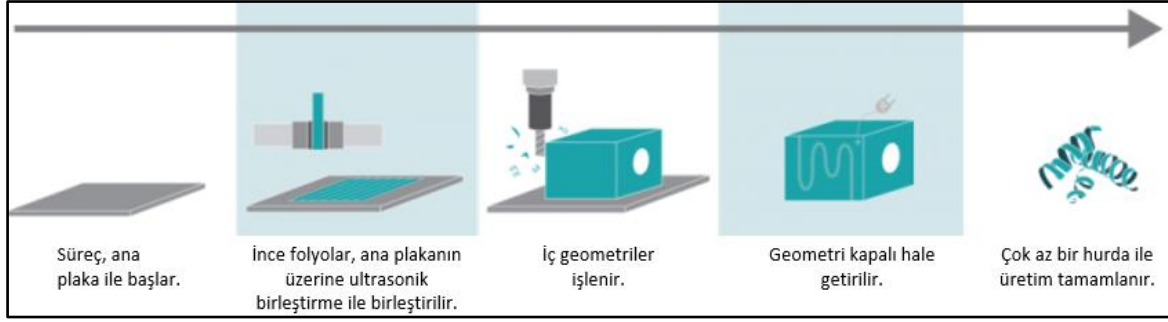
UMEM’de birleşme için genellikle alüminyum folyoları kullanılırken, nikel, bakır, magnezyum ve titanyum folyoları da kullanılabilir [10,11].

Bunların yanı sıra Resim 2.4.'te görülen metal kombinasyonlarının kullanımı da UMEM'de teorik olarak mümkün olmaktadır [7].

	Al	Be	Cu	Ge	Au	Fe	Mg	Mo	Ni	Pd	Pt	Si	Ag	Ta	Sn	Ti	W	Zr
Al Alloys	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Be Alloys	●	●			●											●		
Cu Alloys	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●
Ge		●									●							
Au	●	●							●	●	●	●	●			●	●	●
Fe Alloys						●		●	●	●	●		●	●		●	●	●
Mg Alloys							●						●			●		
Mo Alloys								●	●		●			●		●	●	●
Ni Alloys									●	●	●				●	●	●	
Pd										●				●	●			
Pt Alloys											●	●				●	●	
Si												●	●					
Ag Alloys													●	●				●
Ta Alloys														●		●	●	
Sn															●			
Ti Alloys																●	●	
W Alloys																	●	
Zr Alloys																		●

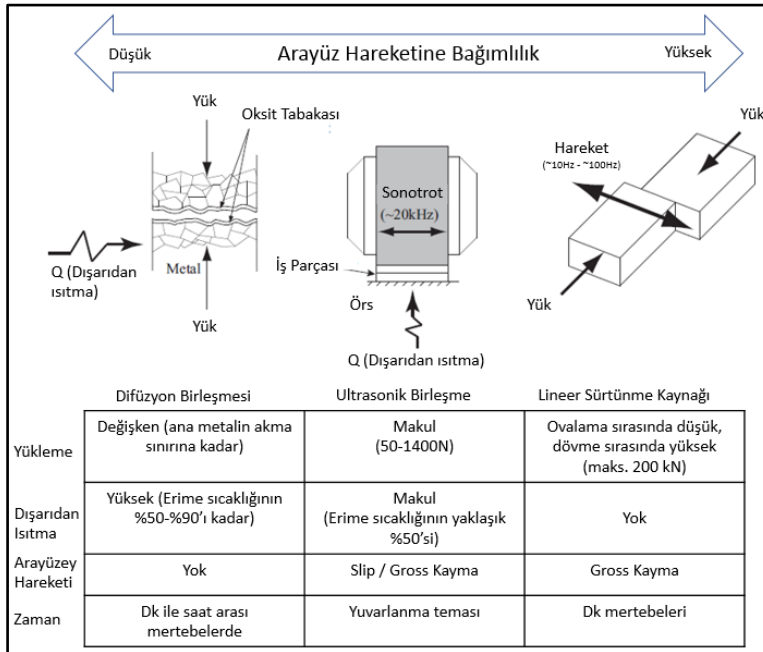
Resim 2.4. UMEM metal kombinasyonları [7]

Popüler metal eklemeli imalat yöntemleri ile radar komponenti üretmede karşılaşılmaması muhtemel bu zorluklar, bu metotların kullanımı konusunda ciddi çekinceler oluşturmaktadır. Ultrasonik metal eklemeli imalat, bu komponentlerin üretimi hususunda yukarıda bahsi geçen zorlukların söz konusu olmayacağı bir imalat yöntemidir. Dolayısıyla, ilerleyen sayfalarda üretim detayları açıklanacak olan UMEM'in, geleneksel imalat yöntemleri ile gerçekleştirilen üretime alternatif olabileceği değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeye istinaden, UMEM'in temelini oluşturan ultrasonik metal kaynağının fiziksel çalışma prensiplerinin daha net anlaşılabilmesi için bir ultrasonik birleştirme altyapısı kurulmuş ve detayları ilerleyen sayfalarda yer alan çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Katı temelli eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan ve bu tez çalışmasına da konu olan ultrasonik metal eklemeli imalat, Resim 2.5.'te [13] üretim aşamaları görüldüğü üzere; folyo şeklindeki metal katmanlarının bir ana metal gövde üzerine ultrasonik birleşme vasıtasıyla birleştirildikten sonra, kompleks iç geometrilerin işlenmesi ve parçanın üzerine yine folyo katmanlarının kaynatılmasıyla parçanın kapalı bir geometri şeklinde oluşturulması esasına dayanan hibrit bir metal eklemeli imalat yöntemidir.



Resim 2.5. Ultrasonik metal eklemeli imalat [13]

UMEM, ultrasonik metal kaynağı (UMK) üzerinde temellenmiş bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu nedenle UMEM'in anlaşılabilirliği için UMK'nin temel prensiplerinin de iyi anlaşılması gerekmektedir. UMK; basınç altında birbirine temas eden iki metal yüzeyin, sürtünme benzeri relatif hareketlerle (ultrasonik titreşimlerle), metal yüzeyleri arasında bağ oluşumunu sağlayan bir birleştirme yöntemidir [14]. Katı hal metal birleşme yöntemlerinden birisi olan UMK, difüzyon birleşmesi ile lineer sürtünme kaynağı arasında konumlanmaktadır (Resim 2.6. [12]).



Resim 2.6. Katı hal birleştirme yöntemleri [12]

Difüzyon birleşmesinde, yüzeyler arasında relatif bir sürtünme hareketi yoktur. Bunun yerine, birleştirilen metalin erime sıcaklığının %50-90'ı kadarlık bir sıcaklıkta, atomlar arası kontağın sağlanması ve yüzeyler arasındaki yüzey bozukluklarının giderilmesi için yüksek

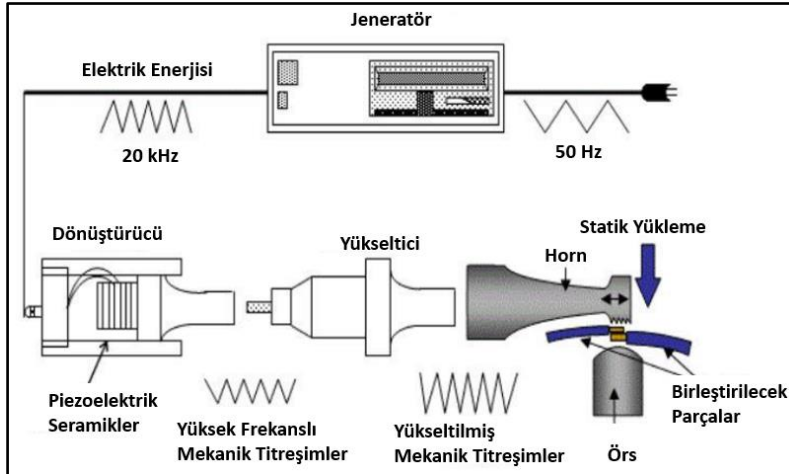
basınç uygulanmaktadır. Yüksek basınç ile atomlar, tane sınırları boyunca difüze ederek temas yüzeyleri arasındaki boşlukları doldurur ve parçalar arasında birleşme sağlanır [15]. Sürtünme kaynağında ise bağlanma, parçalar arasındaki basınç ve relatif sürtünme hareketi ile gerçekleşmektedir. Alın altına bağlanan parçalar arasında, ilk etapta nispeten düşük basınç altında, relatif hareket ile sürtünme kaynaklı ısı açığa çıkarılmaktadır. Sonrasında daha yüksek basınç uygulanarak parçalar arasındaki bağlantı son haline getirilir. Parçalar arasındaki sürtünme hareketi ve oluşan ısı neticesinde, malzemenin plastik deformasyon bölgesine ulaşması hızlanır ve yüzey bozuklukları ortadan kaldırılır. Plastik deformasyon bölgesine ulaştıktan sonra parçalar arasında bağlanma gerçekleşmektedir [16]. UMEM'in malzemeleri birleştirme sürecinde de difüzyon kaynağında olduğu gibi nispeten yüksek sıcaklıklara ulaşarak ve sürtünme kaynağında olduğu gibi birleştirilecek parçalar arasında relatif hareket ile sürtünme oluşturularak bağlanma gerçekleşir ancak UMEM'de bu yöntemlerden farklı olarak sisteme ultrasonik titreşim girdisi yapılmaktadır. Parçalar üzerindeki ultrasonik titreşimlerin, plastik deformasyon bölgesine ulaşmak için gereken stresi azalttığı tespit edilmiştir [17-18]. Bu bilgiye istinaden yapılan bazı araştırmalara göre, yukarıda bahsi geçen difüzyon birleşmesinde, parçalara ultrasonik titreşimler uygulanacak olursa, birleşme için gereken zaman azalacaktır [18].

2.2. Ultrasonik Metal Kaynağının Alt Elemanları

Bir UMK sistemi, temelde şu elemanlardan oluşur:

- Ultrasonik jeneratör (eng. ultrasonic generator/power supply)
- Dönüştürücü (eng. transducer/converter)
- Yükseltici (eng. booster)
- Ultrasonik kafa (eng. horn/sonotrode)
- Örs (eng. anvil)

Resim 2.7.'de [19] genel bir UMK düzeneğinin temel alt elemanları gösterilmiştir.



Resim 2.7. UMK alt elemanları [19]

2.2.1. Ultrasonik jeneratör

Ultrasonik jeneratör, elektrik hattından gelen 50-60 Hz arasındaki elektriksel gücü, 20-40 kHz arasında yüksek frekanslı elektrik enerjisine çevirmektedir. UMK sistemlerinde genelde 20 kHz'lik jeneratörler kullanılmaktadır.

2.2.2. Dönüştürücü

Dönüştürücü, yüksek frekanslı elektrik sinyallerini, alternatif voltaja maruz kaldığında genişleyip büzülen piezoelektrik seramikleri vasıtasıyla yüksek frekanslı mekanik titreşimlere dönüştürmektedir.

2.2.3. Yükseltici

Yükseltici, dönüştürücüden gelen yüksek frekanslı mekanik titreşimlerin genliğinin artırılmasını sağlamaktadır.

2.2.4. Ultrasonik kafa (horn, sonotrot)

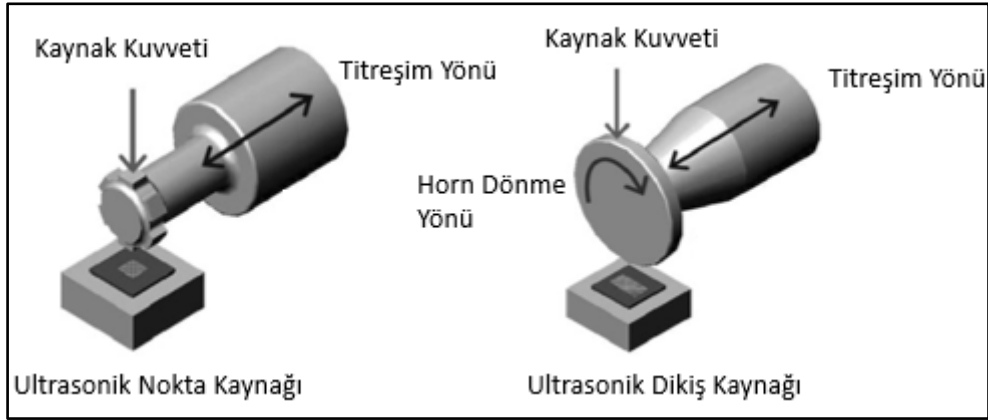
Horn, ultrasonik titreşimlerin, ultrasonik birleştirme yapılacak elamanlara temas ederek doğrudan aktarılmasını sağlayan elemandır. Farklı ultrasonik birleştirme ihtiyaçlarına göre farklı tipte hornlar bulunmaktadır. Oldukça rijit yapılardır. Genelde titanyum-alüminyum alaşımlarından üretilmektedir.

2.2.5. Örs

Örs, birleştirilecek parçaların altında bulunan elemandır. UMK sırasında, birleştirmesi yapılacak parçalar, horn ve örs arasında sıkışmaktadır. Bu nedenle hornun olduğu gibi, örs de oldukça rijit yapılıdır.

2.3. Ultrasonik metal kaynağı sistemleri

Temelde iki farklı UMK sistemi bulunmaktadır. Bunlar ultrasonik nokta kaynağı ve ultrasonik dikiş kaynağıdır (Resim 2.8. [20]).



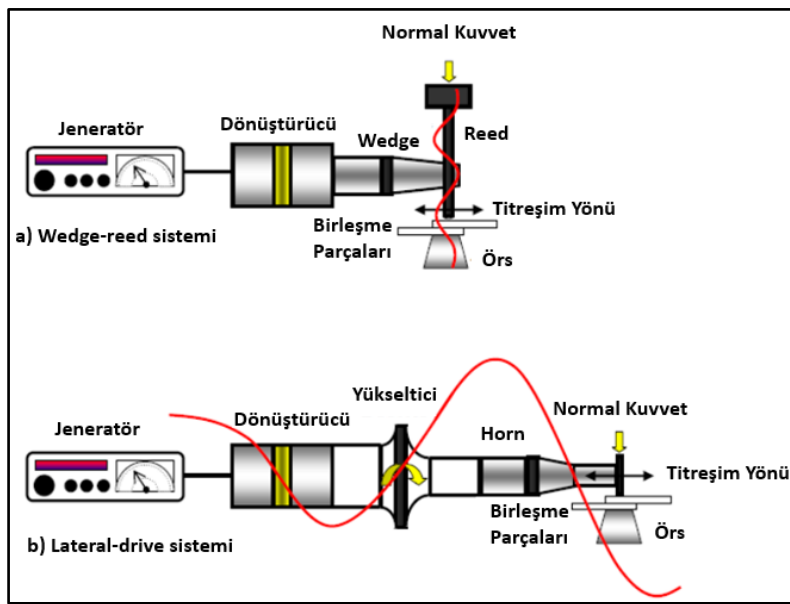
Resim 2.8. Ultrasonik kaynak tipleri [20]

2.3.1. Ultrasonik nokta kaynağı

Ultrasonik nokta kaynağında horn, birleştirilecek parçaların üzerinde kabaca nokta şeklindeki bir alana belli bir kuvvet uygular ve Resim 2.8.’de görüldüğü yönde titreşim hareketi yapan horn, birleşmeyi sağlamış olur. Ultrasonik nokta kaynağı, genelde kablo birleştirmeleri gibi basit uygulamalarda kullanılmaktadır. Genellikle 40-75 kHz’lik frekans aralıklarında çalışan ve birkaç wattlık ultrasonik güç sağlayan sistemlerdir [12]. Ultrasonik nokta kaynağında, titreşimin oluşturulma biçimi itibarıyla, detayları Resim 2.9.’da görülen iki farklı sistem bulunmaktadır. Bunlar “wedge-reed” ve “lateral-drive” sistemleridir.

Wedge-reed sistemi

Bu sistemde horn, dönüştürücüye dik bir şekilde konumlanmıştır. Dönüştürücüye gelen elektrik gücü, mekanik titreşimlere dönüştürülür. Yükseltici ile genliği artırılmış olan mekanik titreşimler, horn (wedge) ile lehimlenmiş olan reed isimli elemana aktarılır. Ultrasonik birleşme için gerekli statik yüklemeye de bir pnömatik sistem vasıtasıyla reed isimli eleman üzerinden kaynak bölgesine aktarılır. Hornun ucuna lehimlenmiş olan reed, uygulama türüne göre değiştirilebilmektedir [21].



Resim 2.9. Wedge-reed ve lateral-drive sistemleri

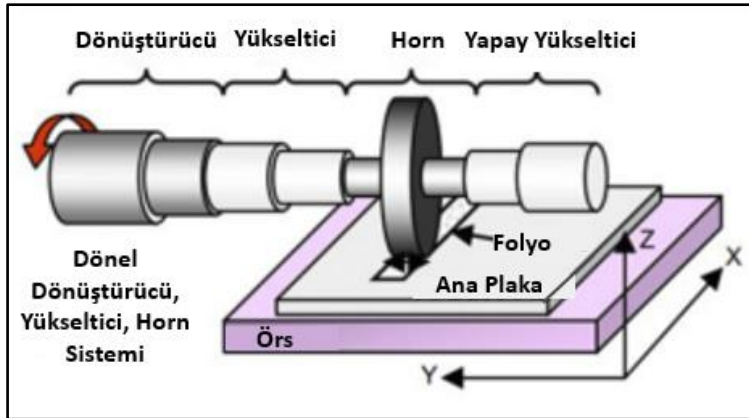
Lateral-drive sistemi

Lateral-drive ultrasonik nokta kaynağı tipinde ise elemanlar; dönüştürücü, yükseltici, horn ve hornun ucuna bağlanmış olan sonotrot isimli elemandır. Bu sistemde wedge-reed sisteminin aksine horn, dönüştürücü ve yükselticiye paralel olarak bağlanmıştır. Ultrasonik birleşme için gerekli statik yüklemeye, bu sistemde de pnömatik elemanlar aracılığıyla sağlanabilmektedir [21]. Her iki sistemde de kaynatılacak eleman ile kaynak elemanları arasında herhangi bir relatif hareket bulunmamaktadır. Sistemlerin birbirlerine göre kullanım avantajları bakımından büyük farklar bulunmamakla beraber literatürde, wedge-reed sisteminin düşük titreşim genlikleri ve yüksek statik yüklemeler ile çalışabildiğinden metaller için; lateral-drive sisteminin nispeten yüksek titreşim genlikleri ve düşük statik

yüklemeler ile çalıştığından plastikler için daha uygun olduğu ve lateral-drive sistemde, sistem üzerinde oluşan eğme momentleri dolayısıyla uygulanabilecek statik yüklemelerin sınırlı olduğu yönünde bilgiler bulunmaktadır [21].

2.3.2. Ultrasonik dikiş kaynağı

Ultrasonik dikiş kaynağı sistemi, detayları Resim 2.10.'da görülen, diğer ultrasonik birleştirme sistemlerindeki alt elemanlardan oluşmaktadır. Ultrasonik nokta kaynağı sistemlerinin aksine, 10-20 kHz'lik titreşim frekansı ile 10-100 μm mertebelerindeki titreşim genlikleri ile çalışırlar. 2 mm'ye kadar ultrasonik birleşme yapan cihazlar bulunmaktadır [12]. Bu yöntem, horn ve ultrasonik birleştirmesi yapılacak olan malzemenin birbirine göre relatif hareket yaparak devamlı birleşmenin sağlandığı ultrasonik kaynak yöntemidir. Bu metottaki relatif hareket sayesinde, ince metal folyolarının bir hat boyunca birleştirilmesi mümkün olmaktadır [21]. Standart uygulamalar dikkate alındığında bu metot, güneş enerjisi panelleri, elektrik bataryaları üretimi vb. alanlarda kullanılabilmektedir ancak eklemeli imalat çerçevesinde hibrit bir yöntemin temellerini oluşturduğu değerlendirildiğinde, popüler eklemeli imalat yöntemlerinin üretmeye muktedir olduğu çoğu parçanın, bu sistemin içerisinde yer aldığı hibrit bir yöntem ile üretilmesinin mümkün olabileceği değerlendirilmektedir.



Resim 2.10. Ultrasonik dikiş kaynağı [22]

2.4. Ultrasonik Kaynak Parametreleri

UMK'nin fiziksel olarak nasıl gerçekleştiği konusunda yapılan çalışma ve araştırmalara istinaden, tamamıyla olgunlaşmış bir birleşme mekanizmasının ortaya konulmamış olmasına

karşın, birleşmenin nasıl gerçekleştiğine dair fikir birliği oluşmasını sağlayan bir teori bulunmaktadır.

Bu teoriye göre; basınç ve ultrasonik titreşimler vasıtasıyla meydana gelen, ultrasonik dikiş kaynağı başlığında bahsedilen, birbirlerine göre relatif hareket yapan yüzeylerde oluşan ovalama hareketi ile metal yüzeyleri üzerindeki oksit tabakaları kırılmakta ve metal yüzeylerindeki mikro boyuttaki çıkıntılar birbirine yakın seviyelere getirilerek birleşme gerçekleşmektedir [9,11].

UMK'da birleşmenin gerçekleştirilebilmesi için optimize edilmesi gereken çeşitli parametreler bulunmaktadır. Bunlar;

- Titreşim genliği,
- Ultrasonik frekans,
- Statik yükleme,
- Zaman,
- Ön ısıtma
- Güç,
- Enerji,
- Malzeme çeşidi,
- Parça geometrisi (kalınlık),
- Takım özellikleri,
- Malzemelerin yüzey karakteristiği / özellikleridir [23].

Aşağıda, birleşme kalitesine en çok etki eden ultrasonik birleşme parametreleri hakkında detaylı bilgiler yer almaktadır.

2.4.1. Titreşim genliği ve frekans

UMK'da sisteme yapılan enerji girişi, birbiri ile bağ kuracak yüzeyler arasındaki etkileşime katkı sağlar ve sonuç itibarıyla bağ oluşumuna doğrudan etki etmiş olur. Sonotrodun titreşim genliği ve titreşim frekansı, bağ oluşumu için mevcut olan enerji miktarının ifade edilmesi için direkt bir göstergedir. UMK cihazlarında frekans, sonotrot geometrisi, dönüştürücü, yükseltici ve güç kaynağı gibi donanımların değişken olmaması dolayısıyla genellikle

sabittir ancak enerji girişi miktarını kontrol etmek amacıyla, UMK sistemlerinde titreşim genliği çoğu zaman değiştirilebilir şekilde tasarlanmaktadır [23]. Dolayısıyla birleşme arayüzüne uygulanan titreşim genliği ne kadar yüksek olursa, sisteme yapılan ultrasonik enerji girişi de o kadar yüksektir. Yüksek ultrasonik enerji girişi ise daha çok elastik/plastik deformasyon anlamına gelmektedir. Bu durumda oluşacak bağın kuvveti de artacaktır ancak folyo kalınlığı, parça geometrisi, malzeme kombinasyonu gibi parametrelerin varlığında her sisteme uygulanabilecek optimum bir genlik değeri bulunmaktadır. Bu optimum genlik değerinin aşılması durumunda, aşırı plastik deformasyon ve yorulma neticesinde birleşme arayüzündeki kaynak kalitesi bozulacaktır [23].

2.4.2. Statik yükleme

Statik yükleme, birleştirilecek folyoların normali yönündeki ve sonotrot tarafından folyoları birbirine bastıran kuvvettir. Statik yükleme, sisteme giren ultrasonik enerjinin folyolara yeterli miktarda aktarılması hususunda önemli bir rol oynamaktadır. Genlikte olduğu gibi statik yüklemelerde de değişken sistem parametrelerine göre optimum bir değer bulunmaktadır. Optimum değerin aşılması durumunda, folyolar arasında oluşan bağların zarar görmesi söz konusudur [23].

2.4.3. Zaman

Folyoların ultrasonik enerjiye maruz kalma süresini ifade eden bu parametre, hornun dönme hızıyla doğrudan ilişkilidir. Hornun dönüş hızı azaldıkça birleşme arayüzüne aktarılan ultrasonik enerji miktarı artar. Genlik ve statik yüklemelerde olduğu gibi, optimum değerden daha yüksek horn hızları kalitesiz birleşmelere, optimum değerden daha düşük horn hızları ise dikiş kaynağı hattı boyunca meydana gelen birleşmelerin zarar görmesine ve yorulmalara neden olabilir [23].

2.4.4. Ön ısıtma

Ultrasonik birleşme sırasında çevre sıcaklığında metalurjik bağ kurulabilmektedir ancak pek çok malzeme için ön ısıtma şartları bağ oluşumunda kolaylık sağlamaktadır. Isıtma işlemi, malzemenin plastik deformasyon bölgesindeki akış gerilimini doğrudan düşürmeye yardımcı olur. Öte yandan optimum değerden daha yüksek olan ısı girişleri, malzemeyi

yumuşattığı için folyonun sonotroda yapışmasına neden olabilmektedir. Bakır gibi bazı metaller için yüksek sıcaklıklar, oksit oluşumunu tetiklediği için fazla ısı girdisi, birleşme sırasında meydana gelen oksit uzaklaştırma sürecini sekteye uğratabilmektedir. Bazı metaller için ise yüksek sıcaklıklar, malzemenin yaşlanmasına neden olarak malzemenin kırılgan bir kimliğe bürünmesi sonucunu doğurabilmektedir [23].

2.4.5. Folyo kalınlığı

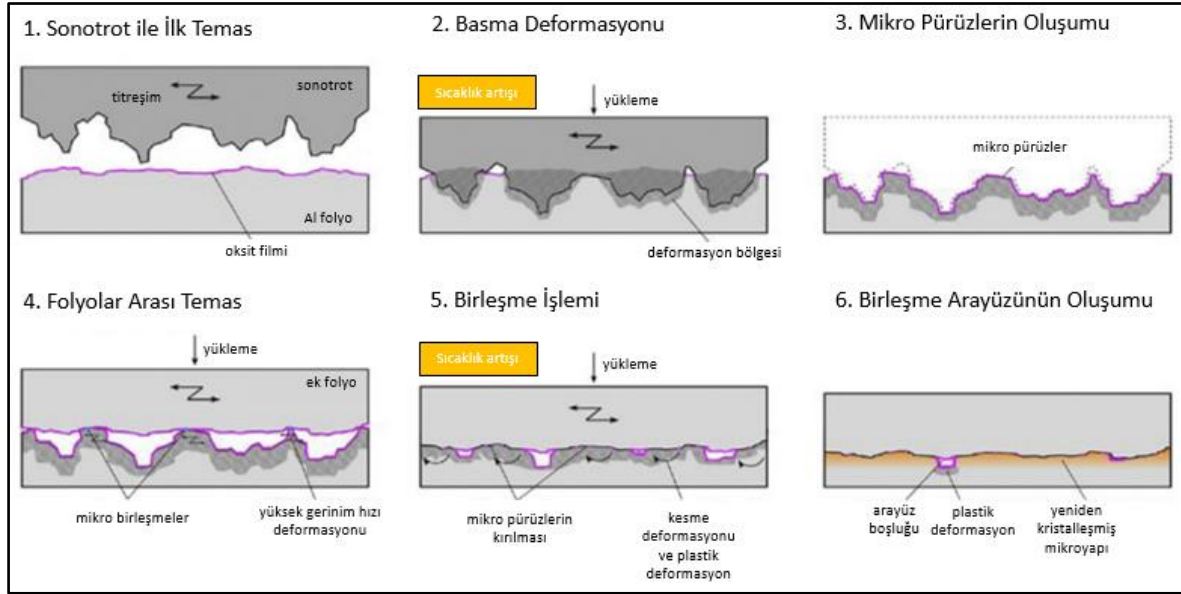
Folyo kalınlığı UMK'da göz önünde bulundurulması gereken bir diğer önemli faktördür. UMK'da kullanılan folyo kalınlıkları genellikle 100 µm-200 µm arasında değişmektedir. İnce folyolarda bağ oluşumu daha kolay gerçekleşmektedir ancak ince folyolar daha kolay deforme olacakları için birleşme sırasında ortaya çıkabilecek en muhtemel sorunlardan birisi ciddi folyo hasarlarıdır [23].

2.4.6. Takım özellikleri

Malzeme kaynaklı olan ve proses optimizasyonunu ciddi olarak etkileyen bir diğer unsur, sonotrodun yüzey pürüzlülüğüdür. Sonotrotlar genellikle titanyum veya takım çeliklerinden üretilmektedir. Sonotrotların yüzeyi EDM yöntemi ile pürüzlü hale getirilmektedir. Bu pürüzlendirme işlemi sayesinde sonotrot ve ultrasonik birleşmesi yapılacak folyo arasındaki temas yüzeyi ve sürtünme miktarı arttırılmaktadır [23].

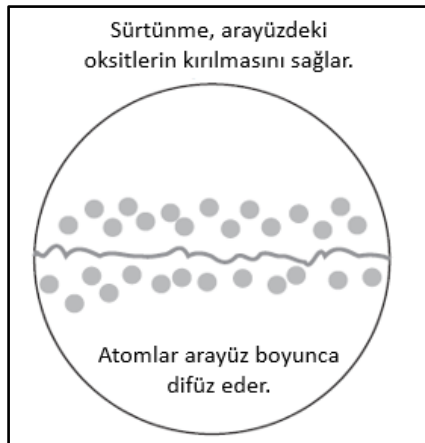
2.5. Ultrasonik Kaynak Mekanizması

Ultrasonik kaynak makinesinde bulunan ve titreşim yayan kafa (horn/sonotrot), metal yüzeylerin üzerinde oluşturduğu mikro düzeydeki yüzey pürüzleriyle plastik deformasyon gerçekleştirip yüzeylerdeki metal oksitlerini ve kontaminantları ortamdan uzaklaştırarak metaller arasında basınç altında bağ oluşabilmesine olanak sağlar. Resim 2.11.'de [13] bu teoriye istinaden oluşturulmuş ultrasonik birleşme aşamaları gösterilmiştir.



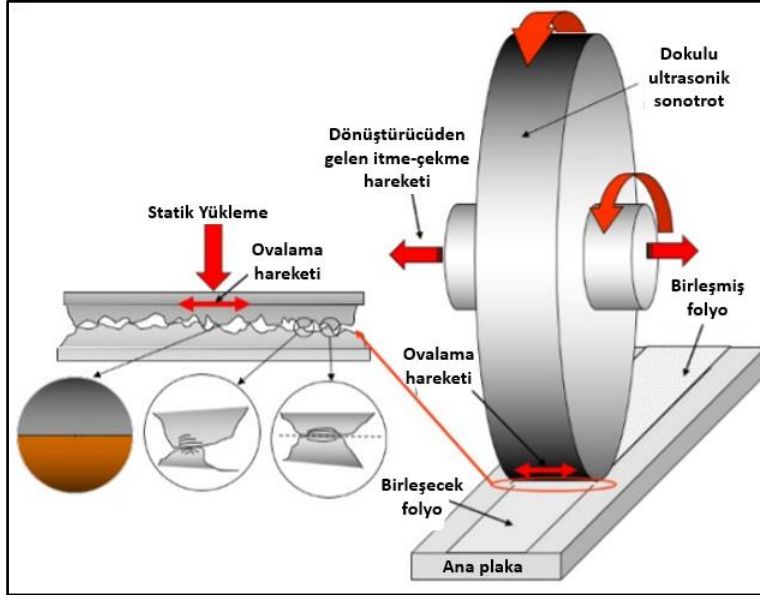
Resim 2.11. Ultrasonik kaynak mekanizması [13]

Normal şartlarda bir araya getirilen iki metal yüzeyinin, seviye olarak yalnızca metal yüzeyinden en dışarıda olan yüzey çıkıntıları birbirine temas etmekte iken, UMK'da tüm çıkıntılar birbirine yakın seviyelere getirildiği için fiziksel temas yüzeyi de artmaktadır. Oksitlerden arındırılmış saf metal yüzeyleri birbirine temas ettiğinde, metal yüzeyleri arasında metalurjik bağ oluşmaktadır. Bu bağlar, sonotrot vasıtasıyla birleşme arayüzüne aktarılan kesme titreşimleriyle devamlı olarak plastik deformasyona zorlanırken, sürtünme kaynaklı oluşan ısı da katmanlar arasındaki malzemenin difüzyonunu (Resim 2.12.) ve kristalleşmesini sağlamaktadır. Bu etkileşimlerin sonucunda, katmanlar arasında güçlü metalurjik bağların oluştuğu düşünülmektedir [24].



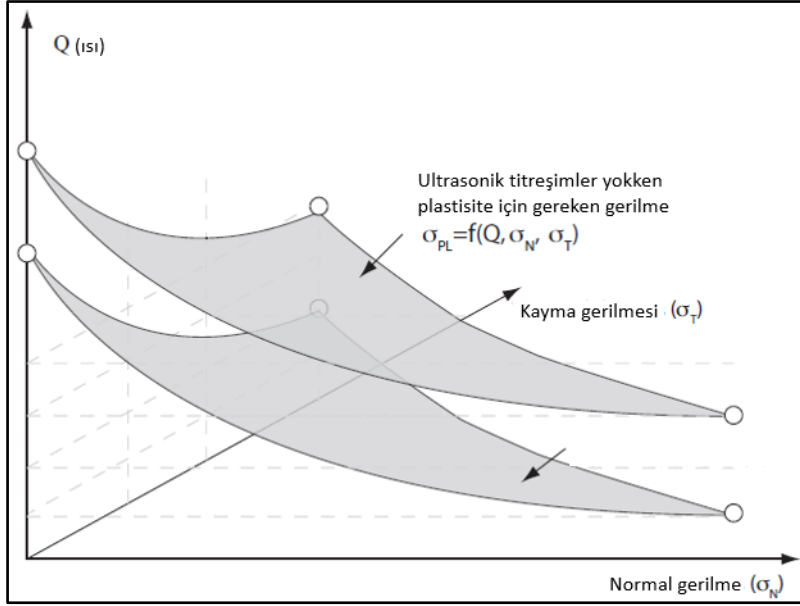
Resim 2.12. UMK'da atomların difüzyonu [5]

Yapılan bazı araştırmalara göre, ultrasonik titreşimler ile oluşan ovalama hareketi (Resim 2.13.) neticesinde yok edildiği düşünülen oksit tabakalarının aslında yok edilmediği, yalnızca kaynak bölgesinde dağıtıldığı düşünülmektedir [26].



Resim 2.13. Ovalama hareketi [25]

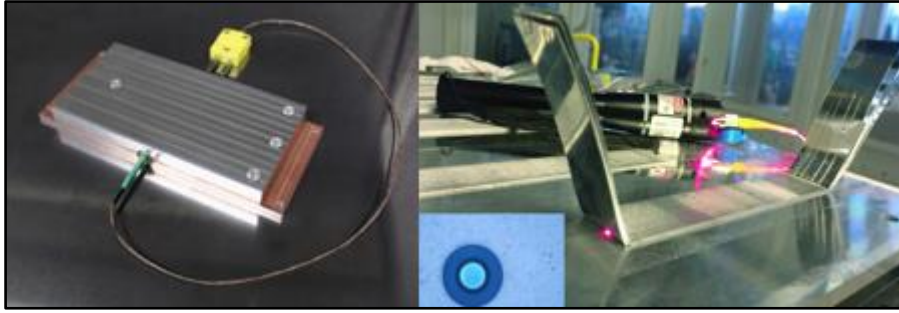
Bu birleşme mekanizması teorisine göre, birleşmenin gerçekleşmesi için plastisiteye ihtiyaç duyulmaktadır. Ultrasonik titreşimler dolayısıyla oluşan sürtünme ile ortaya çıkan ısı enerjisi neticesinde, plastisite için metale uygulanması gereken stres de azalmaktadır. UMK şartları altında plastisite için gereken stres, ısı ve ultrasonik enerji, birbirlerine bağlı ve bu niceliklerin oluşmasını tetikleyen parametrelerdir. Malzemenin maruz kaldığı stres, doğrudan titreşim genliği ile ilişkilidir. Isı; plastik deformasyon ve sürtünme sonucunda, sürtünme ise ultrasonik titreşim sonucunda ortaya çıkmaktadır. Buradan hareketle sürtünme ile ısı arasında bir değiş-tokuş dengesi olduğu anlaşılmaktadır. Resim 2.14.'te bu ilişkiyi görselleştiren bir grafik yer almaktadır [12].



Resim 2.14. Ultrasonik birleştirme değiş-tokuş dengesi [12]

Grafikte, sisteme ultrasonik enerji girişi olduğunda plastisite için gerekli nicel değerlerin de azaldığı görülmektedir. Stres arttığında plastisite için gerekli ısı girdisi azalmakta, ısı arttığında ise plastisite için gerekli stres azalmaktadır [12]. UMK’de, diğer kaynak yöntemlerinin aksine, birleştirilen metallerin işlem sırasında ulaştığı sıcaklıklar, metallerin erime sıcaklıklarının altında kalır. UMK’deki maksimum kaynak sıcaklıkları, genellikle ana metalin erime sıcaklığının %30-50’si kadar olmaktadır [27]. Bu oran örneğin 588°C’de eriyen AL-6061 için, %30’luk bir ısınmada yaklaşık 177°C’ye tekabül etmektedir. Yüksek kaynak sıcaklıklarıyla eriyen ana metallerde, normal şartlarda distorsiyon ve kırılganlık artışı görülmektedir ancak UMK’da kaynak sıcaklıkları düşük seviyelerde kaldığı için bu etkiler daha minör seviyelerde olmaktadır [9].

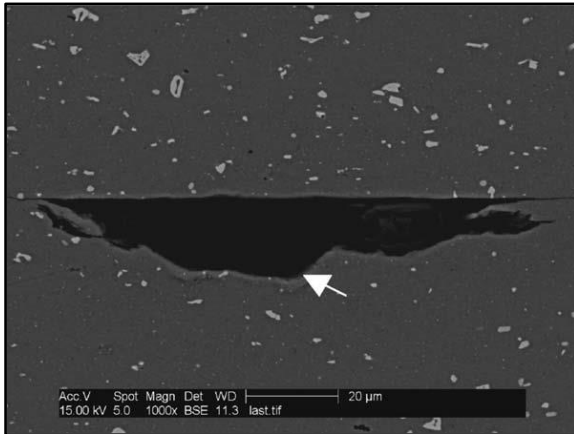
Ortaya çıkan düşük sıcaklıklar neticesinde, üretilen parçaların içerisine çeşitli sensörler, fiber kablolar vb. gömülerek Resim 2.15.’teki gibi akıllı nesnelerin üretilmesi edilmesi mümkün hale gelir [28].



Resim 2.15. Akıllı nesneler [28]

2.6. Ultrasonik Birleşmede Mikro Yapı

Ultrasonik birleşme sonrasında parçalarda oluşan en yaygın kusurlar mikro ölçekli gözeneklerdir. Bu gözenekler ultrasonik birleşmesi yapılan katmanlar arasında birleşme yüzeyleri boyunca oluşabilmektedir. Bu kusurlar, meydana gelme sebepleri dolayısıyla genellikle üç sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan ilki (Resim 2.16.); birleşme arayüzü boyunca, folyo yüzeyinin yüzey pürüzlülüğü dolayısıyla ya da birleşme bölgesine düşük enerji girişi dolayısıyla oluşan boşluklardır.

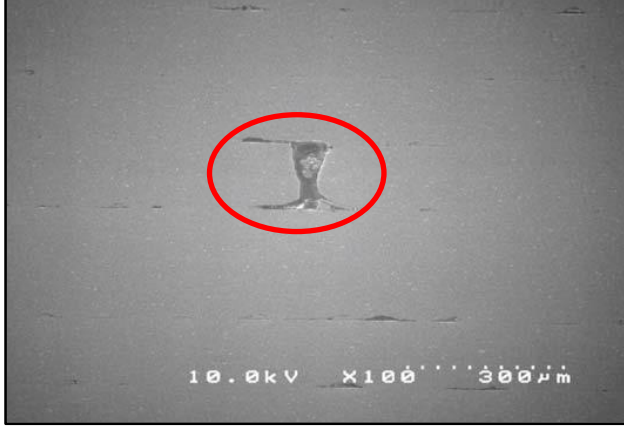


Resim 2.16. Tip-1 boşluk hatası [23]

Birinci tip kusurlarda, düz şekilli bir üst yüzey ve yuvarlak şekilli bir alt yüzey bulunmaktadır. Düz üst yüzey, yeni birleştirilmiş katman iken yuvarlak alt yüzey ise birleşmemiş bir önceki folyo katmanıdır [23].

İkinci tip kusurlar; birleşme esnasında birleşme hattı boyunca kaynak bölgesine yapılan yüksek enerji girişi dolayısıyla, anlık kaynak bölgesinden önce düzgün bir şekilde oluşturulmuş bağların zarar görmesiyle meydana gelen folyo hasarlarına istinaden

tanımlanan bozukluklardır [23]. Üçüncü tip kusurlar ise; birbirine komşu folyolar arasında oluşan boşluklar dolayısıyla meydana gelen bozukluklardır. UMEM’de iki folyo arasındaki boşluk (Resim 2.17.), program tarafından otomatik olarak ayarlandığı için, ayar hassasiyeti sonucu bu problemler oluşabilmektedir [23].



Resim 2.17. Tip-3 boşluk hatası [23]

Literatürde farklı folyo kalınlıklarında genlik, statik yükleme ve kaynak hızı parametreleri üzerinden optimizasyonlar gerçekleştirilerek ultrasonik birleşme için optimum bir parametre seti yakalamaya yönelik olarak yapılmış deneyler içeren pek çok çalışma bulunmaktadır. Tüm bu deney çalışmalarına rağmen, ultrasonik birleşmenin gerçekleşme mekanizması üzerine ortaya atılan fikirler, teori olmaktan öteye geçememiştir. Bu noktada, ultrasonik birleşmede en etkili parametreler olan statik yükleme, genlik, kaynak hızı, sonotrot yüzey pürüzlülüğü, ön ısıtma, folyo malzemesi ve folyo kalınlığı arasında, deneyler sırasında sonotrot üzerinde meydana gelecek aşınmalar ve folyo malzeme kompanzasyonu göz önünde bulundurularak ampirik formüller türetilmeye çalışılmalı ve denenmemiş farklı parametre setleri ile bu formüllerin doğruluğu ispatlanmalıdır. Ultrasonik birleşme mekanizmasının nasıl gerçekleştiğine dair mikro boyutta daha net gözlemler yapabilmek adına için çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Literatürde ultrasonik titreşimlerin birleşmeye en temel katkılarından bir tanesinin, birleşecek arayüzlerde bulunan oksit tabakalarına etki etmesi olduğu ifade edilmektedir ancak bu konuda oksit tabakalarının yok edildiği ya da ortamdan uzaklaştırıldığı yönünde fikir ayrılıkları bulunmaktadır. Metallerin yüzeyleri çok aktif olduğundan atmosfer ortamında yüzeylerinde hızlıca oksit tabakası oluşturma eğilimi gösterirler. Bu fikir ayrılığının giderilmesi ve birleşme mekanizması hakkında daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi adına, oksit tabakalarından mümkün olduğunca arındırılmış metallerin, vakum ortamında ultrasonik birleşme denemelerinin

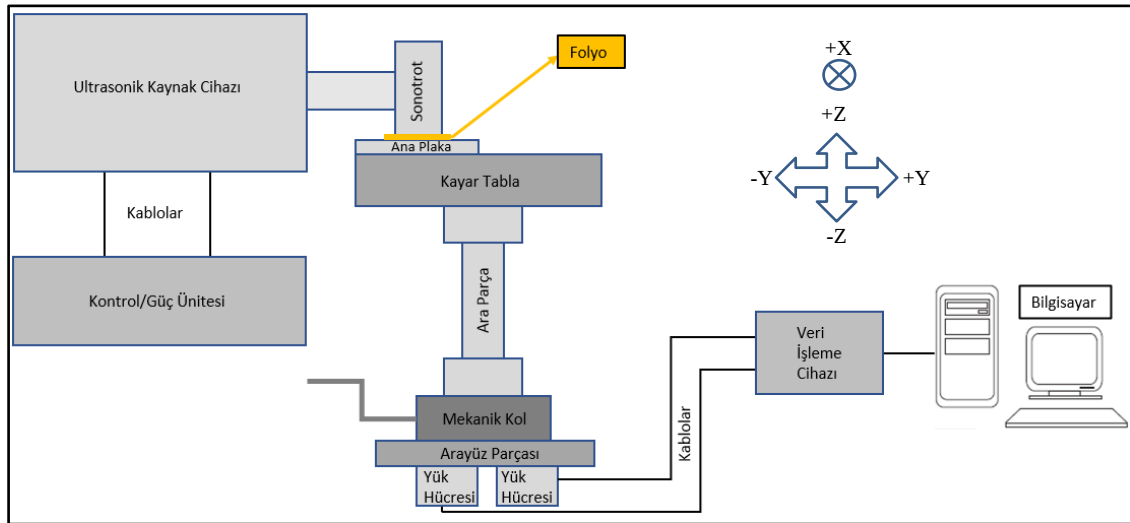
yapılmasının faydalı olabileceği değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, inert gazların kullanıldığı bir deney ortamında ultrasonik birleşme denemeleri yapılarak elde edilecek sonuçlar bu bağlamda değerlendirilebilir.

Ultrasonik birleşme, farklı metal türlerinin bağ kurabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu avantajdan yararlanılarak, birleşme sonrasında ana metallerden farklı mekanik-elektromanyetik özellikler gösterebilecek metal kombinasyonlarının denenmesi şeklinde bir çalışma ile literatürün eksik olduğu alanlara katkı sağlanabilir.

3. MALZEME, METOT VE TEST DÜZENEĞİ KURULUMU

3.1. Ultrasonik Birleşme Deney Düzeneği Hazırlanışı

Ultrasonik birleştirme deneylerinin yapılabilmesi için; literatür araştırmaları sonucunda elde edilen bilgiler ışığında, genel sistematiği; en önemli ultrasonik birleşme parametrelerinin dikkate alınması esasına dayanan ve detayları ilerleyen sayfalarda verilen, 8006 serisi, 15 mm x 420 mm ölçülerinde ve 200 µm kalınlığında alüminyum folyolarının; 5754 serisi, 270 mm x 65 mm ölçülerinde ve 1 mm kalınlığındaki alüminyum plakaya katmanlı bir biçimde ultrasonik kaynak ile birleştirilmesi için, Resim 3.1.'deki gibi bir deney düzeneği kurgulanmış, tasarlanmış ve üretilmiştir. Deney düzeneği, literatür araştırmalarına istinaden, deneyler sırasında ortaya çıkabilecek muhtemel problemlerin öngörülebildiği ölçüde bir ön tasarımdan geçmiştir. Üretim aşamaları ve düzeneğin montajı sonrasında yapılan denemeler ile sistem üzerinde pek çok iyileştirme ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır.



Resim 3.1. Ultrasonik birleştirme deney düzeneği

3.1.1. Tezgâh ön tasarımı

Ultrasonik dikiş kaynağında sonotrot ve folyoların birbirlerine göre relatif hareket yapmaları gerektiği için, sonotrot dönerken folyoların ya da ultrasonik kaynak tezgahının, lineer bir hat üzerinde lineer hareket yapması gerekmektedir. Deney düzeneği tasarlanırken bu durum göz önünde bulundurulmuştur. Ultrasonik kaynak cihazının lineer hareketi için sonotrot ile cihazın senkronize edilmiş şekilde, motorlar vasıtasıyla tahrik edilmesi gerektiği

görülmüştür. Bu senaryoda, motorların ve sonotrodun senkronizasyonu durumunda ortaya çıkacak muhtemel zorluklar, kaynak cihazının hareketi sırasında kullanacağı hacmin; deney düzeneğinin kurulacağı yere uygun olmaması ihtimali ve motorlar ile senkronizasyon için gereken diğer elemanların maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, kaynak cihazının sabit kalarak folyoların bulunacağı tablaya hareket verilmesi daha makul olarak değerlendirilmiştir. Folyoların bulunduğu tablanın lineer olarak hareket ettirilmesi sırasında, yine sonotrot ile senkronize olmuş bir hareket ihtiyacı olduğundan, hareketin kaynağı olacak motorların varlığında, kaynak cihazı nispeten yeni olmadığı için, sonotrot ve motorların haberleşmesi konusunda ortaya çıkabilecek muhtemel sorunlar göz önünde bulundurulmuştur. Tüm bu öngörülerin neticesinde, folyoların üzerinde bulunacağı tablanın, arada herhangi bir aktarım elemanı veya motor vb. elemanlar olmadan, doğrudan sonotrodun dönüşü ile hareket ettirilmeye çalışılmasının hem senkronizasyon problemlerinin yaşanmaması hem de maliyet sonuçları bakımından en uygun çözüm olacağı değerlendirilmiştir.

Tabla hareketi

- Yukarıdaki senaryoda, lineer relatif hareket için sonotrodun altındaki folyoların bağlı olacağı tablanın, +/- X yönlerinde hareket edebilecek biçimde kayar bir tabla şeklinde olması gerektiği değerlendirilmiştir.
- Hem folyo birleştirme denemelerinin katmanlı şekilde olması planlandığı için hem de ultrasonik birleştirmesi yapılacak folyo ve çeşitli parçaların farklı kalınlıklarda olması ihtimali dolayısıyla ve sonotrot ile kayar tabla arasında sıkışacak olan folyoların üzerindeki statik yüklemenin ayarlanabilir olması ihtiyacına istinaden, kayar tablanın +/- Z ekseninde de hareket etmesi gerektiği değerlendirilmiştir.
- Kayar tablanın +/- Y ekseninde harekete ihtiyacının çoğunlukla olmayacağı, olursa da kayar tabla üzerindeki yapıların +/- Y ekseninde hareket ettirilebilecek şekilde slotlu birleşmeler biçiminde yapılmasıyla böyle bir ihtiyacın kolaylıkla giderilebileceği değerlendirilmiştir.

3.2. Ultrasonik Birleştirme Deney Düzeneginin Üretilmesi ve Kurulması

3.2.1. Ultrasonik birleştirme cihazı

Ultrasonik birleştirme denemeleri kapsamında, Branson® Ultraseam 20 (Resim 3.2.) modelinin 4 kW gücüne ve 20 kHz'lık titreşim frekansına sahip, sonotrodun folyolar üzerinde uygulayacağı kuvvetin pnömomatik olarak ayarlanabildiği ultrasonik dikiş kaynağı makinesi kullanılmıştır.



Resim 3.2. Branson® ultraseam 20 [29]

Ultrasonik birleştirme deneyi düzeneginde kullanılacak cihaz (Resim 3.3.), uzun süredir atıl vaziyette beklemekteydi ve çalışır durumda değildi. Çalıştırılabilir hale gelebilmesi için pek çok eksiği bulunmaktaydı. Sistemin çalışır hale getirilmesi için aşamalar halinde bu eksikleri giderildi.

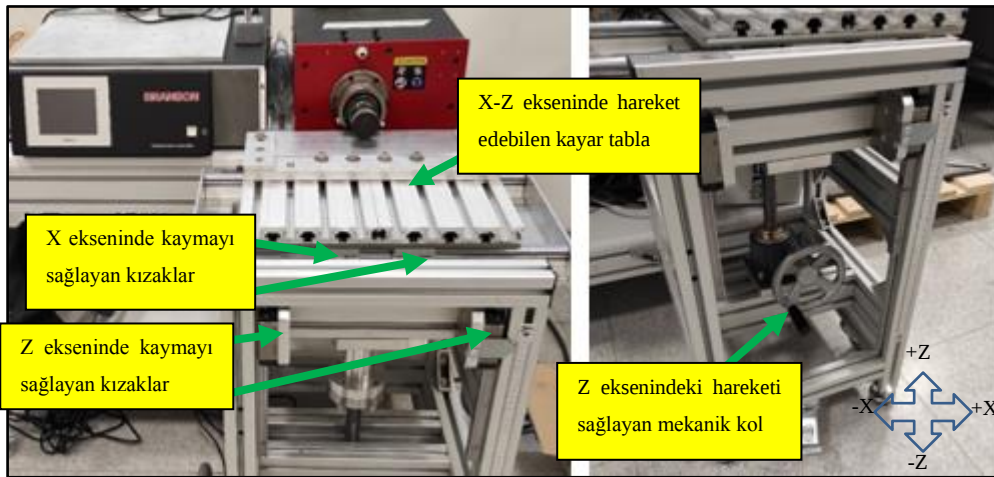


Resim 3.3. Ultrasonik birleştirme cihazı



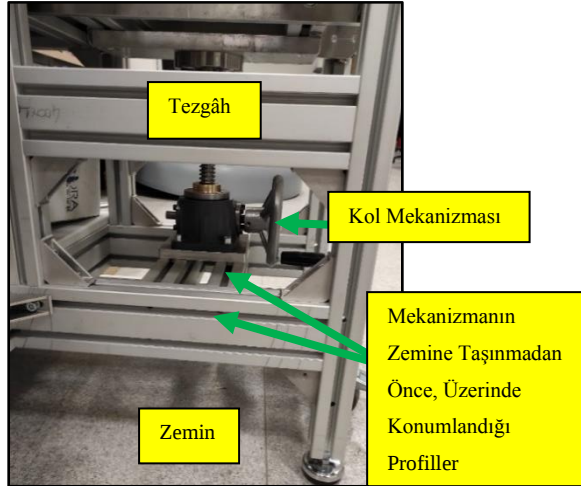
Resim 3.4. Kontrol ünitesi ve kaynak cihazı

İlk etapta cihazın üzerine yerleşeceği tezgâhın tasarımları yapıldı. Folyoların üzerinde bulunacağı kayar tablanın $\pm X$ ve $\pm Z$ ekseninde hareket ettiği, kontrol ünitesi ile kaynak cihazının üstünde yer alacağı 100 cm x 100 cm x 70 cm ölçülerinde bir tezgâh (Resim 3.5.) üretildi.



Resim 3.5. Tezgâhın üretim aşamaları

Tezgâhta yapılan ilk denemelerde, Z eksenindeki mekanik hareketi sağlayan kol mekanizmasının taban bağlantısının tezgahla değil, zeminle olması gerektiği değerlendirilmiştir. Kayar tabla, sonotrot ile bu mekanizma arasında sıkıştığından, birleştirme sırasında folyolar üzerindeki statik yüklemeyi arttırmak için kayar tabla mekanik kol tarafından $+Z$ ekseninde yukarıya itildikçe mekanik kolun, üzerinde konumlandığı profilleri eğmesi ve bu durumun ölçüm sonuçlarını etkilemesi endişesi dolayısıyla, mekanizma tezgâhı oluşturan profillerin üzerinden çıkarılarak doğrudan zemine (Resim 3.6.) taşınmıştır.

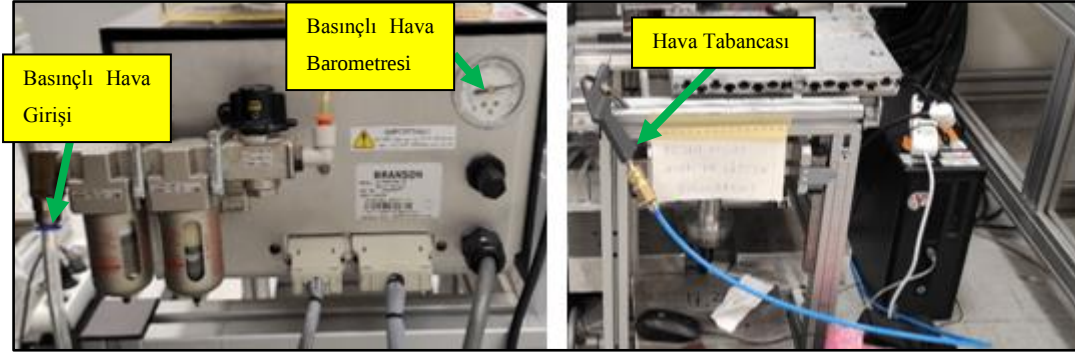


Resim 3.6. Kol mekanizmasının tezgâh üzerinde iken konumu

Tezgâhın entegrasyonu sırasında karşılaşılan sorunlardan bir diğeri, kayar tablanın +/- X ekseninde kaymasını sağlayan kızakların, kayma hareketi sırasında kayar tabla ile arasında oluşan sürtünme kuvvetinin fazla olması dolayısıyla, ultrasonik birleştirme esnasında sonotrodun döndüğü sırada, sonotrodun eş zamanlı olarak kayar tablayı X ekseninde hareket ettirirken folyolar üzerinde meydana getirebileceği ekstra deformasyonların oluşması endişesidir. Bu problemin çözülmesi adına, X ekseninde kaymayı sağlayan kızakların, rulmanlı kızaklara çevrilerek sürtünmelerinin azaltılması sağlanmıştır. Bu revizyon neticesinde, kayar tablaya yapılan ufak bir dokunuşla dahi tablanın X ekseninde rahatlıkla kayabildiği gözlemlenmiştir.

3.2.2. Pnömatik basınçlandırma

Deneylerde kullanılacak olan ultrasonik kaynak cihazının, sonotrot vasıtasıyla birleşme arayüzünde oluşturduğu statik yükleme, cihaz içerisindeki pnömatik elemanlara sağlanan basınçlı hava girişi ile ortaya çıkmaktadır. Bu ihtiyacın giderilmesi adına cihazın bulunduğu yere basınçlı hava tesisatı döşenmiştir. Bu tesisat üzerinden ultrasonik kaynak cihazına basınçlı hava girişi yapılmıştır. Yine bu tesisat üzerinden bir basınçlı hava tabancası (Resim 3.7.) sisteme entegre edilmiştir.



Resim 3.7. Barometre ve basınçlı hava girişi

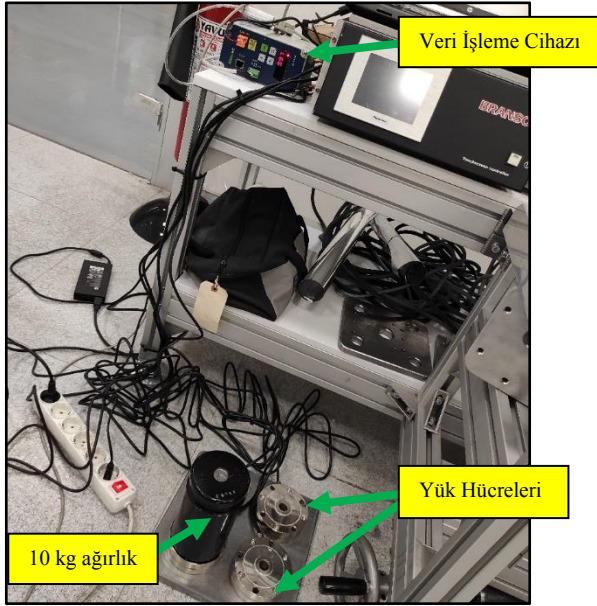
3.2.3. Kuvvet ölçümü

Ultrasonik birleşmedeki en önemli parametrelerden olan statik yüklemenin ölçümü için 4 adet Kobastar® markalı yük hücresi (Resim 3.8.) ve yük hücrelerinden gelen verilerin okunabilmesi için Webowt® markalı 1 adet veri işleme cihazı (Resim 3.8.) tedarik edilmiştir. 4 adet yük hücresinden gelen verilerin toplamından bir statik yükleme değeri elde edilmesi hedeflenmiştir.



Resim 3.8. Yük hücreleri ve veri işleme cihazı

Veri işleme cihazı, yük hücreleri ile bağlandıktan ve çalışır hale getirildikten sonra, yük hücrelerinin veri işleme cihazında bağlandığı her kanalın, kullanıcı kılavuzunda tarif edildiği şekliyle kalibrasyonu yapılmıştır. Bunun için 10 kilogramlık bir ağırlık (Resim 3.9.) kullanılmıştır.



Resim 3.9. Yük hücresi kalibrasyonu

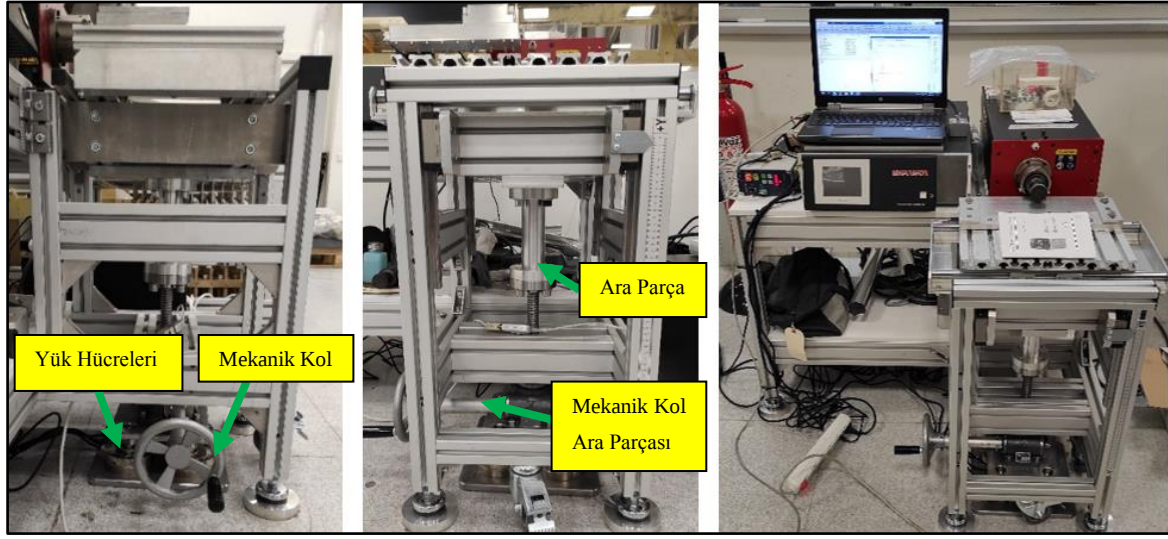
Yük hücrelerine bağlanacak olan mekanik kolun montajı için ve yük hücrelerine gelen yükün kabaca eşit şekilde ayarlanabilmesi için, boyuna dış çekilmiş konik vidalar (Resim 3.10.) üretilmiştir.



Resim 3.10. Yük hücrelerinin montajı

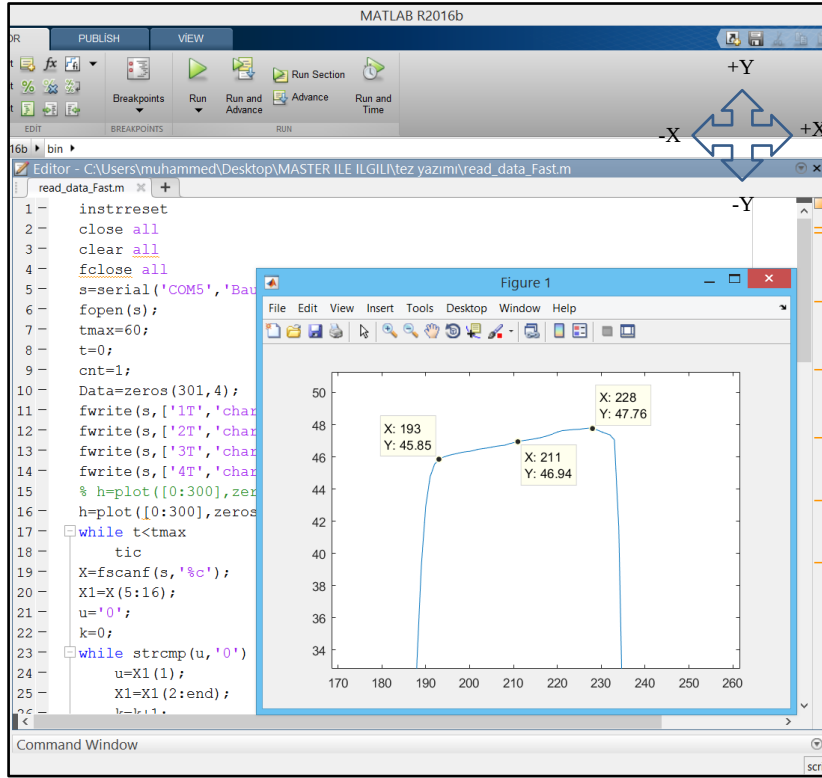
Konik vidaların yük hücreleri ile bağlanmasının akabinde mekanik kolun yük hücreleri ile bağlantısında kullanılacak arayüz parçasının ivme ölçer vasıtasıyla zemine paralelliği ayarlanmıştır.

Arayüz parçasının paralelliği ayarlandıktan sonra, mekanik kolun tezgâh ile bağlantısı sökülüş ve kol mekanizması yük hücrelerinin üzerinde konumlanmak üzere zemine taşınmıştır. Bu işlem sonrasında mekanik kol ile kayar tabla mekanizması arasındaki mesafe oldukça arttığı için bağlantıyı sağlamak amacıyla bir ara parça (Resim 3.11.) üretilmiştir. Mekanik kol da ilk pozisyonuna göre saat yönünde 90° döndürölüş (Resim 3.11.) ve kolun tezgâhın dışına taşınabilmesi için mekanik kol için de bir ara parça (Resim 3.11.) üretilmiştir.



Resim 3.11. Revizyonlar sonrası tezgâh

Statik yüklemenin ölçümü için gerekli altyapı kurulduktan sonra yük hücrelerinden gelen verilerin bilgisayarda okunabilmesi için Matlab’da bir kod hazırlanmıştır. (Kod ekte verilmiştir.) Bu kod ile birleştirme esnasında folyo üzerine gelen kuvvetlerin dinamik olarak okunabilmesi mümkün hale gelmiştir. Resim 3.12.’de de görülen arayüzde X eksenini zamanı, Y eksenini ise kg cinsinden folyo üzerindeki yüklemeyi göstermektedir.



Resim 3.12. Anlık yükleme okuma arayüzü

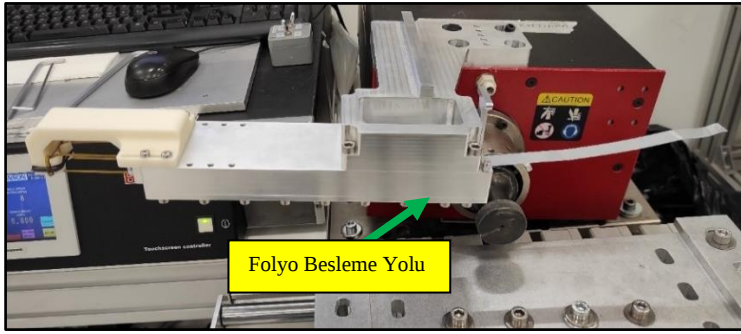
3.2.4. Folyo besleme sistemi

Ultrasonik birleştirme için üretilen sistem belli bir olgunluğa ulaştıktan sonra, sistemin ihtiyaçlarının tam anlamıyla anlaşılıp değerlendirilmesine istinaden kısmi ultrasonik birleştirme denemeleri yapılmıştır. Bu denemelerde, folyoların birleşme sırasında sonotrodun altına girmeden önce hassas bir şekilde hizalanmış olması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır. Folyo hassas bir şekilde hizalanmamış olursa, kaynak sırasında folyonun sonotrodun altından kayarak kaynak bölgesinin dışına çıktığı gözlemlenmiştir.

Folyonun hizalanması problemine istinaden ortaya çıkan bir diğer ihtiyaç da folyonun işlem sırasında gergin tutulmasıdır. Folyo gergin tutulmazsa, folyonun birleşme sırasında sonotrodun altından kayması ve toplanması durumu (Resim 3.13.) söz konusudur. Bu iki problemin çözümü adına bir folyo besleme sistemi (Resim 3.13.) tasarlanmıştır.



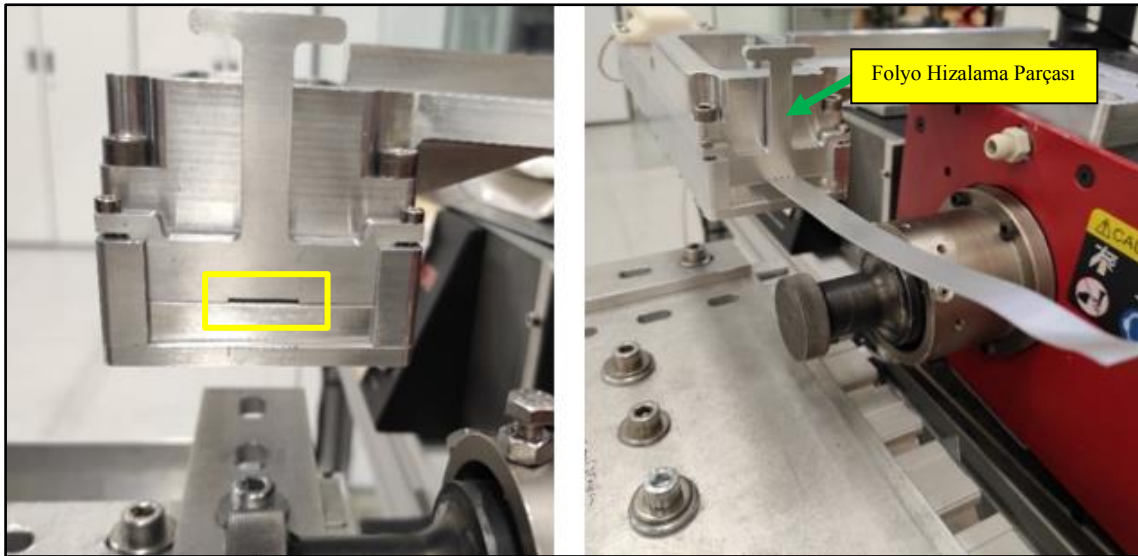
Resim 3.13. Hizalanmadığı için birleşme sırasında kayan folyo



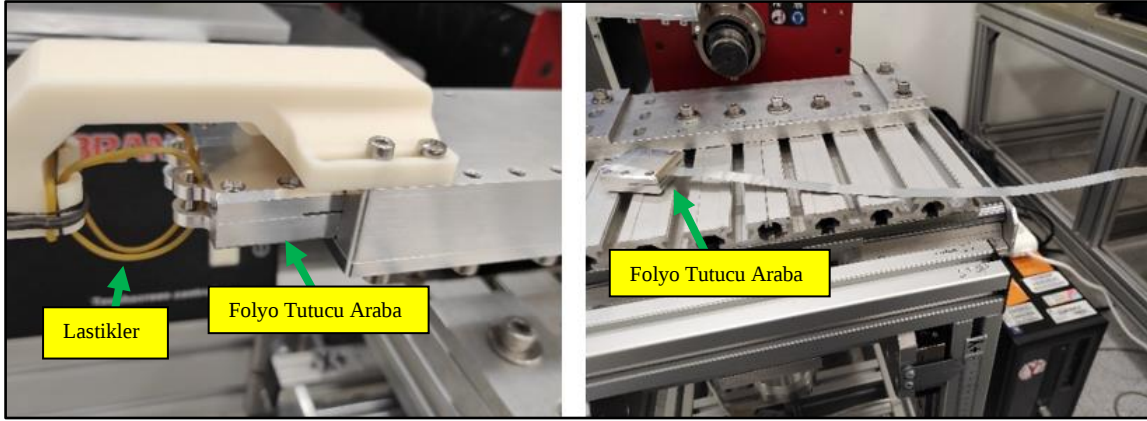
Resim 3.14. Folyo besleme sistemi

Bu sistemde temel olarak 4 eleman bulunmaktadır. Bunlar;

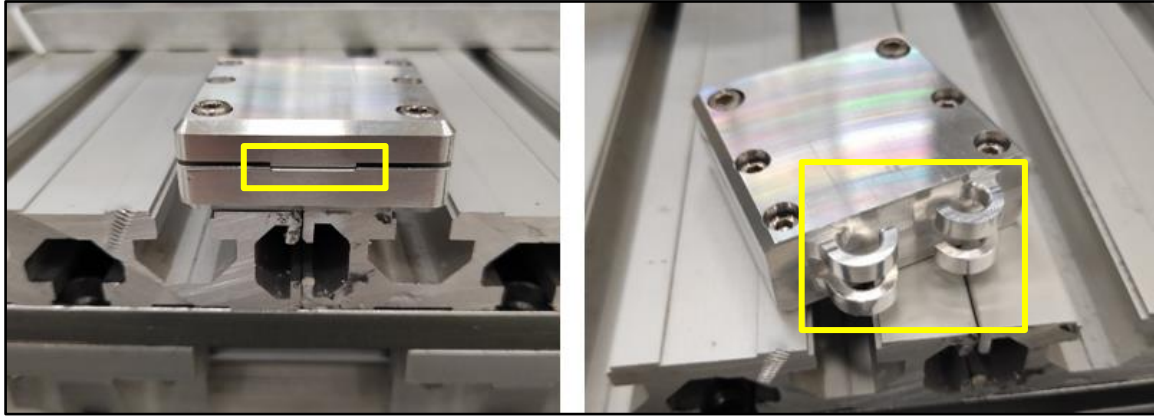
- Folyo besleme yolu (Resim 3.14)
- Folyo tutucu araba (Resim 3.16. ve 3.17.)
- Lastikler (Resim 3.16.)
- Folyo hizalama parçasıdır. (Resim 3.15.)



Resim 3.15. Folyo hizalama arayüzü



Resim 3.16. Folyo tutucu araba-1



Resim 3.17. Folyo tutucu araba-2

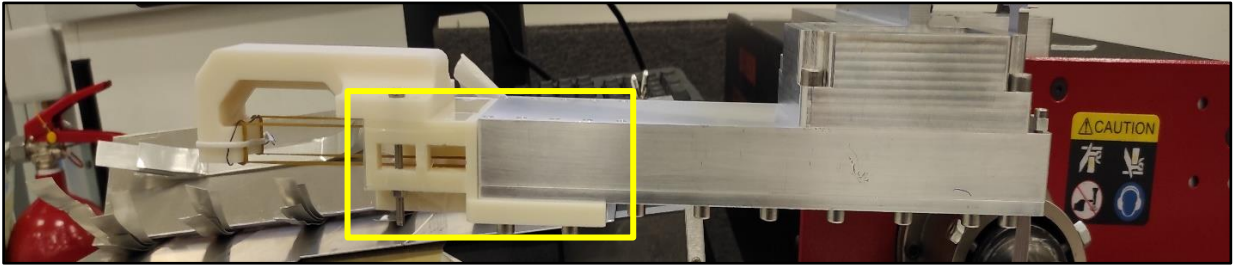
Folyo ilk etapta folyo tutucu arabaya Resim 3.17.'deki küçük çerçevenin içerisinde yer alan ağızla hassas bir şekilde bağlanır. Resim 3.16.'daki gibi folyo tutucu arabaya bağlanmış olan folyo, folyo besleme yolu içerisine sürülür. Folyo tutucu araba, bu yol içerisinde dar toleranslar neticesinde hassas bir şekilde hizalanmaktadır. Folyonun birleşme sırasında gergin kalabilmesi için, folyo tutucu araba Resim 3.17.'deki büyük çerçeve içerisinde kalan çentikler vasıtasıyla lastiklere bağlanır. Folyo tutucu arabaya bağlı folyo ve lastiklere bağlı folyo tutucu araba Resim 3.15.'teki gibi folyo besleme yolunun ucundan çıkartılır ve en son folyo hizalama parçası ile hizalanarak sonotrodun altına beslenir. Böylece birleşme sırasında sonotrot, folyoyu folyo besleme yolu boyunca çekerken folyo, Resim 3.18.'deki gibi hem hizalanır hem de gergin kalır.



Resim 3.18. Hizalı ve gergin duran folyo

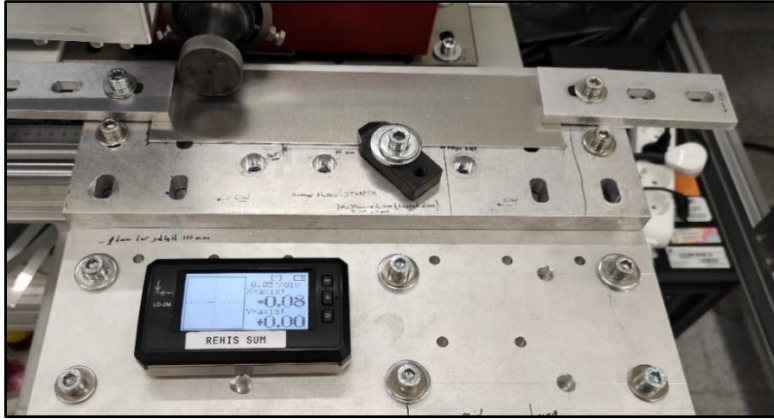
3.2.5. Ultrasonik birleştirme deneyleri öncesi son kontroller

Bu revizyonlar sonrasında yapılan denemeler sonucunda, folyo besleme yolunun strokunun soyma testleri arayüzlerinin sağlanabilmesi için yeterli olmayacağı anlaşılmış ve Resim 3.19.'daki FDM ile ABS malzemeden basılmış bir parça ile strok 50 mm arttırılarak yeterli strok elde edilmiştir.



Resim 3.19. Folyo besleme yolu strok uzatma

Ultrasonik birleştirme deneyleri öncesinde son kontroller yapılırken ön denemeler sırasında, folyo üzerinde sonotrodun oluşturduğu statik yüklemenin, yük hücreleri üzerinden anlık olarak okunmasıyla lineer birleşme hattı boyunca statik yüklemenin ± 10 kg mertebelerinde değişkenlik gösterdiği fark edilmiştir. Bu durumun sebebi olarak sonotrodun ve kayar tablanın birbirine paralel olmaması ihtimali değerlendirilmiştir. Problemin çözümü için kayar tablanın altına aralayıcılar koyularak bir ivme ölçer vasıtasıyla kayar tablanın paralellliği (Resim 3.20.) düzeltilmiştir.



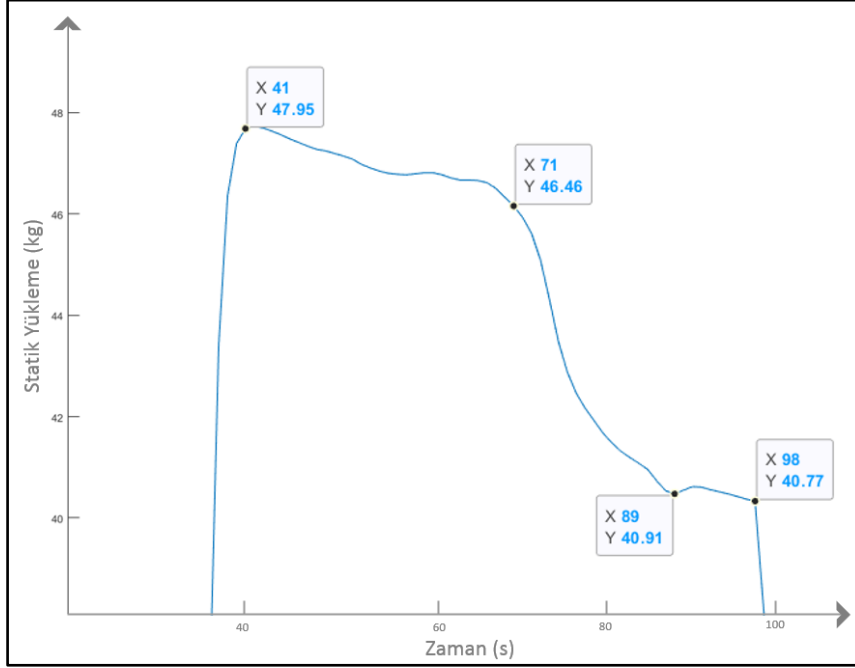
Resim 3.20. Kayar tabla kalibrasyonu

Kayar tablanın paralelliğinin ayarlanması sonrasında yapılan denemelerde, statik yüklemenin ultrasonik birleştirme hattı boyunca daha az saptığı ancak hala ± 5 kg mertebelerine kadar oynamaların gerçekleştiği görülmüştür. Yapılan araştırmalar neticesinde, literatürde sonotrotta kullanım sonrası meydana gelecek aşınmalar ile ilgili ipucu niteliğinde çeşitli bilgilere rastlanmıştır [23]. Bu durumun problemin kaynağı olması ihtimali değerlendirilerek komparatör ile Sonotrot üzerinden alınan ölçümlerde, sonotrot yüzeyinde 0.3 mm'lere varan sapmalar gözlemlenmiştir. Benzer bir cihazın kullanım kılavuzunda, komparatörle yapılan ölçümler sonucunda sonotrot yüzeyindeki sapmaların maksimum 0.1 mm olması gerektiği bilgisi yer almaktadır [31]. Bu bilgiye istinaden sonotrodun etrafında yer alan 3 adet ayar vidasına 3 adet daha ayar vidası eklenerek 6 ayar vidası ile komparatördeki ölçümlerde sapmalar maksimum 0.1 mm olacak şekilde sonotrodun ayarlanması yapılarak (Resim 3.21.) problem giderilmiştir.

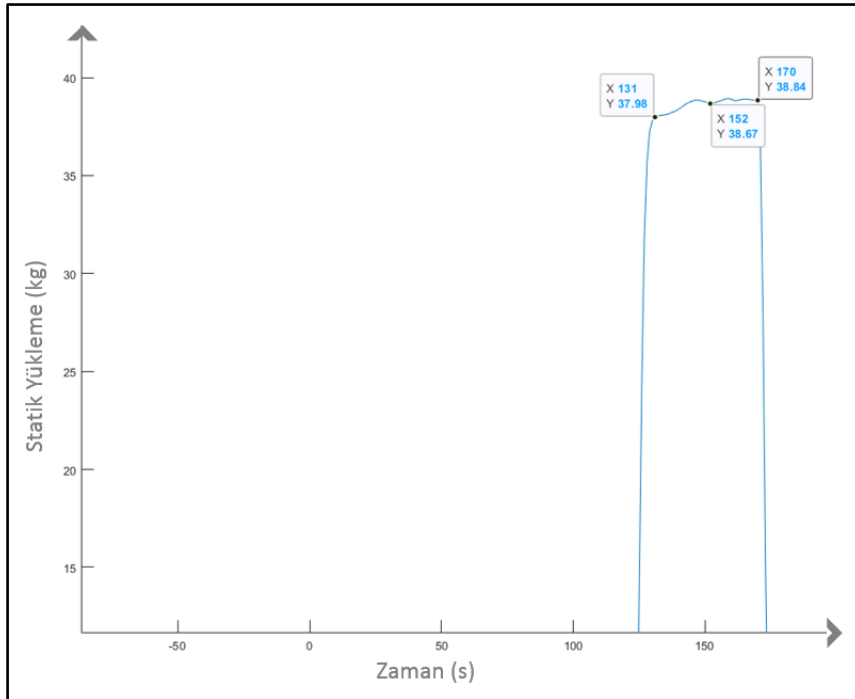


Resim 3.21. Ayar vidaları ve komparatör ile sonotrodun ayarlanması

Aşağıda, komparatör ile ölçüm yapılmadan önce yük hücrelerinden gelen verilerin grafiği ile komparatör ölçümü sonrası yapılan düzeltmeye istinaden farklı yüklemelerle yapılan denemelerden gelen verilerin grafiği bulunmaktadır. X değeri (yatay eksen) saniye cinsinden zamanı, Y değeri (dikey eksen) ise kg cinsinden statik yüklemeyi temsil etmektedir.

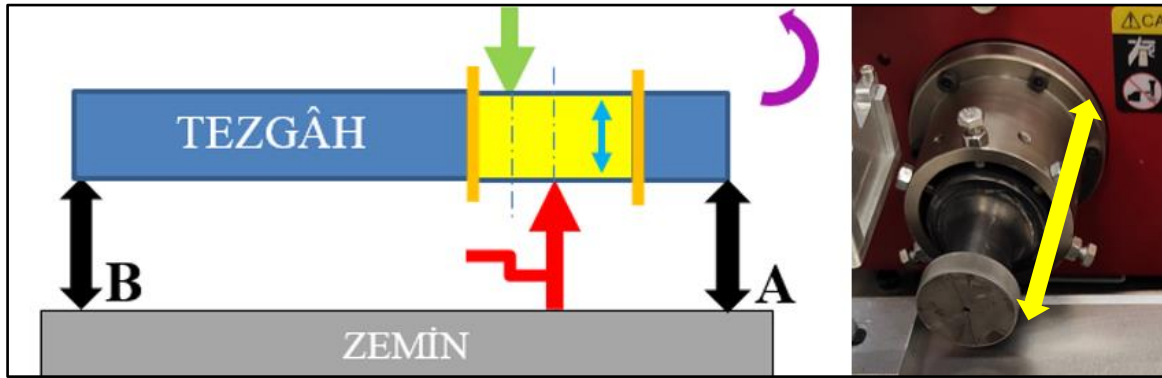


Şekil 3.1. Düzeltme öncesi ölçüm



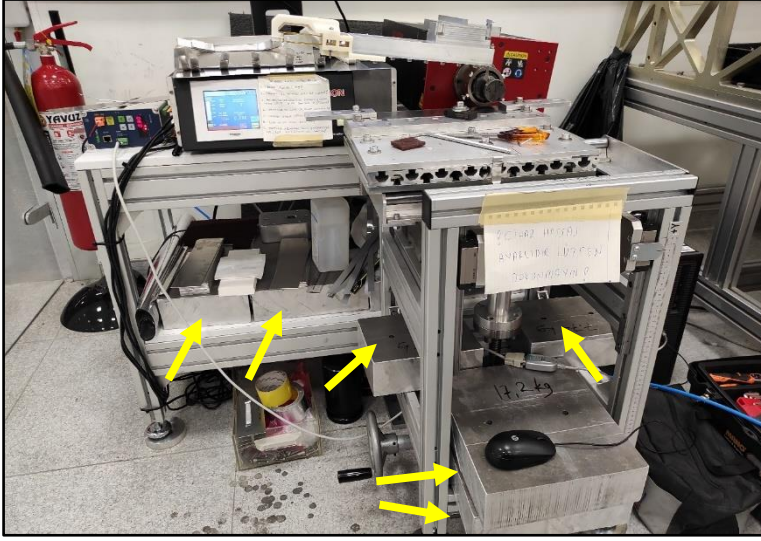
Şekil 3.2. Düzeltme sonrası ölçüm

Ön denemeler sırasında yapılan kontrollerde farklı bir problem ile karşılaşmıştır. Sonotrodun folyo üzerine uyguladığı statik yüklem 30kg mertebelerini aşmaya başladığı anda detayları Resim 3.22.'de verilen tezgâh, B noktası üzerinde mor ok ile gösterildiği şekilde saat yönünün tersine havaya kalkmaktaydı. Bunun sebebi araştırıldığında şu farkedildi: Normal şartlarda sarı renkle gösterilen kayar tabla, mavi ok ile gösterildiği şekilde turuncu ile gösterilen kızaklar üzerinden +/-Z ekseninde kayabilir durumdadır ancak kayar tabla, ultrasonik birleşme anında yeşil ok ile gösterilen sonotrot ve kırmızı ok ile gösterilen mekanik kol arasında sıkıştığında artık sabit hale gelmektedir. Tezgâhın zeminle ankastre bir bağlantısı olmadığı için tezgâhın havaya kalkmadan durmasına imkan veren tek etken tezgâhın ağırlığıdır. Kayar tabla sıkıştığında tek bir parça şeklinde rijit bir sistem haline gelen tezgâh, mekanik kol ile uygulanan kuvvet tezgâhın ağırlığı dolayısıyla oluşan kuvvetten fazla geldiği anda B noktasından dönerek havaya kalkmaktadır. Eğer sonotrot ve mekanik kol birbirine eş merkezli olabilseydi bu durum oluşmayacaktı ancak ultrasonik birleştirme cihazının kendi tasarımı dolayısıyla bu mümkün olmamaktadır. Resim 3.22.'de sarı ok ile gösterildiği itibariyle sonotrot ile ultrasonik kaynak cihazı arasındaki mesafe çok az olduğu için kayar tablanın bu kadar küçük bir alana sığdırılması mümkün değildir.



Resim 3.22. Tezgâhın havaya kalkması problemi ve sonotrot

Problemin tespiti sonrasında, ultrasonik birleşme denemelerinin en fazla 50kg mertebelerindeki statik yüklemeler ile yapılacağı göz önünde bulundurularak, tezgâhın uygun yerlerine, Resim 3.23.'te sarı oklar ile gösterilen, toplamda 150kg'lık yapay ağırlıklar eklenerek bu sorun da giderilmiştir.



Resim 3.23. Yapay ağırlıklar

4. ULTRASONİK BİRLEŞTİRME DENEYLERİ

Yapılan literatür araştırmalarına istinaden bir ultrasonik birleştirme deney altyapısı için nelerin gerekebileceği hususunda öngörülerde bulunulmuş ve bu öngörülere istinaden sistematik bir şekilde bir ultrasonik birleştirme deney düzeneği tasarlanıp üretilmiştir. Düzeneğin entegrasyonu sırasında gerçekleştirilen ön denemeler ile deneyler için optimum seviyede ayarlamalar yapılmaya çalışılmıştır. Ultrasonik birleştirme düzeneğinin deneyler için belli bir olgunluğa eriştiği aşamada, çalışmanın ortalarında bahsedilen ultrasonik birleştirme parametrelerinden hangilerinin kullanılacağı ve bu parametrelerin çalışma aralıklarının ne olacağı hususunda ön deneme ve araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında temel olarak ultrasonik birleşme parametrelerinin birleşme kalitesine olan etkileri inceleneceği için, literatür araştırmalarından elde edilen bilgiler doğrultusunda, en temel ultrasonik birleştirme parametrelerinin genlik, statik yükleme ve kaynak hızı olduğu değerlendirilmiştir. Bu parametrelerin çalışma aralıklarının belirlenmesi öncesinde ise, kullanılacak folyonun kalınlığı belirlenerek yukarıda bahsedilen parametrelerin çalışma aralıkları ve birbirleriyle olan ilişkileri noktasında ultrasonik birleştirme deneyleri yapılmıştır.

Literatürde de ultrasonik kaynak parametreleri arasındaki ilişki belirlenirken genellikle folyo kalınlığının sabit tutulup statik yükleme, genlik ve hız değerleri arasındaki ilişkiyi belirlemeye yönelik çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar yapılırken deneylerde genellikle 100-150 μm kalınlığındaki folyoların kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında da yapılan deneyler öncesinde ilk etapta ideal folyo kalınlığının belirlenmesi için 50-75-100 ve 200 μm kalınlığındaki folyoların kullanımı değerlendirilmiştir. Resim 4.1.'de, 75 μm kalınlığındaki alüminyum folyo ile yapılan ultrasonik birleştirme denemesi görülmektedir. 75 μm kalınlığındaki folyo ile yapılan denemelerde, 10-30 μm aralığındaki genlik değerlerinde birleşme kalitesinin çok zayıf olduğu, bu aralığın üstündeki genlik değerlerinde ise folyoların fiziksel olarak ciddi zarar gördüğü tespit edilmiştir. Bu denemeler sonucunda, 50 μm kalınlığındaki folyoların kullanımı noktasında denemeler yapılmasına gerek olmadığı tespit edilmiştir.



Resim 4.1. 75 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan birleştirme denemeleri

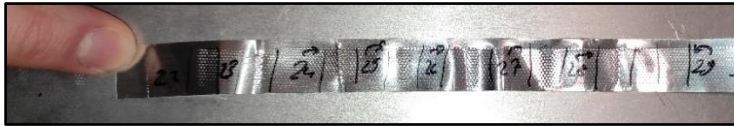
Resim 4.2., Resim 4.3., Resim 4.4. ve Resim 4.5.'te görülen denemelerde, 10-60 µm genlik değerleri aralığında, 8-45 kg arasında değişen yüklemelerle 100 µm kalınlığındaki folyolarla durağan şekilde ultrasonik birleştirme denemeleri yapılmıştır. Bu denemelere ait parametre kombinasyonları ve görsel değerlendirme sonuçları Ek bölümünde verilmiştir. Görsellerdeki sayılar; bu denemelere ait numaraları, iki çizgi arasında kalan alanlar ise ultrasonik birleştirme bölgelerini göstermektedir.



Resim 4.2. 100 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan denemeler -1



Resim 4.3. 100 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan denemeler -2



Resim 4.4. 100 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan denemeler -3



Resim 4.5. 100 µm kalınlığındaki folyo ile yapılan denemeler -4

Yukarıda verilen aralıklardaki düşük kuvvet ve genlik değerlerinde folyolarda ultrasonik birleşme olmadığı, yüksek değerlerde ise folyolar üzerinde, herhangi bir soyuma testi vb. değerlendirmenin yapılmasına gerek kalmadan; kaliteli bir birleşmenin olmadığı, folyolar

üzerinde gözle görülür ciddi deformasyonlar meydana geldiği ve folyonun sonotroda yapışmaya başladığı (Resim 4.6.) gözlemlenmiştir.



Resim 4.6. Sonotroda yapışan folyo

Denemelerin akabinde yapılan araştırmalarda, bu marka ve modele ait ultrasonik kaynak cihazlarında, kullanılması tavsiye edilen minimum folyo kalınlığının 200 μm olduğu görülmüştür [30]. Bu bilgiye istinaden ideal folyo kalınlığı denemeleri için lazer ile (Resim 4.7.) 8006 alüminyum malzemeden 15 mm x 420 mm ölçülerinde, 200 μm kalınlığında (yapılan ölçümlerde, birleşmemiş folyo kalınlıklarının 204-210 μm arasında geldiği tespit edilmiştir) ve yüzey pürüzlülüğü 0.05-0.12 Ra olan folyolar kesilmiştir. Folyoların altında kullanılmak üzere ise ana plaka olarak 5754 alüminyum malzemeden 270 mm x 65 mm ölçülerinde, 1mm kalınlığında ve yüzey pürüzlülüğü 0.25 Ra olan plakalar (Resim 4.8.) kesilmiştir.



Resim 4.7. 15 mm x 420 mm ebatlarında ve 200 μm kalınlığında folyolar



Resim 4.8. 300 mm x 60 mm ebatlarında alüminyum ana plaka

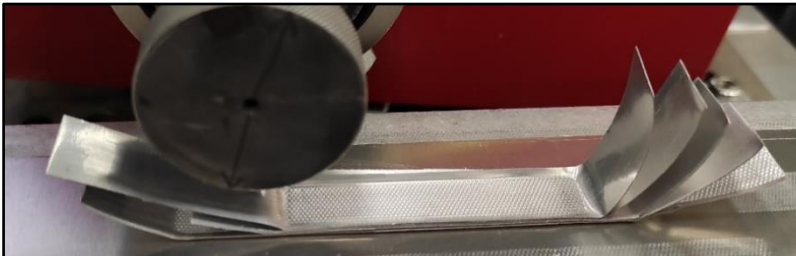
Bu folyolar ve ana plakalarla, 200 μ m kalınlığındaki folyonun kullanım durumunun netleştirilmesi için bazı birleştirme denemeleri gerçekleştirilmiştir. (Resim 4.9., Resim 4.10. ve Resim 4.11.)



Resim 4.9. 200 μ m kalınlığındaki folyo ile yapılan bazı denemeler-1



Resim 4.10. 200 μ m kalınlığındaki folyo ile yapılan bazı denemeler-2



Resim 4.11. 200 μ m kalınlığındaki folyo ile yapılan bazı denemeler-3

50-75 ve 100 μ m kalınlığındaki folyolar ile yapılan deneme sonuçları, cihazın kullanımı için tavsiye edilen folyo kalınlığı bilgisi, 200 μ m kalınlığındaki folyolar ile yapılan ve diğer

kalınlıktaki folyolarla yapılan denemelere kıyasla başarılı kabul edilen bazı birleştirmelerde elde edilen sonuçlar dolayısıyla statik yükleme, genlik ve hız parametreleri arasındaki ilişkinin belirlenmesine yönelik yapılacak nihai deneylerde, sabit olarak 200 μm kalınlığındaki folyoların kullanılmasına karar verilmiştir.

4.1. Deney Tasarımı

İdeal folyo kalınlıklarının belirlenmesi sırasında 100 μm ve 200 μm kalınlığındaki folyolar için yapılan parametresel çalışmalar göz önünde bulundurularak statik yükleme, genlik ve kaynak hızı parametrelerinin deney aralıkları için aşağıdaki değerlerin kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ultrasonik birleştirme parametre aralıkları

GENLİK (μm)	STATİK YÜKLEME (kg)	KAYNAK HIZI (rpm)
45-55	30-50	4-10

Bu değer aralıklarıyla yapılacak bir deney çalışmasında çok fazla deney kombinasyonu oluşacağından bu deneylerin sayısını azaltmak amacıyla, istatistiksel bir veri analiz programı olan Minitab® uygulaması ile bir deney tasarımı yapılmıştır. Bu deney tasarımı, bir probleme veya olaya girdi yapabilen değişkenlerin, bu girdiler sonucunda oluşturdukları çıktı üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak incelenmesini mümkün kılan ve bir deney sonucu/cevabı değerlendirme yöntemi olan Response Surface Method (RSM) kullanılmıştır. Sonuçların elde edilmesi için ise, bir istatistiksel hesaplama yöntemi olan Box-Behnken kullanılmıştır.

RSM ve Box-Behnken için bu çalışma üzerinden örnek verilecek olursa;

- Bu deney çalışmasında “ultrasonik kaynak parametreleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi” şeklinde bir problem tanımlanmıştır. Bu problemin sonuçlanmasında etkisi olan girdiler; statik yükleme, genlik ve kaynak hızıdır. Problemin çıktısı, deneyler sonucunda elde edilecek soyma testi sonuçları olmak üzere, bu üç parametrenin ultrasonik birleşme kalitesine ne derece etki ettiğinin incelenmesi söz konusudur. RSM üzerine tasarımı yapılan deneyde, bu üç parametre için tanımlanan aralıklarda, Box-

Behnken yönteminin gerektirdiği usul dolayısıyla, her bir değişken için üç değer atanmalıdır.

Deney tasarımı yukarıda tanımlandığı şekliyle, Minitab®'in önerdiği biçimde aşağıdaki parametre setleri ile yapılarak 1 mm kalınlığındaki ana plaka üzerinde 4 adet 200 µm kalınlığındaki folyonun katmanlı bir şekilde birleştirilmesi planlanmıştır.

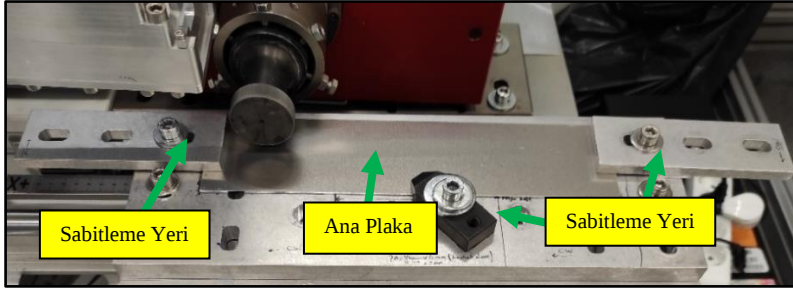
Çizelge 4.2. Ultrasonik birleştirme deneyi parametreleri

GENLİK (µm)	STATİK YÜKLEME (kg)	KAYNAK HIZI (rpm)
45	30	7
55	30	7
45	50	7
55	50	7
45	40	4
55	40	4
45	40	10
55	40	10
50	30	4
50	50	4
50	30	10
50	50	10
50	40	7
50	40	7
50	40	7

4.2. Ultrasonik Birleştirme Deney Aşamaları

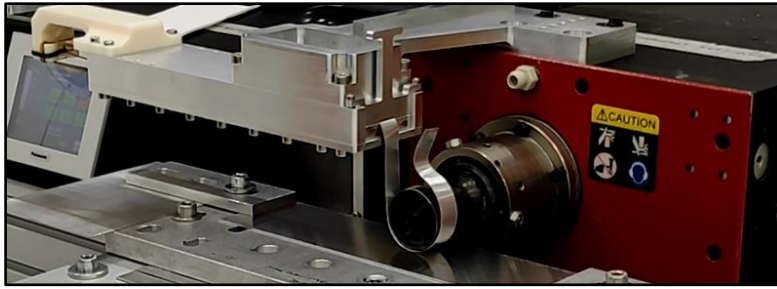
Ultrasonik birleştirme deneyleri yapılırken sırasıyla aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir:

1. Folyoların ultrasonik olarak üzerine kaynatılacağı 1 mm kalınlığındaki ana plaka, kayar tabla üzerine üç yerden (Resim 4.12.) sabitlenir. Sabitlendikten sonra izopropil alkol ile yüzey temizliği yapılır ve basınçlı hava ile yüzeydeki alkol de temizlenir.



Resim 4.12. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-I

2. 200 μm kalınlığındaki alüminyum folyo, izopropil alkol ile temizlenir. Folyo üzerindeki alkol de basınçlı hava ile temizlenir. Daha sonra folyo; folyo tutucu arabaya sabitlenir ve folyo tutucu araba lastiklere bağlandıktan sonra folyo, folyo besleme sistemi içerisine sürülür. İçeri sürülen folyo, folyo hizalama parçası ile hizalanmasının akabinde sonotrodun altına yerleştirilir (Resim 4.13.).



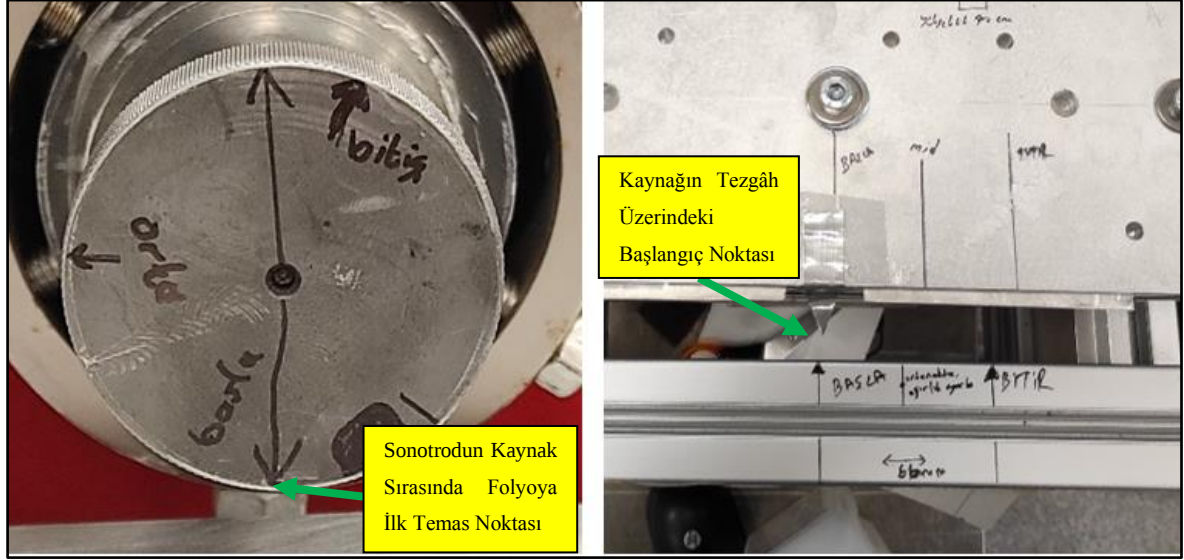
Resim 4.13. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-II

3. Ultrasonik kaynak cihazının kontrol ünitesinden kaynak genliği ve kaynak hızı ayarlanır (Resim 4.14.).



Resim 4.14. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-III

4. Tüm ultrasonik birleştirmelerin aynı şartlarda yapılabilmesi için, sonotrot ve kayar tabla, başlangıç pozisyonuna getirilir (Resim 4.15.).



Resim 4.15. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-IV

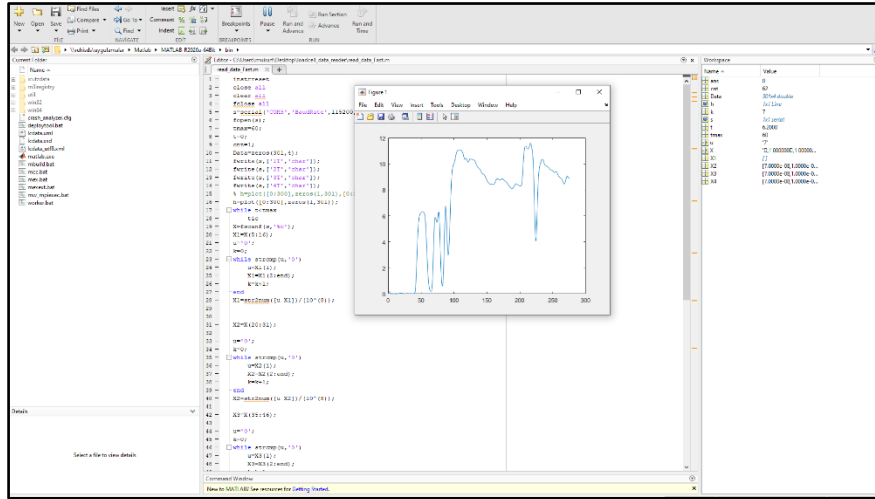
5. Yük hücrelerinden gelen verilerin okunabilmesi amacıyla hazırlanmış uygulamadaki ağırlık bilgisine istinaden mekanik kol ayarlanarak tabla aşağı veya yukarı hareket ettirilip folyo üzerindeki statik yükleme istenilen seviyeye getirilir (Resim 4.16.).

Hücre	Oryantasyonlar (derece)	Ağırlıklar (mm)	Aktivasyon	Değerler (kg)
Hücre 1	0	0	☒	Stabil Değil
Hücre 2	0	0	☒	Stabil Değil
Hücre 3	0	0	☒	Stabil Değil
Hücre 4	0	0	☒	Stabil Değil

Gerçek Zamanlı Ölçüm Verisi	Ham Veri	Düzeltilmiş Veri
Ağırlık Merkezi Kaçıklığı (mm)	0	0
Ağırlık Merkezi Açısı (derece)	0	0
Dönen Ağırlık (kg)	9.79	

Resim 4.16. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-V

6. Ultrasonik birleşme sırasında folyolar üzerindeki statik yükleme değişimini anlık olarak gösteren Matlab kodu çalıştırılır ve ultrasonik birleştirme işlemi başlar (Resim 4.17.).



Resim 4.17. Ultrasonik birleştirme deney aşamaları-VI

7. Ultrasonik birleştirme sırasında kayar tabla, Resim 4.15.'teki bitir çizgisine geldiği anda ultrasonik birleştirme; açma kapama anahtarı ile durdurulur.
8. Ana plakaya ultrasonik kaynağı yapılan; 1. folyo katmanıdır ve yaklaşık 66 mm uzunluğundadır. Bu folyo, sonotrodun hemen üzerinden makas ile kesilir ve folyo besleme sistemi içerisinde kalan folyo, 2. folyo katmanı için tekrar sonotrodun altına yerleştirilerek bu katmanın da ultrasonik birleştirilmesi gerçekleştirilir. 420 mm uzunluğunda olan her bir folyo, iki katman için kullanılır. 3. ve 4. folyo katmanları için yeni bir folyo hazırlanarak işlemler tekrarlanır.

4.3. Ultrasonik Birleştirme Deney Sonuçları

Bölüm 4.2.'de tanımlanan adımlar, 15 adetlik deney setinin her biri için tekrarlanmış ve ilgili parametrelerin ultrasonik birleştirme üzerindeki etkilerinin incelenmesi için yapılması gereken birleştirme işlemleri tamamlanmıştır. Minitab®'de yapılan deney tasarımına göre gerçekleştirilen birleştirme işlemlerinden 11'i başarılı, 4'ü başarısız olmuştur.



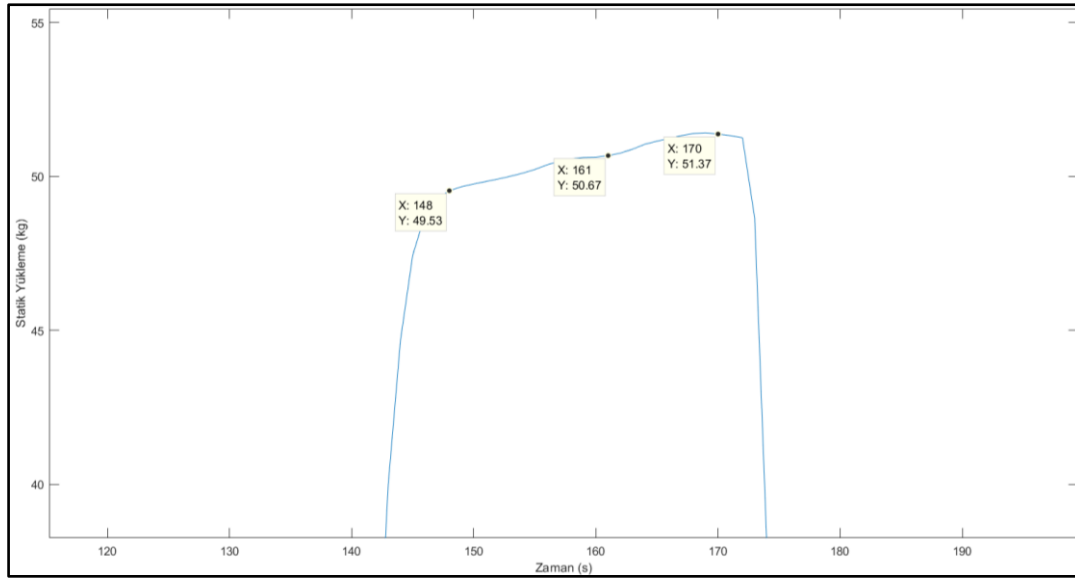
Resim 4.18. Ultrasonik birleşme deneyi numuneleri

Çizelge 4.3. Ultrasonik birleştirme deneyi sonuçları

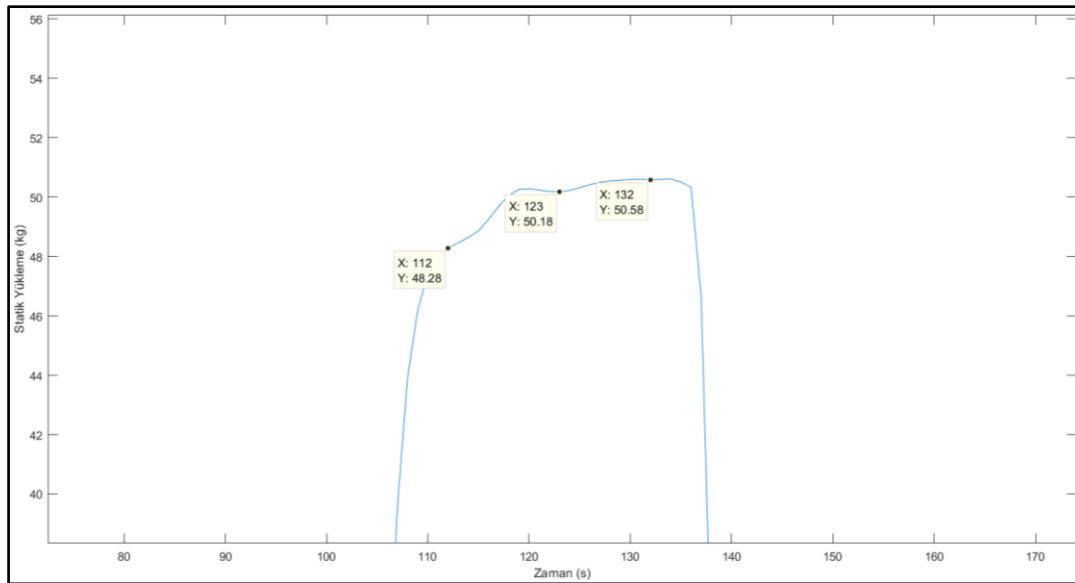
Deney No	Genlik (μm)	Statik Yükleme (kg)	KAYNAK HIZI (rpm)	SONUÇ
1	45	30	7	Başarısız
2	55	30	7	Başarısız
3	45	50	7	Başarılı
4	55	50	7	Başarılı
5	45	40	4	Başarılı
6	55	40	4	Başarılı
7	45	40	10	Başarısız
8	55	40	10	Başarılı
9	50	30	4	Başarılı
10	50	50	4	Başarılı
11	50	30	10	Başarısız
12	50	50	10	Başarılı
13	50	40	7	Başarılı
14	50	40	7	Başarılı
15	50	40	7	Başarılı

Ultrasonik birleştirme deneyleri sırasında, yük hücrelerinden gelen veriler grafik haline getirilerek kaydedilmiştir. Aşağıda, tüm deneyler için örnek teşkil etmesi adına 30, 40 ve 50 kg'lık statik yükleme değerleri ile birleşmeleri yapılan; 9, 12 ve 15 numaralı deneylerin birinci ve ikinci katmanlarına ait ultrasonik birleşmelerin yük hücresi verilerinin grafikleri bulunmaktadır.

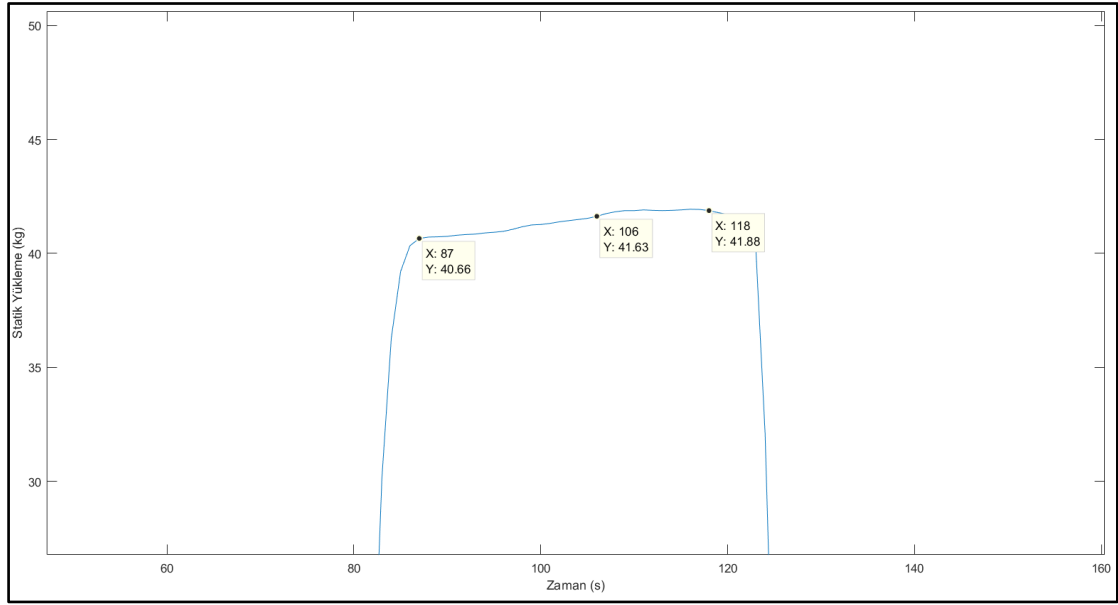
Bu grafiklerde X değeri (yatay eksen) saniye cinsinden zamanı, Y değeri (dikey eksen) ise kg cinsinden statik yüklemeyi temsil etmektedir.



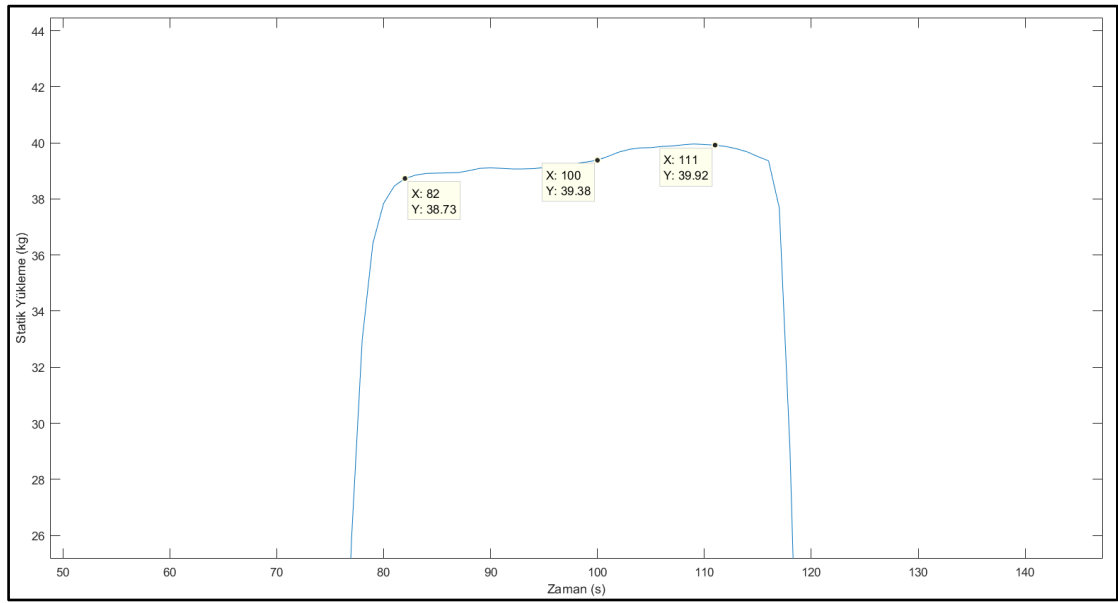
Şekil 4.1. Deney-12; 50 μ m, 50kg, 10rpm, katman-1



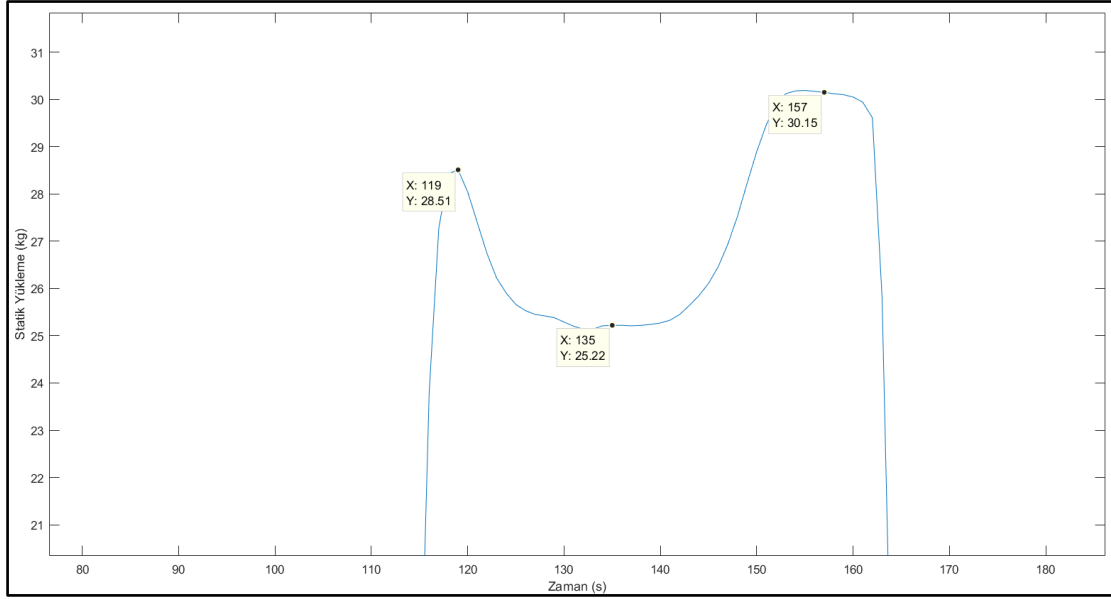
Şekil 4.2. Deney-12; 50 μ m, 50kg, 10rpm, katman-2



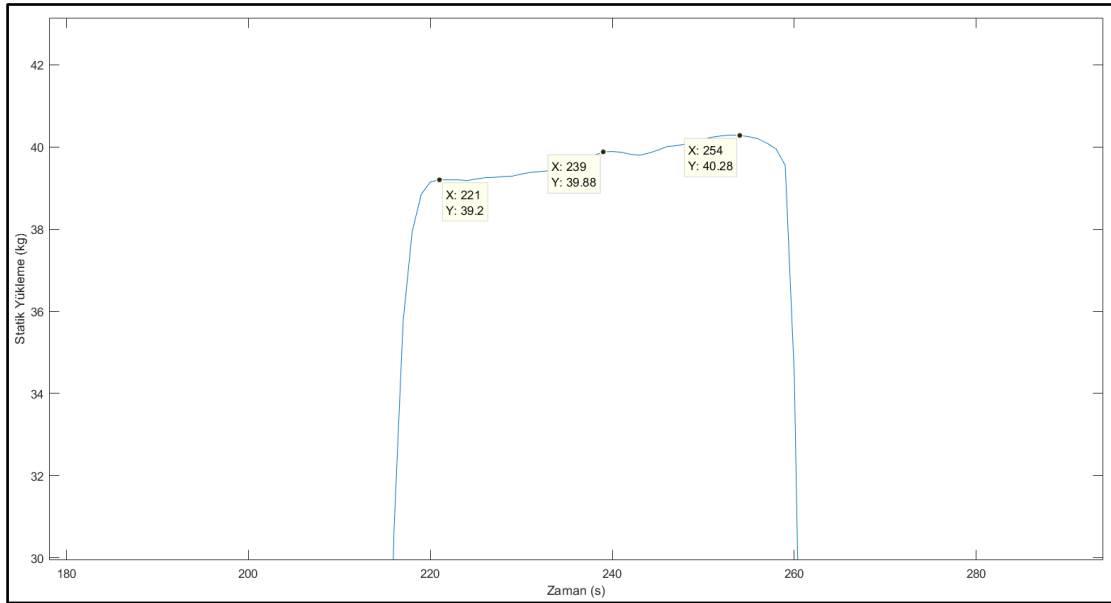
Şekil 4.3. Deney-15; 50 μ m, 40kg, 7rpm, katman-1



Şekil 4.4. Deney-15; 50 μ m, 40kg, 7rpm, katman-2



Şekil 4.5. Deney-9; 50 μ m, 30kg, 4rpm, katman-1



Şekil 4.6. Deney-9; 50 μ m, 30kg, 4rpm, katman-2

Ultrasonik birleştirme hattı boyunca alınan yükleme verilerinde, Deney-12 ve Deney-15'in grafiklerinde görüldüğü şekilde kabul edilebilir sapmalar olmasının birkaç sebebi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; sonotrodun zaman içerisinde aşınmış olması dolayısıyla sonotrot yüzeyi boyunca oluşagelen pürüzlülük farkları, tezgâhta kaynak hattı boyunca oluşan paralellik farkları, folyoların kalınlık değişimleri ve tezgâhın tamamen rijit olamamasıdır. Önceki bölümlerde bahsedilen; komparatör ve ayar vidaları ile yapılan düzeltmelerin çok hassas olamaması dolayısıyla, birleştirme bölgesi boyunca bu sapmaların

meydana gelmesi mümkündür. Bu sapmaların oluşmasında etkili olan diğer unsur ise, ultrasonik birleşme sırasında folyoların sonotrot tarafından ezilmiş kısımlarının üst üste tam olarak örtüşmemesidir. Önceki bölümlerde bahsedilen; birleşme için beslenen folyonun kaymasını ve kırışmasını engellemek adına tasarlanan folyo besleme sisteminin katmanlı birleştirmede hizalama hususunda sistem üzerindeki tasarrufu, folyolar hizalama parçasından çıktığı anda azalmaktadır. Örneğin Resim 4.19.'da ilk katmanlar ile son katmanlar arasında folyonun kısa kenarı boyunca bir kayma olduğu görülmektedir. Birleştirme esnasında folyo, önceki katmanın sonotrot tarafından ezilmemiş bölgesinin küçük bir kısmına birleştirildiğinde dahi oluşan statik yükleme değeri ile sonotrot tarafından ezilmiş bölgeye birleştirilmesi sırasında oluşan statik yükleme değeri arasında bir fark meydana geleceğinden, grafikte görülen sapmalar oluşmaktadır.



Resim 4.19. Folyo katmanlarının birbirini altında tam hizalanamaması

Deney-9'un statik yükleme verilerine ait grafik incelendiğinde ise birinci ve ikinci katman grafikleri arasında ciddi farklar olduğu görülmektedir. Bu farkların oluşmasında yukarıda bahsedilen nedenlerin etkisi, 30 kg'lık statik yükleme isteri olan deneylerde oldukça küçüktür. Bu deneylerde bu grafiklerin okunmasının en büyük sebebi, 200 μ m kalınlığındaki folyonun 30 kg'lık statik yükleme ile yeterince ezilememesidir. Deney-9'un birinci katmanı ile ikinci katmanı arasında karşılaştırma yapıldığında, statik yüklemede yaklaşık 10 kg'lık bir farkın olduğu görülmektedir. İlk katmanın birleştirilmesi sırasında folyo, diğer statik yükleme değerlerine kıyasla 30 kg ile yeterince ezilemediğinde, ikinci katmanın birleştirilmesi anında sonotrot normalde olması gerekenden daha büyük bir folyo kalınlığı toplamı ile karşılaştığından ikinci katmanın birleştirilmesi sırasında ölçülen statik yükleme değeri olması gerekenden çok daha yüksek çıkmaktadır. İlk katmanın birleştirilmesi sırasında okunan statik yükleme ölçüm grafiğinin davranışı da 30 kg değerindeki yüklemenin folyoyu yeterince ezememesi dolayısıyladır.

Ultrasonik birleşmenin gerçekleşebilmesi için birleşme bölgesine, statik yükleme-genlik ve kaynak hızının doğrudan katkısıyla oluşan ultrasonik enerji girişinin yeterli miktarda

yapılması gerekmektedir. Bu enerji giriři yeterli olmadığında, ultrasonik birleřmenin gerçekleřmesi beklenemez. Bu duruma istinaden Deney-1, Deney-2 ve Deney-11; 30 kg deęerindeki en dūřuk statik yūkleme deęerleriyle yapılmaya çalıřıldıęı için bu deneylerin bařarısız olduęu sūylenebilir. 30 kg'lık statik yūkleme ile yapılan deneylerden alınan grafik davranıřları, dięer deneylerinkine kıyasla farklı bir davranıř gūsterdięi için, bu deneyler birden fazla kez tekrarlanmıř ve her seferinde benzer sonuçlar ortaya çıkmıřtır. 7 numaralı deney setinin bařarısız olması konusunda ise řunlar sūylenebilir: 30 kg'lık statik yūklemeden sonra gelen en dūřuk statik yūkleme deęeri 40 kg'dır. Ayrıca bu deney seti parametreleri; deney tasarımı içerisindeki en yūksek kaynak hızı olan 10 rpm ve deney tasarımı içerisindeki en dūřuk genlik deęeri olan 40 μm 'dir. Kaynak hızının yūksek olması, genlik ve statik yūkleme deęerlerinin dūřuk olması, ultrasonik enerji giriřini ciddi ōlūde azaltacaęı için, bu deney seti ile yapılan birleřtirme denemesi de bařarısız olarak sonuçlanmıřtır deęerlendirmesini yapmak doęru olacaktır.

5. SOYMA TESTLERİ VE BAĞLANTI ARAYÜZÜ İNCELEMELERİ

5.1. Soyma Testleri

Başarılı olan deney setlerinde, folyolar arası birleşme kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla, her bir numuneye soyma testi uygulanmıştır.

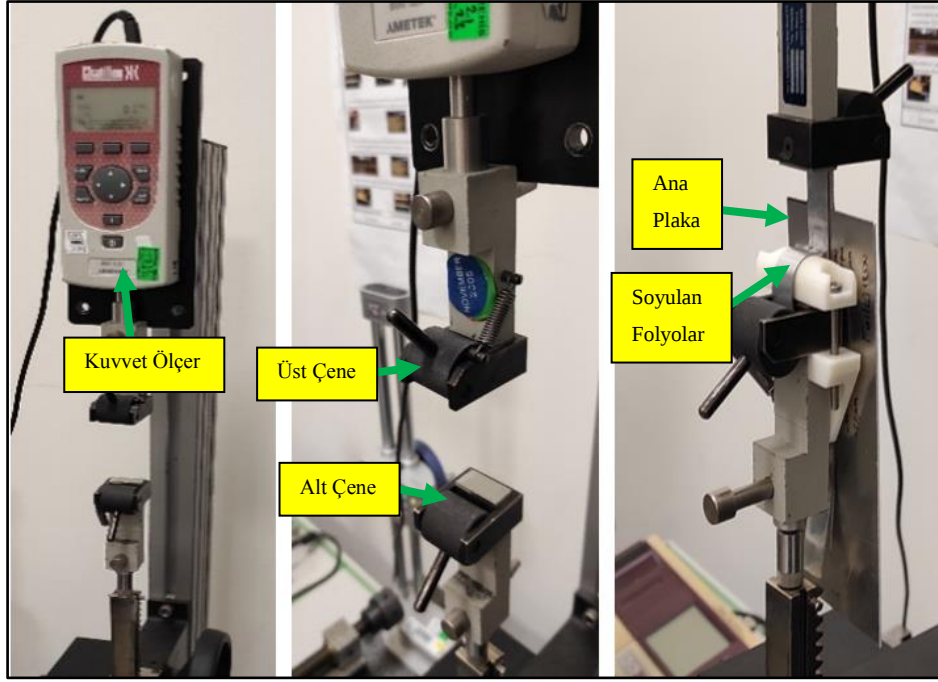
Numuneleri soyma testi düzeneğine uygun hale getirmek için Resim 5.1.'deki gibi numunelerin ana plakalarının sarı çerçeve içerisinde kalan kısımları kesilmiştir.



Resim 5.1. Soyma testi yapılacak numuneler

Resim 5.2.'de görüldüğü şekilde numuneler, ASTM D6862 – 11 standardı referans alınarak, ana plaka ile 1. ve 2. katman üst çeneye, 3. ve 4. katman alt çeneye bağlı olacak şekilde soyma testi düzeneğine bağlanmıştır. Soyma testi sırasında sırasıyla aşağıdaki işlemler gerçekleşir:

- Test sırasında numuneler soyma testi düzeneğine bağlanır.
- Alt çene yaklaşık 50mm/s sabit hızla aşağı doğru iner.
- Folyolar birbirinden ayrılırken kuvvet ölçerde kaydedilen maksimum kuvvet değeri, soyma testi sonucu olarak kaydedilir. Kuvvet ölçer her zaman test sırasında oluşan maksimum soyma kuvvetini göstermektedir.



Resim 5.2. Soyma testi deneyleri



Resim 5.3. Soyma testi yapılmış numuneler

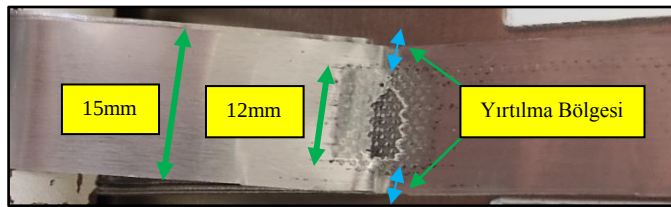
5.2. Soyma Testi Sonuçları

Aşağıda soyma testlerine istinaden elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

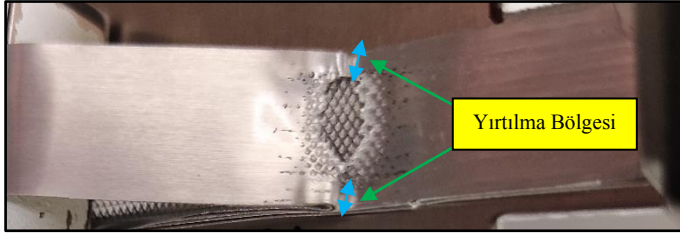
Çizelge 5.1. Soyma testi sonuçları

Deney No	Genlik (μm)	Statik Yükleme (kg)	Kaynak Hızı (rpm)	Soyma Testi Sonucu (N)
1	45	30	7	0
2	55	30	7	0
3	45	50	7	145
4	55	50	7	132
5	45	40	4	121
6	55	40	4	170
7	45	40	10	0
8	55	40	10	185
9	50	30	4	143
10	50	50	4	140
11	50	30	10	0
12	50	50	10	123
13	50	40	7	155
14	50	40	7	163
15	50	40	7	156

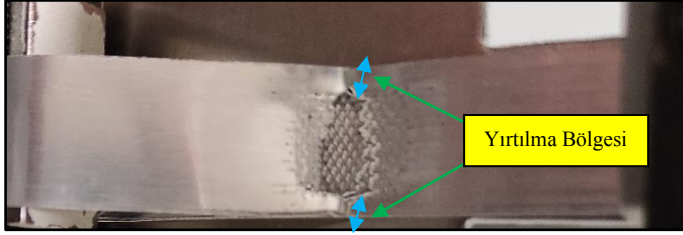
Soyma testi sonrasında bütün numunelerin ayrılma bölgelerinin fotoğrafı çekilmiştir. Yapılan incelemelerde tüm numunelerin benzer ayrılma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu davranışın görülmesi için örnek olması bakımından bazı numunelerin fotoğraflarına aşağıda yer verilmiştir.



Resim 5.4. Deney-3 soyma testi



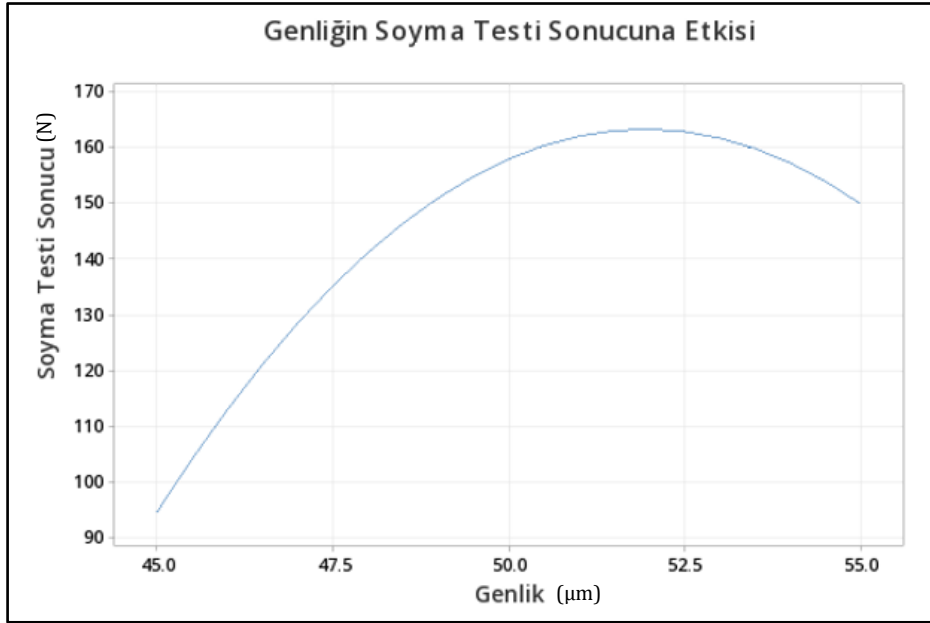
Resim 5.5. Deney-9 soyma testi



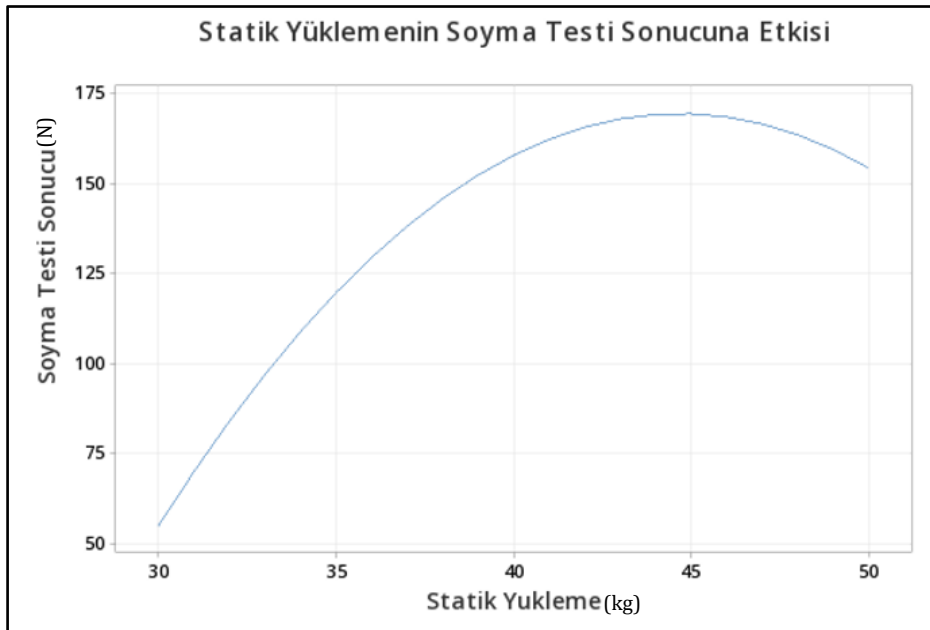
Resim 5.6. Deney-14 soyma testi

Ultrasonik birleştirme için kullanılan sonotrodun genişliği 12 mm, folyonun genişliği ise 15 mm'dir. Ultrasonik birleşme sonrasında folyonun mavi oklar ile gösterilen her iki tarafında, uzun kenarı boyunca yaklaşık 1.5 mm uzunluğunda kaynaklanmayan bölgeler (Resim 5.4., Resim 5.5. ve Resim 5.6.) bulunmaktadır. Soyma testine istinaden yapılan incelemelerde, tüm numunelerde folyoların deforme olup ayrılmaya başladığı kısımların bu bölgeler olduğu görülmektedir. Ultrasonik birleşmenin doğası gereği, sonotrodun folyolara uyguladığı mekanik titreşimlerin, folyolar üzerinde plastik deformasyon oluşturduğundan daha önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bu plastik deformasyonun katkısıyla kaynak bölgesinde folyolar arasında ultrasonik birleşme sağlanıyor olsa da ultrasonik birleşmenin olmadığı ve kaynak bölgesine yakın alanların, yüksek frekanslı mekanik titreşimler dolayısıyla deforme olduğu da bir gerçektir. Bu gerçekten hareketle, soyma testi yapılan numunelerin en zayıf noktalarının bu bölgeler olması dolayısıyla, soyma testi sırasında folyolarda deformasyonun başlayacağı ilk bölgenin, mekanik titreşimler ile deformasyona uğramış bu alanlar olması kaçınılmazdır.

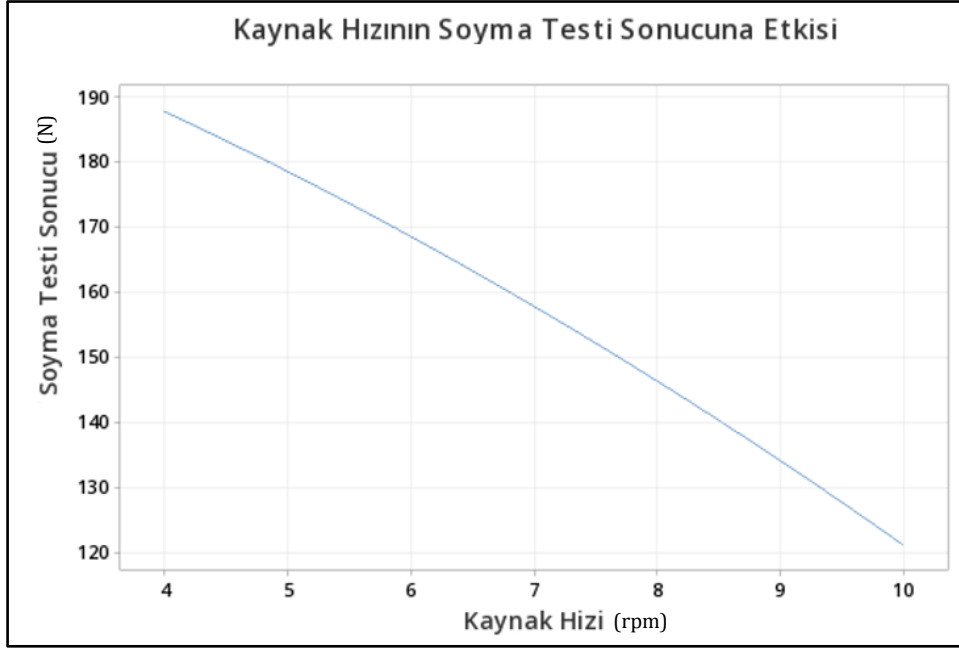
Soyma testleri sonucunda elde edilen değerler, Minitab® uygulamasına girilmiş ve hazırlanan deney parametreleri ile deney sonuçları analiz edilerek statik yükleme, genlik ve kaynak hızı parametrelerinin soyma testi sonuçlarına olan etkileri incelenmiştir. Aşağıda statik yükleme, genlik ve kaynak hızı parametrelerinin, soyma testi sonuçlarına olan etkilerini gösterir grafikler bulunmaktadır.



Şekil 5.1. Genlik-soyma testi sonucu grafiği



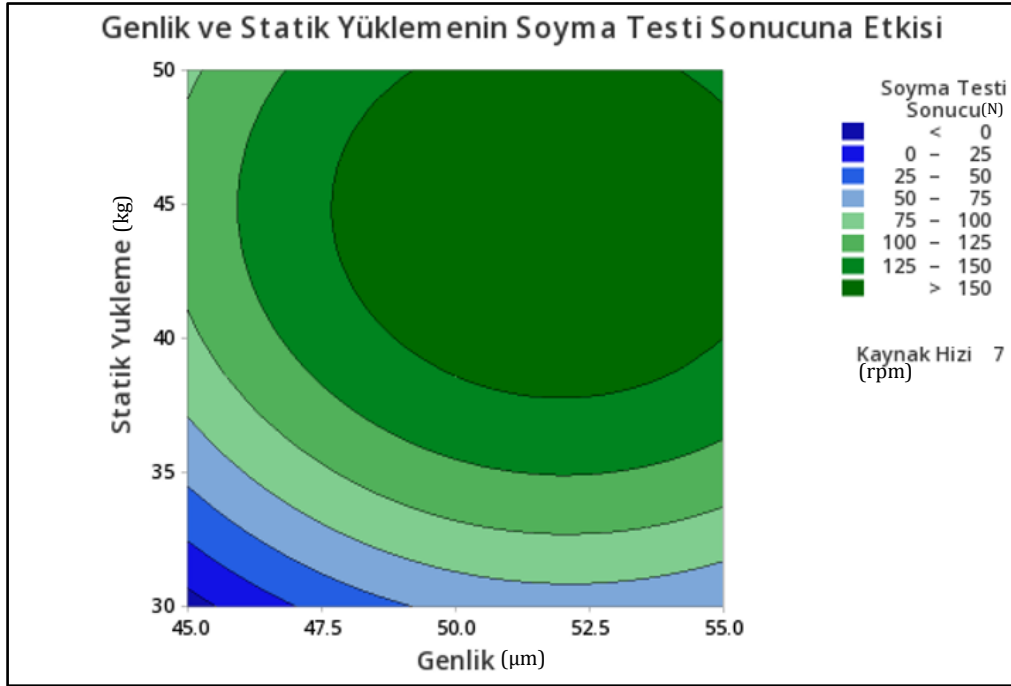
Şekil 5.2. Statik yükleme-soyma testi sonucu grafiği



Şekil 5.3. Kaynak hızı-soyma testi sonucu grafiği

Soyma testi, ultrasonik birleşmede birleşme kalitesinin değerlendirilmesi için kullanılan en temel yöntemlerden birisidir. Kaynak bölgesinin ultrasonik enerjiye miktar ve zaman olarak maruziyeti, ultrasonik birleşme kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu maruziyeti değiştiren parametreler genlik, statik yükleme ve kaynak hızı olduğu için, bu parametrelerin değişimi ile ultrasonik birleşme kalitesi de doğrudan etkilenmektedir. Genlik ve statik yüklemenin değişimi; miktar olarak ultrasonik enerji maruziyetini, kaynak hızı ise zaman olarak ultrasonik enerji maruziyetini etkilemektedir.

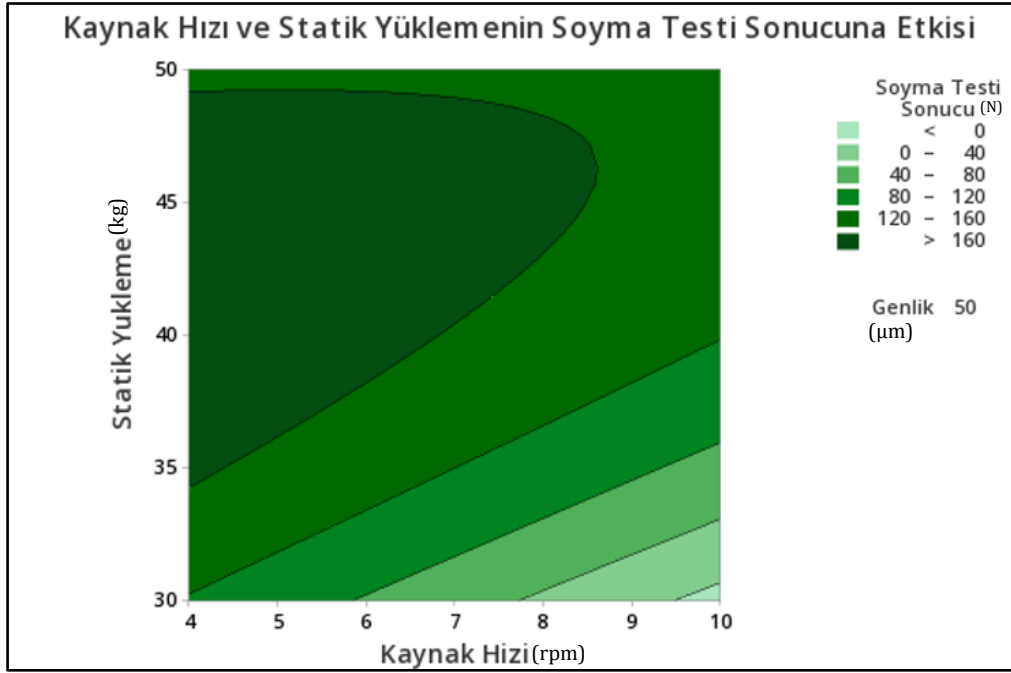
Yukarıdaki grafiklerden genlik, statik yükleme ve kaynak hızı değerlerinin soyma testi sonuçlarına etkisi incelendiğinde, ultrasonik enerji maruziyeti ne kadar fazla olursa, bağlanma kalitesinin de o kadar arttığı görülmektedir ancak grafiklerde de görüldüğü kadarıyla, bu artış miktarının belirli bir sınırı olduğu, bu sınır aşıldığında bağ kalitesinin azalma eğilimi gösterdiği dikkat çekmektedir. Böyle bir sınırın oluşmasının sebebi ise, önceki bölümlerdeki literatür araştırmalarında da bahsedildiği üzere, yüksek enerji girişi dolayısıyla birleşme bölgesi üzerinde oluşan aşırı stresler nedeniyle, düzgün bir şekilde oluşan bağların da zarar görmeye başlamasıdır.



Şekil 5.4. Genlik ve statik yükleme-soyma testi sonucu grafiği

Genlik, statik yükleme ve kaynak hızı parametrelerinin soyma testi sonuçlarına olan etkileri tekil olarak incelendikten sonra, bu parametrelerin test sonuçlarına etkilerinin birbirlerine göre ağırlıkları noktasında değerlendirme yapılması için Minitab® uygulamasında kontur grafikleri oluşturulmuştur.

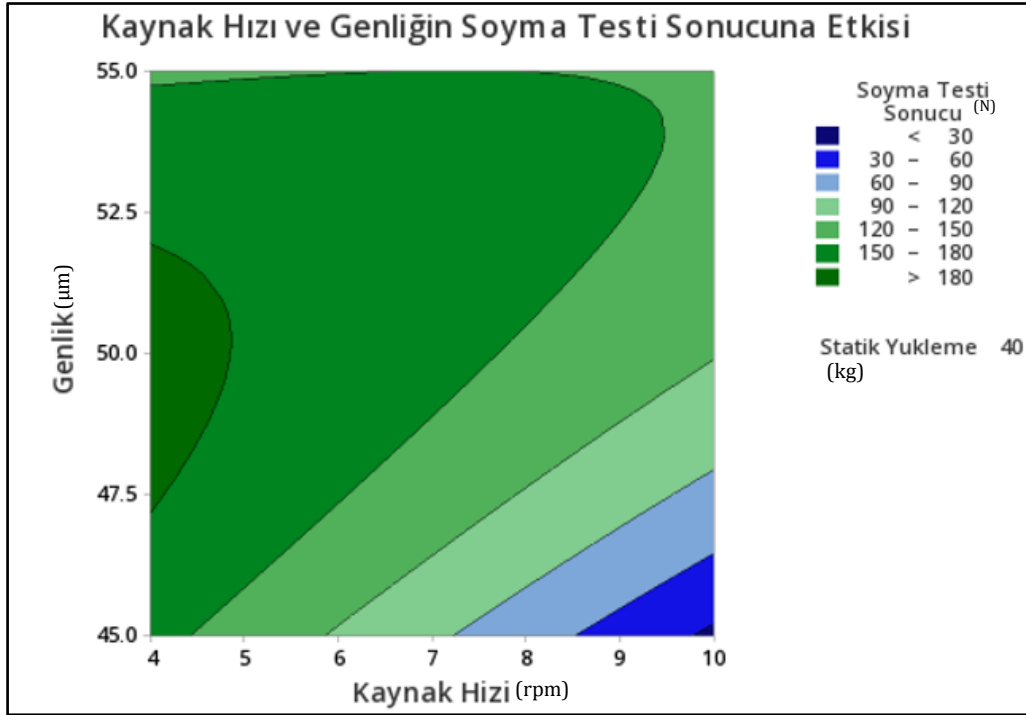
Şekil 5.4.'te, genlik ve statik yüklemenin test sonuçlarına etkisinin değerlendirilebilmesi için kaynak hızı, ortalama bir değer olması itibarıyla 7 rpm'de sabit tutulmuştur. Grafikteki kontur şekli ve renk dağılımı incelendiğinde, iki parametre değerinin azalması durumunda birleşme kalitesinin her ikisi için de benzer seviyede azaldığı, arttığında ise yine her ikisi için benzer seviyede arttığı görülmektedir. Bunun durumun nedeni, birleşme kalitesini belirli bir sınıra kadar iyileştiren ultrasonik enerji girişinin her iki parametre arttığında artması, azaldığında ise doğrudan azalmasıdır.



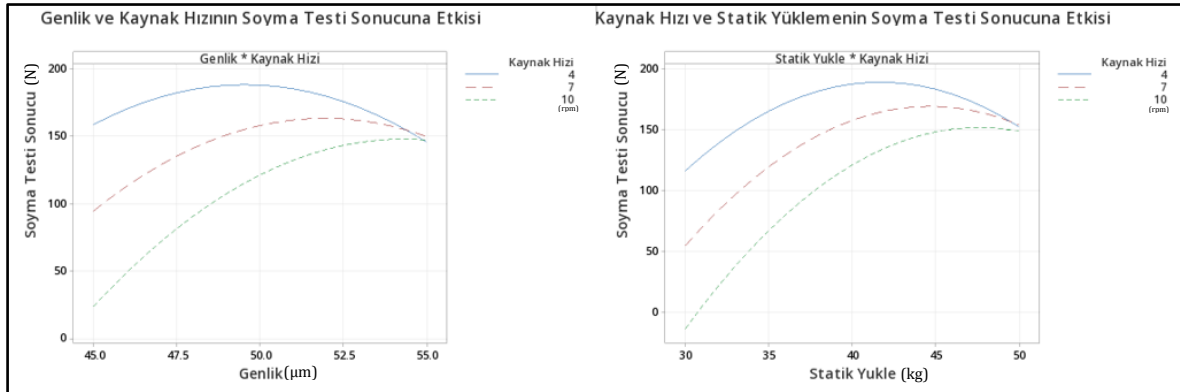
Şekil 5.5. Kaynak hızı ve statik yüklem-soyma testi sonucu grafiği

Şekil 5.5.'te, kaynak hızı ve statik yüklemenin test sonuçlarına etkisinin değerlendirilebilmesi için genlik, ortalama bir değer olması itibarıyla 50 µm'de sabit tutulmuştur. Grafikteki kontur şekli ve renk dağılımı incelendiğinde, statik yüklemenin düşük olduğu değerlerde, ideal kaynak hızlarının da düşük olduğu görülmektedir. Kaynak kalitesinin iyileşmesi bakımından ultrasonik enerji girişinin artması gerektiği için, statik yüklemenin düşük olduğu durumda azalan ultrasonik enerji girişi; kaynak maruziyeti süresinin artmasıyla artacağından, kaynak hızının bu etkinin oluşabilmesi adına azaldığı görülmektedir. Tam tersi durumda ise, ultrasonik enerji girişi, yüksek statik yüklem değerlerinde daha fazla olduğunda bağlantı arayüzleri zarar gördüğünden, ultrasonik enerjiye maruziyet süresi azaldığı takdirde bağlantı arayüzlerindeki deformasyon da azalacağından birleşme kalitesinin arttığı görülmektedir.

Kaynak hızı ve statik yüklem için yapılan bu değerlendirme, Şekil 5.6.'da, statik yüklemenin sabit olarak ortalama değer olan 40 kg'da tutulduğu durumda, benzer şekilde kaynak hızı ve genlik için de yapılabilir. Kaynak hızı ve statik yüklem grafiğindeki koyu yeşil renkli kontur 160 N ve üzeri soyma testi sonuçlarını ifade ederken, kaynak hızı ve genlik grafiğindeki sınırlı alana sahip koyu yeşil renkli kontur, 180 N ve üzeri soyma testi sonuçlarını ifade etmektedir. Bu nedenle sonuçların, yukarıda yorumlanandan farklı olacağı yanlıgısına düşülmemelidir.

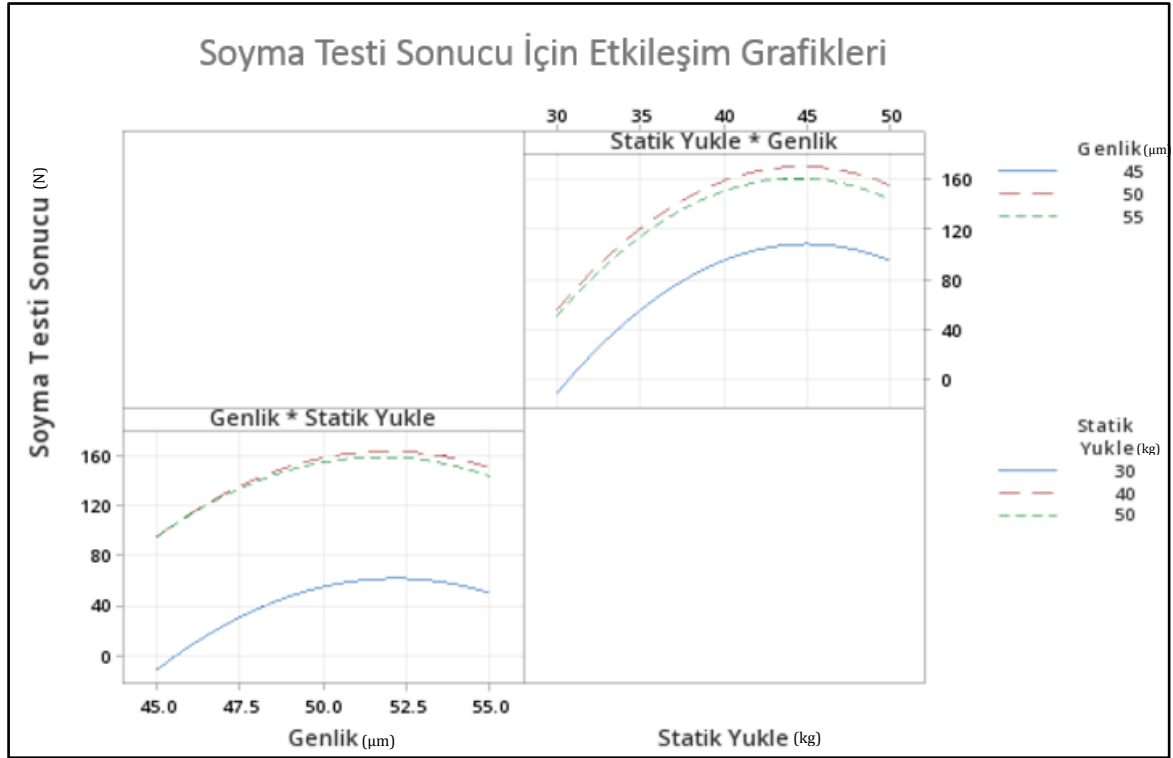


Şekil 5.6. Kaynak hızı ve genlik-soyma testi sonucu grafiği



Şekil 5.7. Genlik/statik yükleme ve kaynak hızı-soyma testi sonucu grafikleri

Ultrasonik birleştirmede parametrelerin soyma testi sonucuna etkilerini görmek adına, sonuçlar bakımından birbirine yakın anlamları ihtiva etse de detaylı inceleme noktasında fayda sağlayacağı düşüncesiyle, farklı grafik tipleri kullanılmıştır. Genlik-kaynak hızı ve statik yükleme-kaynak hızı ikililerinin soyma testi sonuçlarına etkileri noktasında benzer çıktılar elde edildiği yukarıda belirtilmişti. Bu benzerlikler, faktöriyel grafik tipinde de Şekil 5.7.'deki gibi görülmektedir.



Şekil 5.8. Genlik ve statik yükleme-soyma testi sonucu grafiği

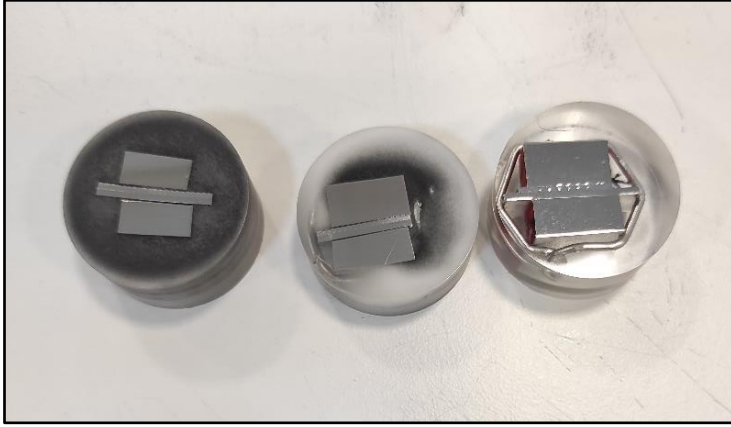
Şekil 5.8.'de yer alan grafikte, 40 ile 50 kg aralığındaki statik yüklemelerin, genliğin kaynak bölgesine yaptığı ultrasonik enerjiye katkısı noktasında ve 50 ile 55 μm aralığındaki genlik değerlerinin, statik kuvvetin kaynak bölgesine yaptığı ultrasonik enerjiye katkısı noktasında kayda değer bir farka katkı sağlamadığı görülmektedir. Buradan hareketle, statik yükleme ve genliğin ultrasonik birleşme kalitesi üzerinde birbirlerini tetikleme bağlamında belirli bir noktaya kadar pozitif etkisi olduğu, ancak genlik belirli bir seviyeye ulaştığında statik yüklemadaki artışın ve statik yükleme belirli bir seviyeye ulaştığında genlikteki artışın, birleşme kalitesine etkisinin çok azaldığı yorumu yapılabilir. Ayrıca, statik yükleme ve genlik eğrilerinin eğimleri karşılaştırıldığında, statik yüklemenin bağ kalitesine olan etkisinin genliğe göre ufak da olsa daha fazla olduğu söylenebilir.

5.3. Bağlantı Arayüzü İncelemeleri

5.3.1. Yüzey hazırlama işlemleri

Oluşturulan numunelerin soyma testlerinin yapılmasının akabinde, folyoların arasında oluşan bağlantı arayüzlerinin mikroskop altında incelenmesi için Metkon® Hydropress markalı sıcak bakalit (toz şeklinde bir epoksi çeşidi) cihazı ile üç adet numune üretildikten

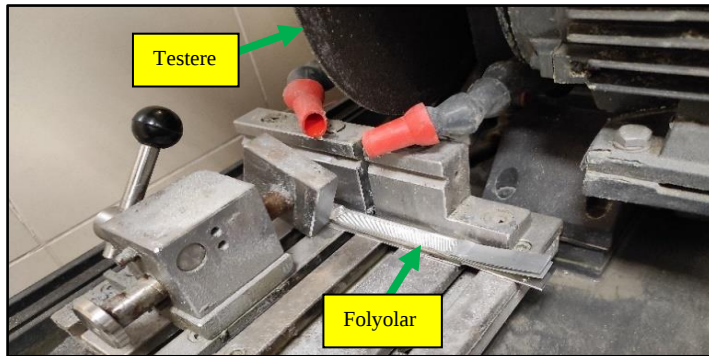
sonra Metkon® Forcimat markalı cihazla numunelerin yüzeyleri hazırlanmıştır. Numuneler 40 kg statik yükleme, 50 μm genlik ve 7 rpm kaynak hızı parametrelerinden oluşan deney setiyle üretilen folyolardan oluşturulmuştur (Resim 5.7.).



Resim 5.7. Bağlantı arayüzü inceleme numuneleri

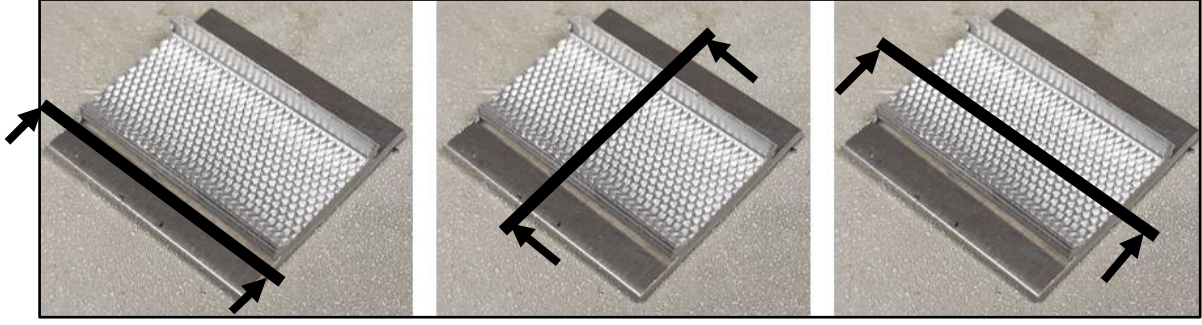
Numuneler hazırlanırken sırasıyla aşağıdaki aşamalardan geçmiştir:

1. Numunelerin testerede kesilerek hazırlanmasına uygun hale getirilmesi için folyo alanının dışında kalan ana plaka bölgeleri delme presi ile kesilmiştir.
2. Testereye bağlanan folyolardan uygun boylarda numuneler kesilmiştir.



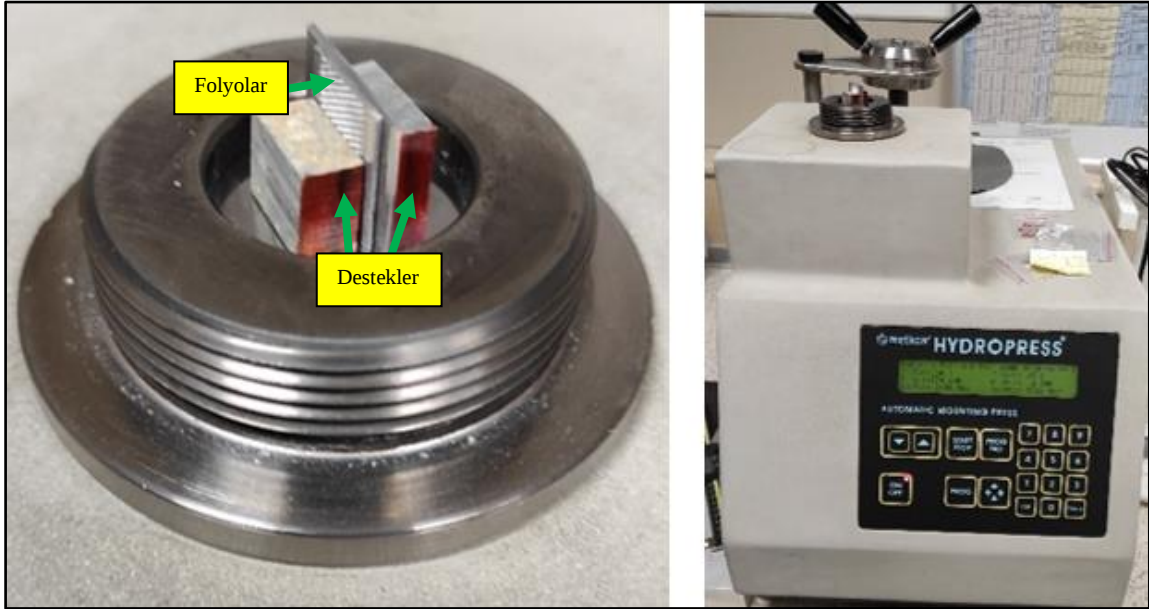
Resim 5.8. Numunelerin kesilmesi

3. Ultrasonik birleşim yerinin uzun kenar boyunca incelenmesi, kısa kenar boyunca incelenmesi ve folyo ile ana plakanın uzun kenar boyunca birleştiği hattın incelenmesi için üç farklı numune oluşturulmuştur.



Resim 5.9. Bağlantı arayüzü incelemeleri için hazırlanan numunelerin kesilme yönleri

4. Numunelerin sıcak bakalite gömülmeleri esnasında dik durabilmeleri için, numuneler iki yanından alüminyum parçalarla desteklenmiştir.



Resim 5.10. Hazırlanan numunelerin bakalite gömülmesi işlemleri

5. Numuneler sıcak bakalite gömüldükten sonra 30 N kuvvet ve 150 rpm hızla sırasıyla 180, 320, 600, 800, 1000 ve 2000 ölçülerindeki SiC zımparalarla zımparalanmıştır. Sonrasında yine 30 N kuvvet ve 150 rpm hızla sırasıyla 3 μ m ve 1 μ m boyutlarındaki aşındırıcı elmas tozlar ve su bazlı yağlayıcılar içeren solüsyonlarla yüzeyleri parlatılmıştır.



Resim 5.11. Numunelerin yüzey aşındırma ve parlatma işlemleri



Resim 5.12. Numunelerin yüzey parlatma işlemlerinde kullanılan solüsyonlar

5.3.2. Taramalı elektron mikroskobu ile bağlantı arayüzü incelemeleri

Yüzeyleri hazırlanan numunelerin, Phenom® XL markalı masaüstü tipi taramalı elektron mikroskobu altında bağlantı arayüzleri incelenmiştir.

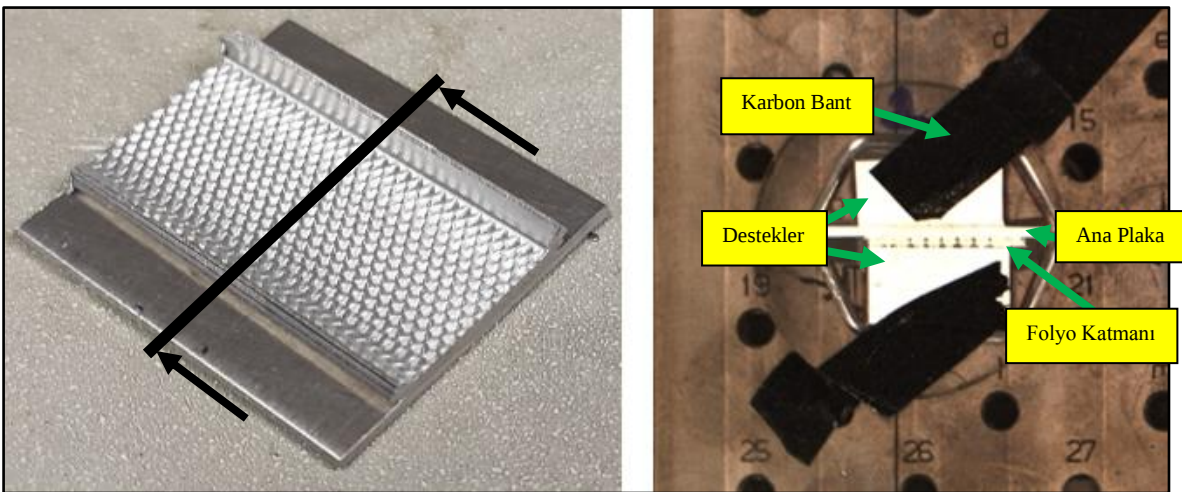


Resim 5.13. Taramalı elektron mikroskobu

Bağlantı arayüzlerine ait incelemeler; 15 kV modunda, 1 Pa vakum altında BSD dedektörü kullanılarak yapılmıştır. Aşağıda çeşitli ölçeklerde; Numune-1, Numune-2 ve Numune-3'ün birleşme arayüzlerine ait çeşitli fotoğraflar yer almaktadır.

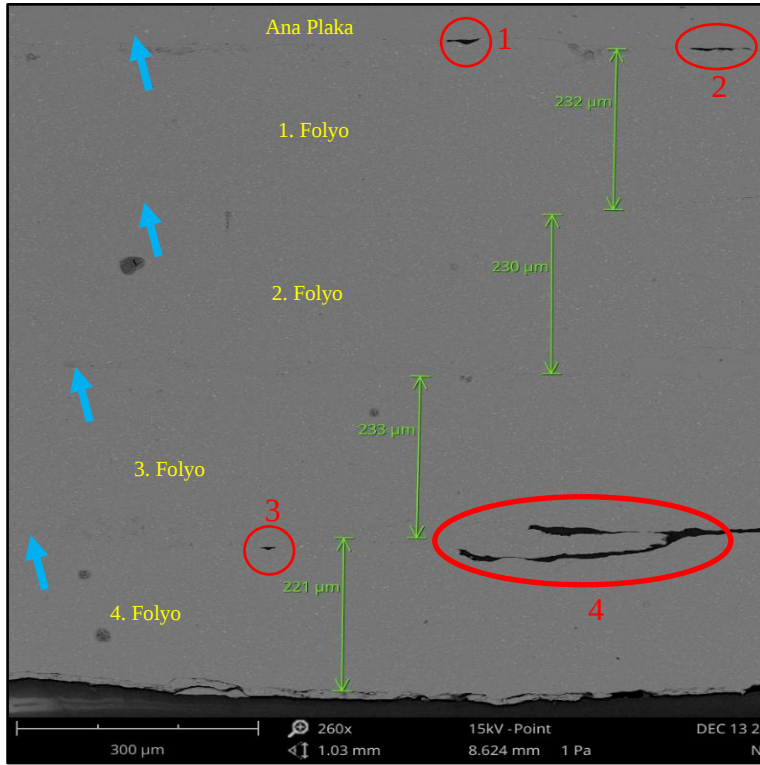
Numune-1'e ait SEM görüntüleri

Numune-1, birleştirilen folyoların kısa kenarı boyunca kesilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin SEM'de incelenirken görüntülerinin net çıkabilmesi adına topraklamalarının yapılması için karbon bantlar kullanılmıştır.



Resim 5.14. Numune-1'in kesim yönü ve elektron mikroskobuna yerleştirilmesi

- SEM görüntülerinde, folyo-ana plaka birleşme hatları ve folyoların kendi içerisindeki birleşme bölgeleri mavi oklar ile gösterilmiştir.
- Birleşme arayüzü hataları, kırmızı çerçeveler ile gösterilmiştir.

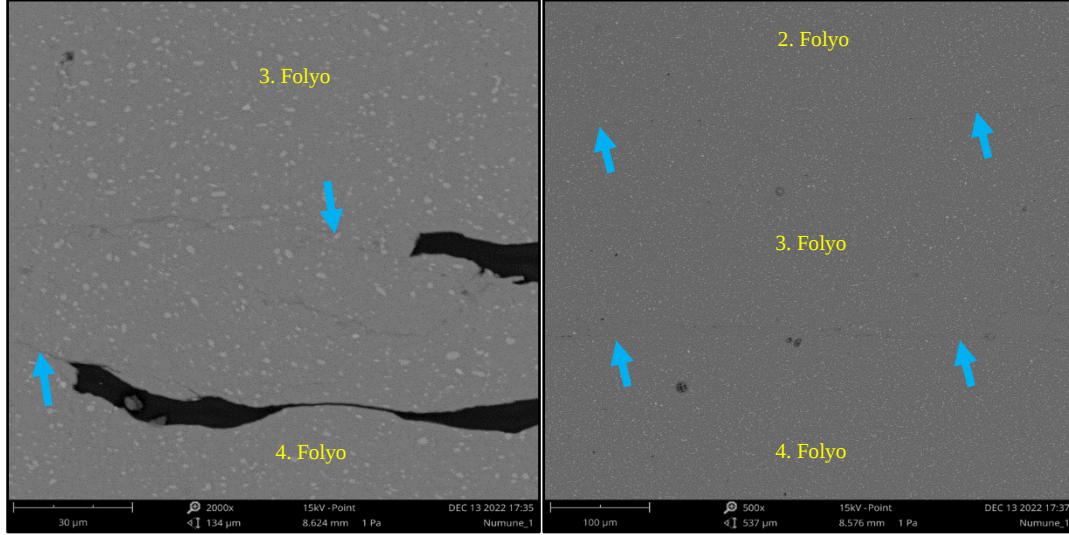


Resim 5.15. Ultrasonik birleşme arayüzleri

SEM ile yapılan mikroskop incelemelerinde, folyoların birbirlerine ve ana plakaya bağlanma durumları incelenmiştir. Resim 5.15.'te yer alan SEM görüntüsünde, ultrasonik birleşmede bağlantı arayüzlerinde bulunabilen bazı birleşme hataları görülmektedir. 1, 2 ve 3 numaralı gözenekler, çalışmanın literatür araştırması kısmında da bahsedilen; sebeplerinden birisi düşük enerji girişi olan tip-1 numaralı birleşme hatasına örnektir. Ultrasonik birleşmede, folyolar arasında metalürjik bağın kurulabilmesi, folyolar arasındaki oksit tabakalarının kırılması ile mümkündür. Bu tabakaların kırılması ise doğrudan ultrasonik enerji giriş miktarına bağlıdır. Bu birleşme hataları, ultrasonik enerji girişinin yetersiz gelip oksit tabakalarının kırılmaması dolayısıyla folyolar arasında birleşmenin meydana gelememesi ile oluşur.

4 numaralı birleşme hatası, ultrasonik birleşme sırasında folyo üzerinde meydana gelen hasar dolayısıyla oluşmuştur. Resim 5.16.'da daha büyük ölçekli görüldüğü şekliyle, birleşme

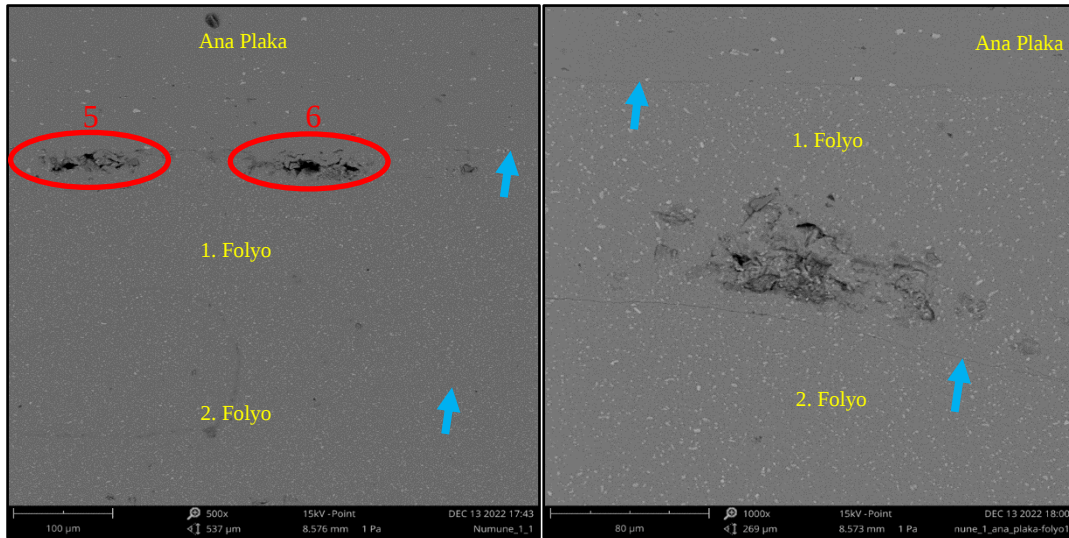
hattının iki parçaya ayrıldığı, bu nedenle boşlukların oluştuğu görülmektedir. Birleşme hattının ikiye ayrılması ise folyonun deforme olduğunu daha net bir şekilde göstermektedir.



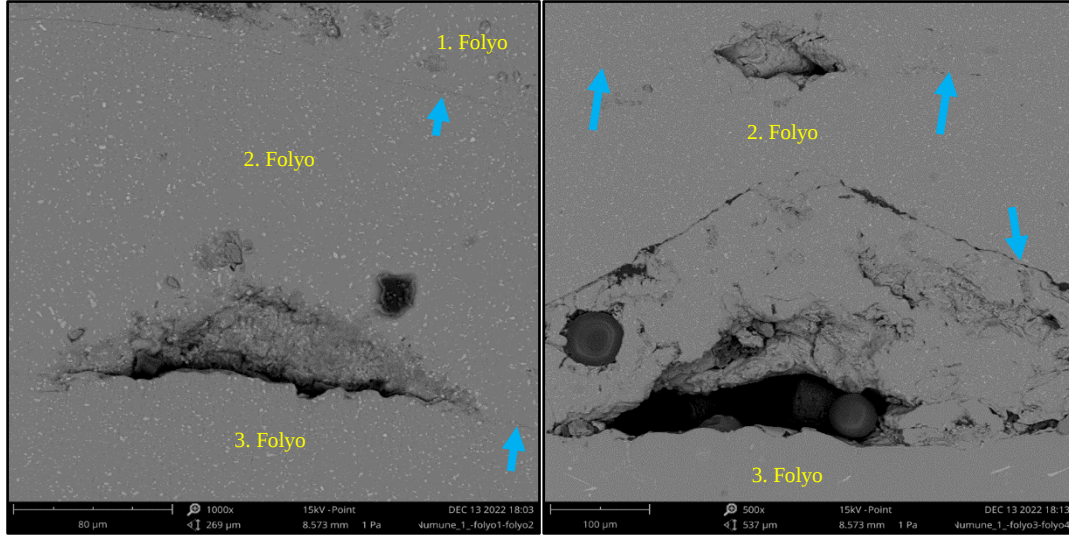
Resim 5.16. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları

Yüzey hatalarının olmadığı bölgelerde, folyolar arası birleşmenin Resim 5.16.'da da görüldüğü üzere oldukça net ve iyi olduğu değerlendirilmektedir.

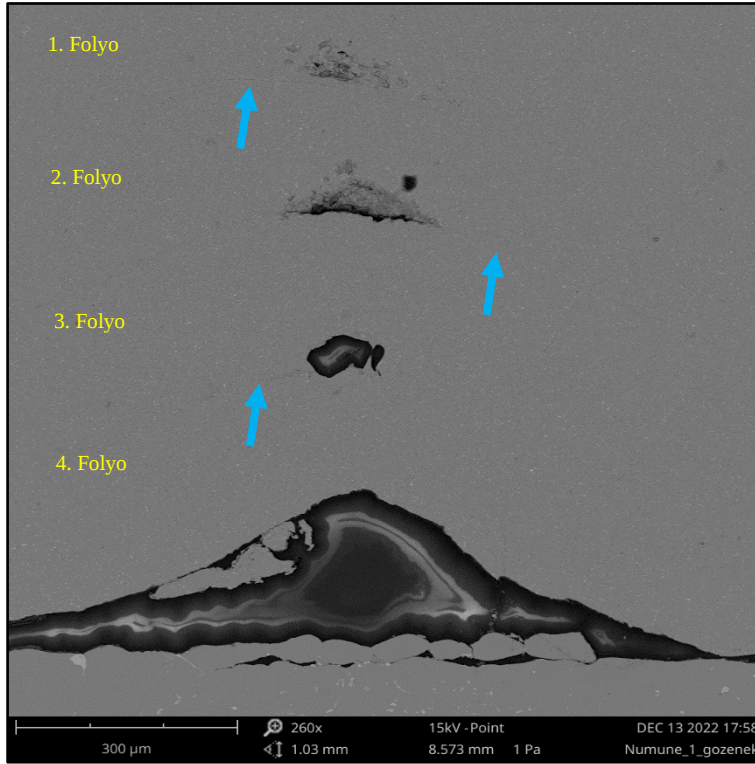
Resim 5.17. ve Resim 5.18.'de, sonotrodun folyo üzerinde meydana getirdiği deformasyon dolayısıyla folyo yüzeyinde mikro parçalanmaların oluşmasına istinaden birleşme bölgelerinde bozukluklar olduğu tespit edilmiştir.



Resim 5.17. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları



Resim 5.18. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları



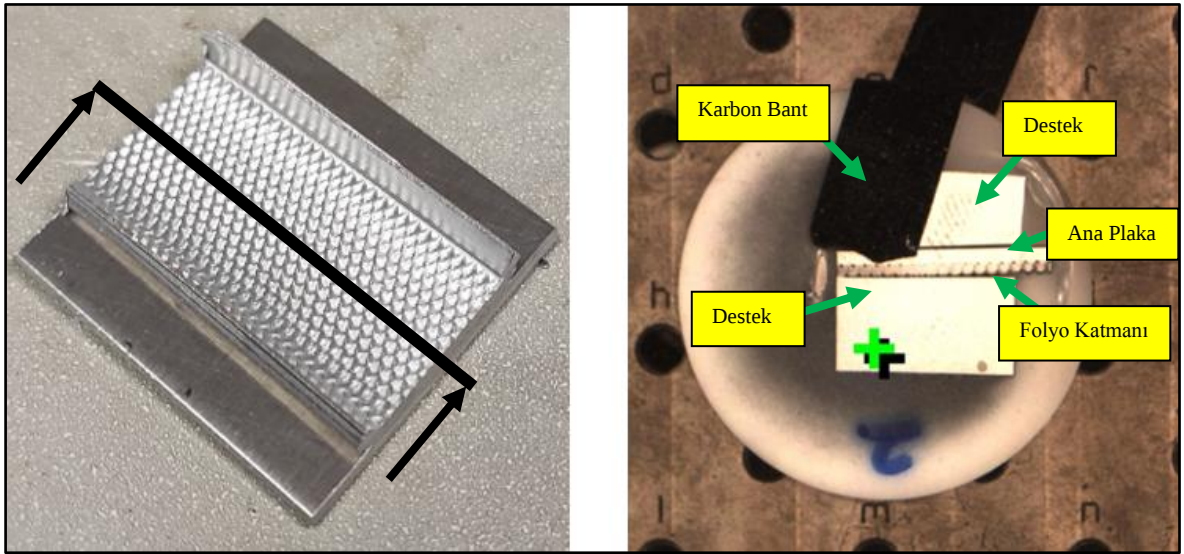
Resim 5.19. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları

Resim 5.18. ve Resim 5.19.'da görülen yüzey hatalarının temel kaynağı, sonotrot yüzeyinin pürüzlülük miktarıdır. Folyoların üst yüzeylerinde, üçgen şeklinde meydana gelen yüzey boşlukları, sonotrodun yüzeyinde bulunan çıkıntıların şeklindedir. Bu üçgen şeklindeki yapıların bütün katmanlar arasında var olduğu ancak 4. folyonun yüzeyinde bulunan boşluğun, bunların içindeki en büyük boyutlu boşluk olduğu görülmektedir. Bunun sebebi

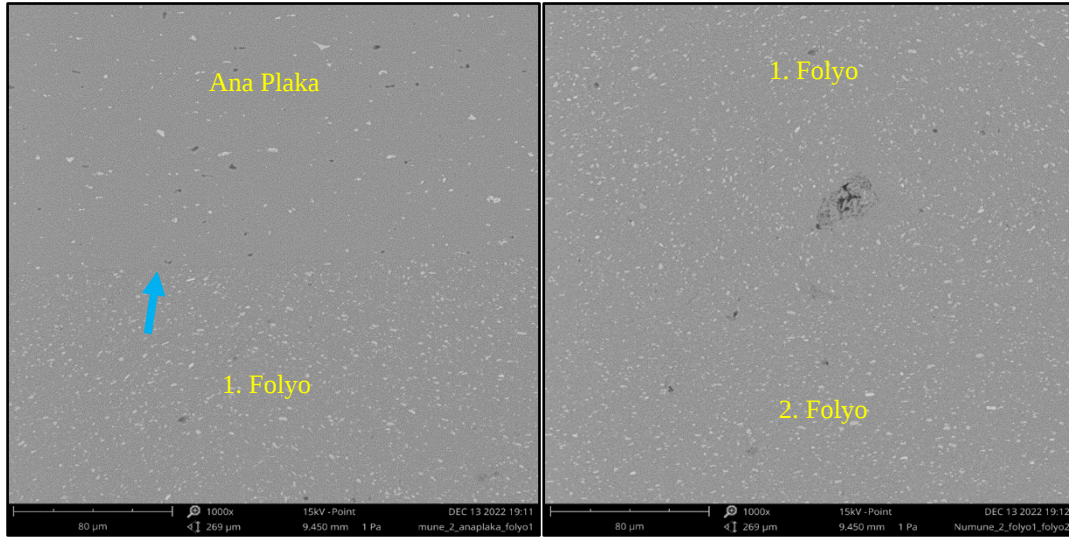
şu şekilde ifade edilebilir: Sonotrot, 1. folyoyu ana plakaya birleştirdiğinde, 1. folyo üzerinde, Resim 5.19.'daki 4. folyonun yüzeyinde bulunan üçgen boşluk kadar büyük bir boşluk bulunmaktadır ancak 2. folyo katmanı, 1. folyo katmanının üzerine birleştirildiğinde, 1. folyo katmanının üzerinde bulunan bu boşluk, ultrasonik birleşme dolayısıyla büyük ölçüde kapanmaktadır. 4. folyo katmanı, bu çalışma kapsamında üretilen numunelerde bulunan son katman olduğundan, bu folyo üzerinde 1, 2 veya 3 numaralı folyo katmanlarında olduğu gibi herhangi bir birleşme olmamaktadır. Dolayısıyla 1, 2 ve 3 numaralı folyoların üst taraflarında bulunan ve sonotrot kaynaklı deformasyon sonucu oluşan boşluğun hacmi, 4 numaralı folyonun üzerinde bulunandan çok daha azdır.

Numune-2'ye ait SEM görüntüleri

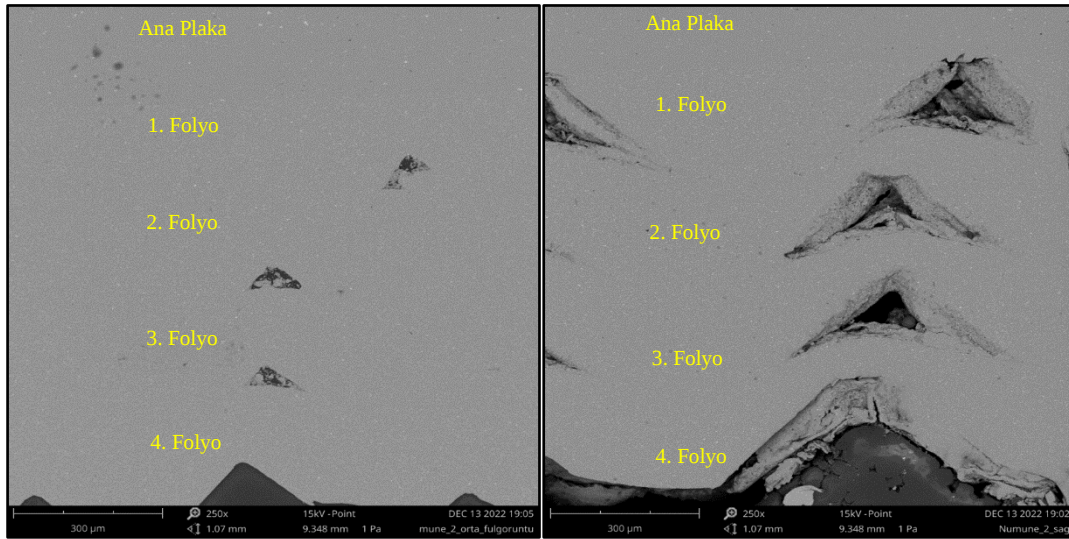
Numune-2, birleştirilen folyoların uzun kenarı boyunca kesilerek hazırlanmıştır.



Resim 5.20. Numune-2'nin kesim yönü ve elektron mikroskobuna yerleştirilmesi



Resim 5.21. Ultrasonik birleşme arayüzleri

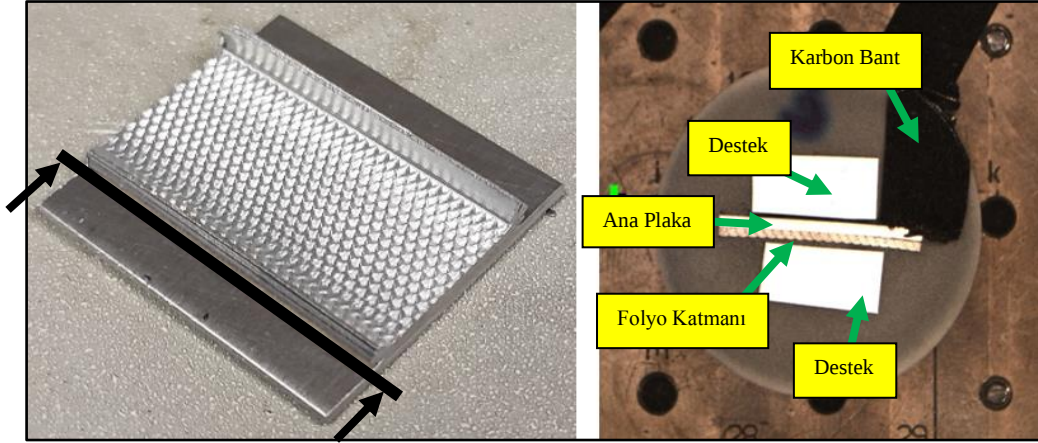


Resim 5.22. Ultrasonik birleşme arayüzeyi hataları

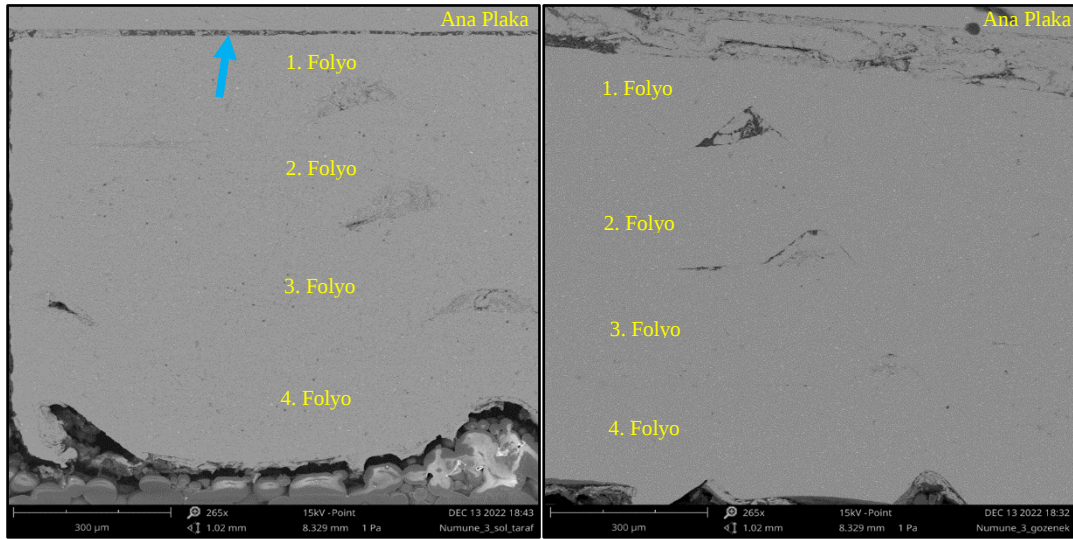
Numune-2'ye ait görüntülerde yer alan birleşme hataları, Numune-1'deki birleşme hataları ile büyük benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla bu hataların oluşum sebepleri de aynıdır.

Numune-3'e ait SEM görüntüleri

Numune-3, birleştirilen folyoların uzun kenarı boyunca oluşan birleşme hattı incelenmek üzere, inceleme bölgesi kesilmeden hazırlanmıştır.



Resim 5.23. Numune-3'ün kesim yönü ve elektron mikroskobuna yerleştirilmesi



Resim 5.24. Ultrasonik birleşme arayüzleri

Numune-3'e ait görüntülerde yer alan birleşme hataları da Numune-1'deki birleşme hataları ile büyük benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla bu hataların da oluşum sebepleri aynıdır.

5.3.3. Lineer kaynak yoğunluğunun hesaplanması

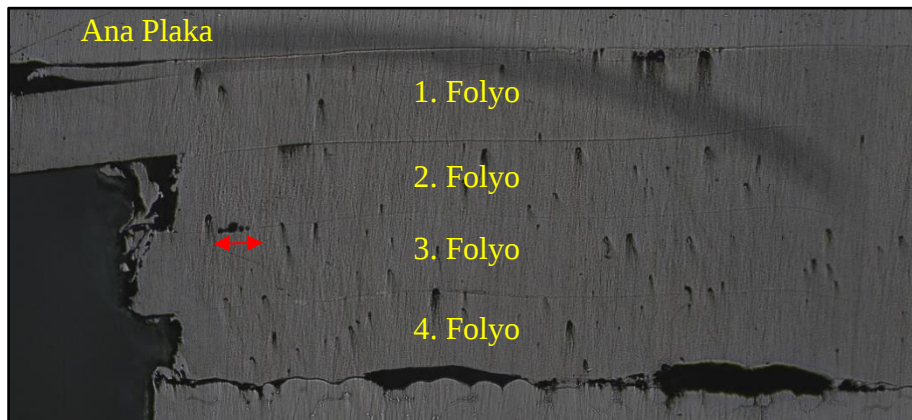
SEM ile alınan mikroskop görüntüleri, ultrasonik birleşme arayüzlerinin kalitesi ve birleşme hataları hakkında genel kanaat sahibi olmak için yeterli bilgiyi sağlamaktadır ancak literatürde, ultrasonik birleşme kalitesinin nicel olarak değerlendirilmesi için “lineer kaynak yoğunluğu” (linear weld density) parametresi kullanılmaktadır. Bu parametre aşağıdaki formülasyon ile ifade edilir:

$$\text{LWD (\%)} = \left(1 - \frac{L_d}{L}\right) \times 100$$

Burada LWD; lineer kaynak yoğunluğu, L_d ; birleşme hatları üzerinde bulunan, hasar görmüş veya üzerinde bağ kurulamamış bölgelerin uzunluğu, L; total kaynak bölgesi uzunluğudur. Bu değer genellikle, Numune-1'in kesim yönünde olduğu gibi, kaynak hattı yönüne dik istikamette kesitler alınarak yapılan ölçümler ile hesaplanmaktadır [32]. Yukarıda yer alan bilgilere istinaden lineer kaynak yoğunluğunun hesaplanması için, Numune-1'in tüm kaynak hattı, mikroskop altında parça parça fotoğraflanarak bu fotoğraflar daha sonra birleştirilmiştir. (Resim 5.25.)



Resim 5.25. Numune-1'e ait birleşme hatları



Resim 5.26. Numune-1'de yer alan birleşme hataları-1

Lineer kaynak yoğunluğunun belirlenmesi için literatürde uygulandığı gibi, 1. folyo ile ana plaka arasındaki birleşme hataları dışında, diğer folyoların birleşme arayüzlerinde bulunan boşlukların uzunluğu ve tüm birleşme hattının uzunluğu ölçülmüştür [32].



Resim 5.27. Numune-1'de yer alan birleşme hataları-2

Yapılan ölçümler neticesinde, Numune-1'in lineer kaynak yoğunluğu yaklaşık %90,6 olarak tespit edilmiştir. Lineer kaynak yoğunluğu ölçümü yapılan numunede, kaynak yoğunluğunu negatif anlamda etkileyen en büyük unsurun, sonotrot kaynaklı gözenekler olduğu görülmektedir. Bu gözeneklerin dışında kalan bölgelerdeki birleşme hatalarının minör seviyelerde olduğu değerlendirildiğinde, mevcut parametrelerin birleşme kalitesi noktasında optimum bir değere yakın olduğu, sonotrot yüzey pürüzlülüğü azaltıldığı takdirde ise lineer kaynak yoğunluğunun %100 mertebelerine çıkabileceği görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, en temel parametreleri genlik, statik yükleme ve kaynak hızı olan ultrasonik eklemeli imalatın temellerinin irdelenmesi, bu parametrelerin birleşme kalitesine olan etkilerinin araştırılması adına, Branson® Ultraseam-20 markalı, 20 kHz'lik mekanik titreşim frekansına sahip ultrasonik birleştirme cihazı kullanılarak 200 µm kalınlığında 8006 serisi ince alüminyum folyoların, 1 mm kalınlığında 5754 serisi alüminyum ana plakalara, ultrasonik birleştirme metodu ile katmanlı bir şekilde birleştirilmesine yönelik deney düzeneği tasarımı, üretimi, ultrasonik birleştirme deneyleri, soyma testleri ve bağlantı arayüzü inceleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Ultrasonik birleştirme sırasında, folyoların katmanlı bir şekilde birleştirilebilmesi için, katmanlı imalat sırasında farklı yükseklikler oluşacağı için +/- Z ekseninde hareket edebilen bir tabla üretilmiştir. Lineer ve sürekli birleştirme yapılabilmesi için, sonotrodun altında +/- X ekseninde hareket edebilen, düşük sürtünmeli bir tabla tasarlanıp üretilmiştir. Ultrasonik birleştirme sırasında folyoların düzgün bir şekilde hizalanıp sonotrod altından kaymasının ve folyoların kırışmasının engellenmesi için bir folyo besleme sistemi tasarlanıp üretilmiştir. Birleştirme deneylerinin 200 µm kalınlığındaki alüminyum folyolarla yapılmasının uygun olduğu tespit edilmiş, deneyler için temel ultrasonik birleştirme parametre aralıklarının statik yükleme için 30-50 kg, genlik için 45-55 µm, kaynak hızı için ise 4-10 rpm değerlerinde uygun olacağı tespit edilmiştir.

Minitab®'de Response Surface Method / Box-Behnken Design kullanılarak bir deney tasarımı yapılmış ve belirlenen parametre aralıkları dahilinde 15 adet ultrasonik birleştirme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden 11'i başarılı, 4'ü başarısız olmuştur. Ultrasonik birleştirme sırasında çizdirilen canlı statik yükleme grafiklerinden, 30 kg'lık statik yüklemenin 200 µm kalınlığındaki alüminyum folyoyu ezmek için yetersiz olduğu tespit edilmiştir. 30 kg'lık statik yüklemelerde, ultrasonik enerji girişi yeterli seviyede olmadığından, 4 adet 30 kg'lık statik yükleme değişkeni içeren deneylerin 3'ü başarısız olmuştur. Aynı şekilde genliğin düşük, kaynak hızının yüksek olması, ultrasonik enerji girişini ciddi şekilde zayıflattığından 7 numaralı deney setiyle yapılan birleştirme de başarısız olmuştur. Ultrasonik birleştirme sırasında, folyolara uygulanan yüksek frekanslı mekanik titreşimler, folyoların kaynak olmayan bölgelerini deforme ettiğinden, soyma testi

sonucunda tüm numuneler benzer ayrılma davranışı göstermiştir ve sonotrodun folyoya temas ettiği alanın kenarları boyunca benzer deformasyon bölgelerinin oluştuğu tespit edilmiştir. En yüksek soyma testi sonucu 185 N olmak üzere, bu değer 55 µm genlik, 40 kg statik yükleme ve 10 rpm'lik kaynak hızı değerlerinde elde edilmiştir. Minitab®'de çizdirilen grafiklerden, artan genlik ve statik yükleme değerleri ile azalan kaynak hızı sonucunda, ultrasonik birleşme kalitesinin de arttığı ancak, literatürde “threshold phenomenon” olarak bilinen ve bu parametrelerin belirli değerlerinden sonra, aşırı ultrasonik enerjiye maruziyet dolayısıyla, ultrasonik birleşme ile oluşan metalürjik bağların deforme olduğu için, ultrasonik birleşme kalitesinin de düşme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Statik yükleme ve genlik grafiklerinin eğrilerinden hareketle, çok az bir farkla, statik yüklemenin birleşme kalitesine olan etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Oluşturulan numunelerin bağlantı arayüzlerindeki birleşme hataları incelenerek, literatürde yer alan birleşme arayüzü hata tipleriyle benzer sonuçlar elde edilmiştir. SEM ile alınan görüntülerde, kaynak hattı boyunca oluşmuş boşluklar ve kaynak hattı uzunluğu değerleri belirlenerek, lineer kaynak yoğunluğunun %90,6 olduğu hesaplanmıştır.

İleriki çalışmalarda bu deney düzeneğinin geliştirilmesine yönelik olarak; hizalama, folyo besleme, statik yükleme ayarı şeklinde manuel olarak gerçekleştirilen işlemlerin otomasyonu, kayar tablanın sabit olup sonotrodun lineer hareket yapmasının sağlanması gibi, deney sonuçlarının tekrarlanabilirlik seviyelerini arttıracak çalışmalar yapılabilir. Sonotrodun yüzey yapısı, mikroskopla yapılan incelemelerde de görüldüğü üzere, arayüzlerde oluşan boşluklara, dolayısıyla birleşme kalitesine doğrudan etki ettiğinden, kullanılacak sonotrodun yüzey pürüzlülüğün azaltılması ve bu değişikliğin sonucundan etkilenecek diğer ultrasonik birleştirme parametrelerinin optimizasyonu ile %100 seviyelerinde lineer kaynak yoğunluğuna sahip ve daha iyi birleşmiş numuneler rahatlıkla üretilir. Sırasıyla ana metal, ince folyo, daha kalın bir folyo, ince folyo, daha kalın bir folyo birleştirilecek şekilde bir ultrasonik birleşme konfigürasyonu çalışılarak, ince folyonun metalürjik bağ kurması daha kolay olacağından daha kısa sürede daha kalın malzemeler elde edilebilir.

Optimum birleşme parametreleriyle gelecekte yapılacak çalışmalarla belirli bir standart yakalandıktan sonra, bu çalışmanın yapılması hususunda motivasyon kaynağı olan “dalga kılavuzu, anten vb. radar komponentlerinin, alışılmamış eklemeli imalat yöntemleri ile üretimi mümkün olabilir mi” sorusunun cevabı evet olacaktır...

KAYNAKLAR

1. Kong C. Y., Soar R. C., Dickens P. M. (2004). Optimum process parameters for ultrasonic consolidation of 3003 aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, 146 (2), 181–187.
2. Kulakov M., Rack H. J. (2009). Control of 3003-H18 Aluminum Ultrasonic Consolidation. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 131(2), 150-162.
3. Janaki Ram G. D., Yang Y., Stucker B. E. (2006). Effect of Process Parameters on Bond Formation During Ultrasonic Consolidation of Aluminum Alloy 3003. *Journal of Manufacturing Systems*, 25(3), 221-238.
4. Kong C. Y., Soar R. C., Dickens P. M. (2003). Characterisation of aluminium alloy 6061 for the ultrasonic consolidation process. *Materials Science and Engineering*, 363(1-2), 99–106.
5. Li D., Soar R. (2008). Influence of sonotrode texture on the performance of an ultrasonic consolidation machine and the interfacial bond strength. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(4), 1627-1634.
6. İnternet: Baknor Thermal Management, Heat Sinks, Liquid Cold Plates & More. Web: <https://www.baknorthermal.com/vacuum-brazed-welded-liquid-cold-plate-to-dissipate-heat-from-power-electronics/>, Son Erişim Tarihi: 17.12.2022.
7. İnternet: Vacuum Brazed Liquid Cold Plate Supplier: Lori Vacuum Brazed Cold Plate. Web: <https://www.lorithermal.com/vacuum-brazed-liquid-cold-plate-from-lori-1>, Son Erişim Tarihi: 17.12.2022
8. İnternet: What are RF waveguides? Part 1: context and principles, Web: <https://www.analogictips.com/what-are-rf-waveguides-part-1-context-and-principles/>, Son Erişim Tarihi: 17.12.2022
9. Kong C. Y., Soar R.C., Dickens P.M. (2004). A model for weld strength in ultrasonically consolidated components. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 219(1), 83–91.
10. Rozenberg L. D., (Editör). (1971). *Physical Principles of Ultrasonic Technology*, New York-London: Plenum Press, 44-101.
11. O'Brien R. L., (Editör). (1991). *Welding Handbook*, Miami: American Welding Society, 302-352.
12. Gilbert J. (2009). *Dynamics of Ultrasonic Consolidation*, Doktora Tezi, Clemson University, Clemson, 8-35.
13. Fujii H. T., Shimizu S., Sato S. Y., Kokawa H. (2016). High-strain-rate deformation in ultrasonic additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 135, 125-129.
14. Gupta K., Davim J. P., (Editörler). (2021). *Handbooks in Advanced Manufacturing, Advanced Welding and Deforming*, Oxford: Elsevier, 215-240.

15. Askeland D. R., Fulay P. P., Wright W. J. (2010). *The Science and Engineering of materials* (Sixth edition). Stamford: Cengage Learning, 123-138.
16. Fletcher M. J., (1972). *Friction Welding*. New York: Harlequin Mills & Boon, 107-140.
17. Langenecker B. (1966). Effect of ultrasound on deformation characteristics of metals. *IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics*, 13(1), 1-8.
18. Culp D. R., Gencsoy H. T., (1973). *Metal deformation with ultrasound*. Ultrasonics Symposium, 195–198.
19. Sahoo A. (2015). *Study On Ultrasonic Welding Of Aluminium Sheets*. Lisans Tezi, National Institute of Technology, Rourkela, 10-18.
20. Wagner G., Balle F., Eifler D. (2012). Ultrasonic Welding of Hybrid Joints. *The Journal of the Minerals*, 64, 401-406.
21. İnternet: Ultrasonic Resonators. Web: https://www.ultrasonic-resonators.org/applications/ultrasonic_metal_welding/metal_welding.html#seam_welding, Son Erişim Tarihi: 17.12.2022
22. Graff K., Short M., Nolfolk M. (2010). *Very high power ultrasonic additive manufacturing for advanced materials*. Paper presented in 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium- An Additive Manufacturing Conference, Austin, TX.
23. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. (Editörler). (2010). *Additive Manufacturing Technologies*. London: Springer, 140-160.
24. Yadev S., Doumandis C. (2002). Ultrasonic rapid manufacturing: Implementation and thermo-mechanical analysis. *American Society of Mechanical Engineers*, 2, 515–521.
25. İnternet: Why Ultrasonic Welding. Web: <https://www.soniclayerx.com/why-ultrasonic-welding/>, Son Erişim Tarihi: 17.12.2022
26. White D., R. (2003). Ultrasonic consolidation of aluminum tooling. *Advanced Materials and Processes*, 64(2), 2.
27. Tsujino T., Ueoka T., Kashino T., Sugahara F. (2000). Transverse and torsional complex vibration systems for ultrasonic. *Ultrasonics*, 38, 67–71.
28. İnternet: Applications. Web: <https://fabrisonic.com/applications/>, Son Erişim Tarihi: 17.12.2022
29. İnternet: Metal Seam Welder – Emerson. Web: <https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-ultraseam-20-metal-seam-welder-branson-en-us-164756.pdf>, Son Erişim Tarihi: 17.12.2022

30. İnternet: Branson Ultrasonic Metal Welding Systems Web: <https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-branson-ultrasonic-metal-welding-systems-en-8189336.pdf>, Son Erişim Tarihi: 17.12.2022
31. Am Tech (1998). *Ultraseam-20 User Manual*. 52-68.
32. Janaki Ram G. D., Yang Y., Stucker B. E. (2021). Effect of processing parameters on bond properties and microstructure evolution in ultrasonic additive manufacturing (UAM). *Materials Research Express*, 8(3), 221-233.

EKLER

EK-1. Matlab Kodu

```

instrreset
close all
clear all
fclose all
s=serial('COM5','BaudRate',115200,'Parity','none','Databits',8,'InputBufferSize',62);
fopen(s);
tmax=60;
t=0;
cnt=1;
Data=zeros(301,4);
fwrite(s,['1T','char']);
fwrite(s,['2T','char']);
fwrite(s,['3T','char']);
fwrite(s,['4T','char']);
%
h=plot([0:300],zeros(1,301),[0:300],zeros(1,301),[0:300],zeros(1,301),[0:300],zeros(1,301)
);
h=plot([0:300],zeros(1,301));
while t<tmax
    tic
    X=fscanf(s,'%c');
    X1=X(5:16);
    u='0';
    k=0;
    while strcmp(u,'0')
        u=X1(1);
        X1=X1(2:end);
        k=k+1;
    end
    X1=str2num([u X1])/(10^(8));

    X2=X(20:31);

    u='0';
    k=0;
    while strcmp(u,'0')
        u=X2(1);
        X2=X2(2:end);
        k=k+1;
    end
    X2=str2num([u X2])/(10^(8));

    X3=X(35:46);

    u='0';
    k=0;
    while strcmp(u,'0')

```

EK-1. (devamı) Matlab Kodu

```

    u=X3(1);
    X3=X3(2:end);
    k=k+1;
end
X3=str2num([u X3])/(10^(8));

X4=X(50:61);

u='0';
k=0;
while strcmp(u,'0')
    u=X4(1);
    X4=X4(2:end);
    k=k+1;
end
X4=str2num([u X4])/(10^(8));

t=t+0.1;
Data(cnt,:)= [X1 X2 X3 X4];
set(h,'XData',1:cnt,'YData',sum(Data(1:cnt,:),2))
% set(h(1),'XData',1:cnt,'YData',Data(1:cnt,1))
% set(h(2),'XData',1:cnt,'YData',Data(1:cnt,2))
% set(h(3),'XData',1:cnt,'YData',Data(1:cnt,3))
% set(h(4),'XData',1:cnt,'YData',Data(1:cnt,4))
drawnow

hold on;
%legend('1','2','3','4');

cnt=cnt+1;
% pause(0.083);
pause(0.005);
%drawnow
% toc

end

instrreset

```

EK-2. Parametre Aralığı Belirleme Çalışmasının Kalitatif Sonuçları

DENEY NO	GENLİK (μm)	STATİK YÜKLEME (kg)	ZAMAN (s)	SONUÇ
1	10	8	~1	HİÇ TUTMADI.
2	20	8	~1	HİÇ TUTMADI.
3	30	8	~1	ÇOK AZ TUTUP KOPTU.
4	40	8	~1	ÇOK AZ TUTUP KOPTU.
5	50	8	~1	FOLYO HORN A YAPIŞTI.
6	60	8	~1	FOLYO HORN A YAPIŞTI.
7	10	12	~1	HİÇ TUTMADI.
8	20	12	~1	TUTTU, ÇEKİNCE KOPTU.
9	30	12	~1	TUTTU, ÇEKİNCE KOPTU.
10	40	12	~1	FOLYO HORN A YAPIŞTI.
11	50	12	~1	FOLYO HORN A YAPIŞTI.
12	10	20	~1	ÇOK AZ TUTTU.
13	20	20	~1	TUTTU, ÇEKİNCE FOLYO YIRTILDI.
14	30	20	~1	TUTTU, ÇEKİNCE FOLYO YIRTILDI.
15	40	20	~1	TUTTU AMA FOLYO ÇOK AŞINDI.
16	50	20	~1	TUTTU AMA FOLYO ÇOK AŞINDI.
17	10	25	~1	ÇOK AZ TUTTU.
18	20	25	~1	TUTTU, ÇEKİNCE AYRILDI.
19	30	25	~1	TUTTU, ÇEKİNCE AYRILDI.
20	40	25	~1	TUTTU, ÇEKİNCE AYRILDI.
22	10	30	~1	AZ TUTUP KOPTU.
23	20	30	~1	TUTTU, ÇEKİNCE KOPTU.
24	30	30	~1	TUTTU, ÇEKİNCE YIRTILDI.
25	40	30	~1	TUTTU, ÇEKİNCE YIRTILDI.
26	50	30	~1	TUTTU, ÇEKİNCE YIRTILDI.
27	10	35	~1	ÇOK AZ TUTTU.
28	20	35	~1	ÇOK AZ TUTTU.
29	10	35	~1	ÇOK AZ TUTTU.
30	20	35	~1	ÇOK AZ TUTTU, DEFORMASYON BAŞLADI.
31	30	35	~1	TUTTU, DEFORMASYON ARTTI.
32	40	35	~1	TUTTU, DEFORMASYON ÇOK ARTTI.
33	10	40	~1	HİÇ TUTMADI.
34	10	40	~1	HİÇ TUTMADI.
35	20	40	~1	TUTTU, ÇEKİNCE AYRILDI.
36	30	40	~1	TUTTU, ÇEKİNCE AYRILDI, DEFORMASYON BAŞLADI.
37	10	45	~1	HİÇ TUTMADI.
38	20	45	~1	AZ TUTUP AYRILDI.
39	30	45	~1	TUTTU AMA DEFORMASYON BAŞLADI.



Gazili olmak ayrıcalıktır