



**ULTRASONİK DESTEKLİ EKLEMELİ İMALATTA KÜTLE BİRİKİMİ
İLE DEĞİŞEN TİTREŞİM KARAKTERİSTİĞİNİN KATILAŞMA
SÜRECİNE VE METALÜRJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Muhammed Enes GEBEL

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2025

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.

Muhammed Enes GEBEL

16/07/2025

ULTRASONİK DESTEKLİ EKLEMELİ İMALATTA KÜTLE BİRİKİMİ İLE DEĞİŞEN
TİTREŞİM KARAKTERİSTİĞİNİN KATILAŞMA SÜRECİNE VE METALÜRJİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ
(Doktora Tezi)

Muhammed Enes GEBEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2025

ÖZET

Eklemeli imalat, geometri verisine göre malzemelerin direkt olarak son ürünün yahut son ürüne yakın geometrilerin üretildiği yöntem olarak malzeme sarfiyatını azaltır. Metal malzemelerin eklemeli imalat ile üretilmesinde vadedilen avantajların yanı sıra mikroyapısal düzensizlikler, gözeneklilik, yüksek termal gerilmeler ve mekanik özelliklerde anizotropi gibi sorunlar sıklıkla gözlemlenmektedir. Bu sorunların en aza indirilmesi ile alakalı yöntemlerden biri de ergiyik havuzda akustik akış ve kavitasyon oluşturarak katılaşmaya etki eden ultrasonik enerjinin uygulanmasıdır. Üretimin çoğu zaman açık atmosferde yapılması sebebiyle WAAM uygulamalarında yaygınlaşmış olan ultrasonik titreşim desteği, tablaya yahut direkt olarak iş parçasının kendisine titreşim dalgalarının iletilmesiyle icra edilir. Bununla birlikte, eklemeli imalatta üretim boyunca parçanın hem kütlesi hem de geometrisi değişmektedir. Kütle ve geometrideki bu değişim, sistemin doğal frekans noktalarını dolayısı ile titreşim davranışını değiştirmektedir. Bu çalışmada titreşimin üretilmesinden ergiyik havuza iletilmesine kadar olan süreç ele alınarak eklemeli imalatta kütle ve geometri değişiminin titreşim davranışını nasıl etkilediği irdelenmiştir. Çalışmalar sayısal ve deneysel olarak ele alınmış, sonuçlar karşılaştırılarak tartışılmıştır. Nokta ile yığılma metoduyla yığılan parçaların ultrasonik titreşim desteği ile üretilmesi sırasında sabit ultrasonik güç kullanılmasına rağmen ergiyik havuzda elde edilen enerjinin kütle ve geometri değişiminden etkilendiği, ergiyik havuzda elde edilen enerjinin 400 kata kadar değiştiği sayısal çalışmalar ile gözlenmiştir. Yapılan deneylerde ortalama tane boyutunun ultrasoniksiz yığılan numunede 350 μm 'den daha fazla iken, ultrasonik desteği ile üretilen numunede ergiyik havuzda elde edilen ultrasonik enerji seviyesi ile orantılı olarak 73 μm ile 127 μm arasında değiştiği görülmüştür. Ultrasonik titreşim ile yığılan numunede kimi bölgelerde iyileşme olurken, rezonans bölgelerinde içyapıda önemli kusurların olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, ultrasonik titreşimin proses boyunca sabit bir parametre olarak ele alınamayacağını, parçanın değişen titreşim özelliklerine duyarlı adaptif bir şekilde kontrol edilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymuştur.

Bilim Kodu : 91448
Anahtar Kelimeler : Adaptif ultrasonik titreşim, WAAM, eklemeli imalat
Sayfa Adedi : 107
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

THE EFFECT OF VIBRATION CHARACTERISTICS CHANGING WITH MASS
ACCUMULATION ON THE SOLIDIFICATION PROCESS AND METALLURGICAL
PROPERTIES IN ULTRASONICALLY ASSISTED ADDITIVE MANUFACTURING

(Ph. D. Thesis)

Muhammed Enes GEBEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

Additive manufacturing produce directly the final product or near net shape geometries based on geometric data and reduces material consumption. In addition to the promised advantages metal additive manufacturing, issues such as microstructural irregularities, porosity, high thermal stresses and anisotropy are frequently observed. One of the methods related to minimizing these problems is the application of ultrasonic energy, which affects solidification by generating acoustic streaming and cavitation in the melt pool. Due to the fact that production is often carried out in open atmosphere, ultrasonic vibration support, which has become widespread in WAAM applications, is implemented by transmitting vibration waves to the base plate or directly to the part itself. However, during the additive manufacturing process, both the mass and geometry of the part change. These changes in mass and geometry alter the natural frequency points of the system and therefore its vibrational behavior. In this study, the process from the generation of vibration to its transmission to the melt pool was addressed, and how mass and geometry changes affect vibrational behavior in additive manufacturing was examined. The study was carried out both numerically and experimentally, and the results were compared and discussed. Despite using constant ultrasonic power during the production of parts built with the dot by dot deposition method, numerical studies showed that the energy obtained in the melt pool was affected by changes in mass and geometry, and the energy obtained in the melt pool varied up to 400 times. In the experiments, while the average grain size was more than 350 μm in the sample built without ultrasonic support, it was observed to vary between 73 μm and 127 μm in the sample produced with ultrasonic support, depending on the level of ultrasonic energy obtained in the melt pool. While improvements were observed in some regions of the sample built with ultrasonic vibration, significant internal defects were detected in the resonance regions. This study clearly revealed that ultrasonic vibration cannot be considered a constant parameter throughout the process and must be controlled adaptively in response to the changing vibrational characteristics of the part.

Science Code : 91448

Key Words : Adaptive ultrasonic energy assistance, WAAM, additive manufacturing

Page Number : 107

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamda desteğini ortaya koyan danışmanın Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a, değerli yönlendirmeleri ile jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Rami ÜNAL ve Prof. Dr. Ulaş YAMAN'a, ele alınan sayısal ve analitik çalışmalarda desteği için Prof. Dr. Serkan TOROS'a, sanayi danışmanın ve malzeme bilimi alanında destek olan Prof. Dr. Erdal ÇELİK'e , Analitik çalışmalarda desteğini esirgemeyen çalışma arkadaşım Safa DUMANLI bey'e doktora boyunca yol arkadaşılar olan doktora süreçlerimi eğlenceli ve keyifli hale getiren AMTRG grubuna saygılarımla teşekkürü borç bilirim. Tez çalışmamın TUSAŞ BAP ile desteklenmesinden dolayı çalıştığım kurumum Türk Havacılık ve Uzay Sanayi'ne, 2244 projesi ile desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Ayrıca yol arkadaşım, tüm bu süreçte yaptığı unutulmaz fedakarlıkları için rabbimin emaneti ve ikramı eşim Şeyma GEBEL'e , her müşkilimin kolaylaştırıcıları, her darımı genişleten dert ortaklarım abilerim Cem GEBEL'e, Celalettin GEBEL'e ve Abbas Sefa GEBEL'e, hayatım boyunca her kararımda arkamda duran ve gölgesi kale gibi olan babam Şaban GEBEL'e, duaları ile dünyamı güzelleştiren gölgesi cennet kadar serin annem Öznur GEBEL'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR.....	5
2.1. Ergiyik Havuzun Elde Edilmesi	10
2.2. Ultrasonik Enerjinin Elde Edilmesi.....	10
2.3. Akustik Akış.....	11
2.4. Ultrasonik Enerjinin Penetrasyon Üzerindeki Etkisi	12
2.5. Kavitasyon.....	12
2.6. Ultrasonik Enerjinin Tane Oluşumu ve Yönelimi Üzerindeki Etkisi	15
2.7. Ultrasonik Enerjinin Gözeneklilik Üzerinde Etkisi	20
2.8. Ultrasonik Enerjinin Katılaşmada Aşırı Soğuma Etkisi.....	22
2.9. Ultrasonik Enerjinin Mikroyapıya Etkisi	23
2.10. Ultrasonik Enerjinin Mekanik Özelliklere Etkisi.....	26
2.11. Uygulama Örnekleri	30
2.12. Titreşimin Üretilmesi ve Aktarılması	32
3. MALZEME ve YÖNTEM	39
3.1. Deneysel Çalışmalar.....	39
3.2. Deney Düzenegi	39

	Sayfa
3.2.1. Yığılma ve titreşime dair proses parametreleri	40
3.2.2. Malzeme	41
3.3. Analitik ve Sayısal Model	42
3.4. Mikroyapı Analizleri	47
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	49
4.1. Analitik ve Sayısal Çalışmalar	49
4.1.1. Analitik çalışmaya ait sonuçlar	49
4.1.2. Farklı yüksekliklerde elde edilen zamana bağlı hız değerleri	50
4.1.3. Titreşim karakteristiği	61
4.1.4. Yükseklik boyunca enerji seviyeleri	62
4.2. Deneysel Çalışmalar	64
4.2.1. Katman yüksekliği	65
4.2.2. Katılma formu	73
4.2.3. Mikroyapı	75
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. ER308LSi malzemesinin kompozisyonu.....	41
Çizelge 4.1. Ultrasonik güç kullanılmadan yığılan numunede katman yükseklikleri ...	67
Çizelge 4.2. 50 W ultrasonik güç ile yığılan numunede katman yükseklikleri	68
Çizelge 4.3. 75 W ultrasonik güç ile yığılan numunede katman yükseklikleri	69
Çizelge 4.4. 100 W ultrasonik güç ile yığılan numunede katman yükseklikleri	70



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri	5
Şekil 2.2. DED yöntemlerinin sınıflandırılması	6
Şekil 2.3. Kaynaklı ve eklemeli imalatta ultrasonik titreşim desteği hakkında yapılan yayın sayılarının yıllara göre dağılımı.....	9
Şekil 2.4. Yazarlar tarafından kullanılan anahtar kelimelerin yıllara göre dağılımı.....	10
Şekil 2.5. Kavitasyon oluşum senaryoları.....	14
Şekil 2.6. Kavitasyon oluşumunun izlendiği düzeneğin şematik gösterimi	15
Şekil 2.7. Ultrasonik titreşimin mikroyapıya etkisi	16
Şekil 2.8. Kaynak Bölgesinin optik mikroskop görüntüsü a) olağan durum, b)ultrasonik enerjili	17
Şekil 2.9. Ultrasonik enerjinin tane büyüklüğüne etkisi	18
Şekil 2.10. Tane büyüklüğü değerleri	19
Şekil 2.11. Tane büyüklüğü dağılımı ve eş eksenlilik karşılaştırılması.....	19
Şekil 2.12. Farklı frekanslarda ultrasonik enerjinin tane büyüklüğüne etkisi.....	20
Şekil 2.13. Inconel 626 için ultrasonik enerjinin tane yönelimine ve tane küçülmesine etkisi.....	20
Şekil 2.14. Ultrasonik titreşimin kaynak şeklinde ve porozite miktarına etkisi	21
Şekil 2.15. Numunelerde porozite durumu, ultrasonik enerji (a)uygulanmayan, (b)uygulanan	22
Şekil 2.16. Titreşime bağlı porozite dağılımı.....	22
Şekil 2.17. WAAM ile üretilmiş duvar numunede farklı yüksekliklerde elde edilen mikroyapı oluşumunun şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.18. 308L malzemesi ile yığılan duvar numunede elde edilen mikroyapılar; a)son katman, b) Orta katman, c) ilk katman	25
Şekil 2.19. Farklı ilerleme hızları ile yığılan numuneler, a) 0.24 m/dk, b)0.42 m/dk ...	25
Şekil 2.20. Ultrasonik titreşimin farklı enerji seviyelerinde mikroyapıya etkisi a)0W, b)400W, c) 800W, d)1000W.....	26
Şekil 2.21. 20 kHz titreşim enerjisine dair çekme test sonuçları	26

Şekil	Sayfa
Şekil 2.22. Ti6Al4V parçada elde edilen iyileşme ve diğer yöntemlerle kıyaslanması	27
Şekil 2.23. Al-Mg alaşımında titreşimin etkisi	28
Şekil 2.24. Alüminyum malzeme için yüzeyde ve içeri doğru elde edilen sertlik değerleri	28
Şekil 2.25. Inconel 718 için ultrasonik enerjinin aşınma direncine etkisi	29
Şekil 2.26. Ultrasonik titreşimin ergiyik havuz içerisinde oluşturduğu etkilerin birbirleri ile ilişkisi.....	29
Şekil 2.27. Ultrasonik destekli ve ultrasonik destekli olmayan ergitme havuzunun dinamikleri arasındaki farkın şematik görünümü	30
Şekil 2.28. Tablanın titreştirilmesine bir örnek	31
Şekil 2.29. İş parçasının titreştirilmesine bir örnek	31
Şekil 2.30. Toz püskürtme prosesinde tabla titreşimi	32
Şekil 3.1. Deneysel çalışmanın şematik ve gerçek gösterimi a) bileşenler , b) yığma süreci, horn ve sabitleyici.....	40
Şekil 3.2. 308L malzemesi için a)Schaeffler diyagramı ve b) faz diyagramı.....	42
Şekil 3.3. Sistemin analitik model kurgusu	43
Şekil 3.4. Titreşimin ilerleyişi ve kritik bölge	44
Şekil 3.5. Analiz modeli.....	46
Şekil 3.6. EBSD analizi yapılan bölgeler ve isimlendirmeleri	48
Şekil 4.1. 5 numaralı düğüm noktası için elde edilen zamana bağlı sonuçlar	50
Şekil 4.2. Zamana bağlı doğal frekans değişimi	50
Şekil 4.3. 2,5 mm yüksekliğinde (1.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	51
Şekil 4.4. 11,5 mm yüksekliğinde (7.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	52
Şekil 4.5. 17,5 mm yüksekliğinde (11.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	53
Şekil 4.6. 25 mm yüksekliğinde (16.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	53
Şekil 4.7. 29,5 mm yüksekliğinde (19.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	54
Şekil 4.8. 31mm yüksekliğinde (20.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	55
Şekil 4.9. 32,5 mm yüksekliğinde (21.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	55

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. 34 mm yüksekliğinde (22.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	56
Şekil 4.11. 35,5 mm yüksekliğinde (23.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	56
Şekil 4.12. 37 mm yüksekliğinde (24.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	57
Şekil 4.13. 38,5 mm yüksekliğinde (25.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	57
Şekil 4.14. 40 mm yüksekliğinde (26.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	58
Şekil 4.15. 41,5 mm yüksekliğinde (27.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	58
Şekil 4.16. 53,5 mm yüksekliğinde (35.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	59
Şekil 4.17. 65,5 mm yüksekliğinde (43.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	59
Şekil 4.18. 67,5 mm yüksekliğinde (51.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	59
Şekil 4.19. 89,5 mm yüksekliğinde (59.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	60
Şekil 4.20. 102 mm yüksekliğinde (67.katman) zamana bağlı hız değerleri.....	60
Şekil 4.21. Modülasyon (Genlik) zarfı ve periyodunun şematik gösterimi.....	61
Şekil 4.22. Sayısal analizlere göre her bir katman yüksekliğinde elde edilen maksimum hız değerleri.....	63
Şekil 4.23. Doğal frekans noktalarının yüksekliğe göre değişimi	64
Şekil 4.24. Farklı ultrasonik güç desteği ile yığılan iş parçalarının katmanlar boyunca parça yükseklikleri	71
Şekil 4.25. 50W için sayısal sonuçlara göre katmanlarda elde edilen enerji miktarı (yeşil), ve ilgili katmanda elde edilen katman yüksekliğinin (mavi) kıyaslanması.....	73
Şekil 4.26. 50W ultrasonik destek ile yığılan numunede farklı katmanlarda katılma formları a) 24.katman, b) 31.katman, c) 52.katman, d) 64.katman.....	74
Şekil 4.27. Rezonans koşulunda yığma sürecinde oluşan saçıntı (solda) ve düşük ultrasonik enerjiye sahip yığma (sağda).....	75
Şekil 4.28. Ultrasonik destek olmadan üretilen numunenin farklı noktalarında elde edilen IPF haritaları.....	78
Şekil 4.29. 50 W ultrasonik destek ile üretilen numunenin farklı yüksekliklerde mikroyapısına dair IPF haritaları	83
Şekil 4.30. Farklı yükseklikler için soğuma hızı ve ultrasonik enerjiye bağlı olarak elde edilen tane büyüklükleri	86

Şekil	Sayfa
Şekil 4.31. 50 W ultrasonik destek ile üretilen numunenin farklı yüksekliklerinde elde edilen tane açısı değerleri	88
Şekil 4.32. 50 W ultrasonik güç ile desteklenen numunede farklı katmanlarda elde edilen mikroyapı analizlerinde fazların dağılımı	90
Şekil 4.33. 50W ultrasonik güç ile yığılan numunede EBSD analizi yapılan yüksekliklerde elde edilen östenit fazına dair oranlar	91
Şekil 4.34. Optik mikroskop görüntüleri; a) düşük ultrasonik enerji altında katılan bölge ve b) yüksek ultrasonik enerji altında katılan bölge	92
Şekil 4.35. N1 (solda) ve U1 (sağda) noktalarına ait KAM haritaları	93
Şekil 4.36. 50W ultrasonik destekli numunede rezonans bölgesinde oluşan iç yapı kusurları; çatlak (mavi), porozite (kırmızı), delaminasyon (sarı)	94

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

Hz

Hertz

cm²

Santimetrekare

Kısaltmalar

Açıklamalar

CMT

Soğuk Metal Transfer

DbD

Nokta ile Yığma

DED

Yönlendirilmiş Enerji Yığma

Eİ

Eklemeli İmalat

FSI

Katı Sıvı Arayüzü

MIG

Metal İnert Gaz

MAG

Metal Aktif Gaz

TIG

Tungsten İnert Gaz

WAAM

Tel Ark Eklemeli İmalat

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, imalat süreçlerinde sunduğu benzersiz avantajlarla son yıllarda endüstri tarafından yatırım yapılan ve araştırmacılar tarafından popüler olarak ele alınan, önem verilen yenilikçi bir imalat metodudur. Eklemeli imalat temel olarak üretilmek istenen parçanın geometrisinin bilgisayar kontrollü olarak belirli bir takım yolu kullanılarak sürekli ve düzenli bir metodoloji ile eklemeye yapmak suretiyle üretilmesine dayanmaktadır[1]. Bu yöntemde metal, polimer, seramik ve kompozit malzemeler kullanılarak eklemeye işlemi gerçekleştirilir ve üretimler yapılır.

Polimer eklemeli imalat erişim, maliyet ve teknik açıdan idamesinin kolay olması sebebiyle yaygın etkisi yüksek olmuş, endüstriyel kuruluşlar, araştırma enstitülerinin yanı sıra ortaokul veya lise seviyesindeki okullar ve dahi hobi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Fonksiyonel isterleri düşük olan uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmakta iken, endüstriyel olarak kullanılabilirliği her geçen gün daha çok yaygınlaşmaktadır [2].

Bununla birlikte metal malzemeler, sunduğu üstün mekanik özellikler sebebiyle endüstrinin ilgi odağı olmuştur [3]. Üstün mekanik özellikler, eklemeli imalat yönteminin sunduğu karmaşık geometrilerin üretilmesine yönelik yetkinlikle buluşmuş, inovatif ve benzersiz uygulama örnekleri açığa çıkmıştır. Havacılık ve uzay endüstrisi başta olmak üzere yenilikçi alanlar[4], fonksiyonel geçişli malzemeler [5], katkılı malzemeler [6] birçok endüstride kullanılması için çalışmalar yürütülmüştür. Tasarım açısından latis yapılar [7] ve iç kanallara ve boşluklara[8] sahip yapılar termal yahut hafiflik isterleri açısından eklemeli imalatın öne çıkmasına sebebiyet veren önemli yetkinliklerdendir.

Metal eklemeli imalat endüstrisi iki önemli imalat metodu ile öne çıkmaktadır. Bunlardan biri toz yataklı üretim sistemleridir. Diğerisi ise yönlendirilmiş enerji yığılma yöntemleridir. Metal eklemeli imalat pazarının çok büyük bir bölümüne sahip olan bu iki üretim metodu ısı girdisi ile ısıtmayı temel prensip olarak alan yöntemlerdir. Bu yöntemlerle yığılma sırasında katmanlar boyunca tekrarlı ısıma soğuma döngüleri oluşur. ilgili katman öncelikle metalin sahip olduğu ergime sıcaklığının üstüne noktasal olarak çıkartılır. Akabinde ergimeye bağlı kütle aktarımı ve bütünleşme gerçekleşir. Katılma, ergime sıcaklığına erişim ile sağlanırken, çoğu durumda oda sıcaklığına yahut oda sıcaklığının belirli miktar üstüne metal malzeme hızlı bir şekilde soğur. Üst katmanların yığılması esnasında yığılan ısı, alt

katmanların üzerinden geçmek suretiyle sistemi terk eder. Bu ısı akıları her bir katmanın yığılmasında alt katmanlar üzerinde termal ardıl işlem etkisi oluşturur [9]. Yığılma esnasında var olan yüksek ısıma ve soğuma hızı, gözeneklilik, çatlak, iç gerilme ve çekmeler metal parçaların eklemeli imalat ile üretilmesinde sıklıkla karşılaşılan mikroyapı kusurlarıdır. Tanelerin büyük, kolonlu yapıda olması ve kristal diziliminin ısı gradyan yönündeki seçiciliği ise üretilen parçalarda anizotropi meydana getirmektedir [10].

Bu problemler, araştırmacılarca tespit edilmiş, oluşma sebeplerinin saptanması için birçok proje yürütülmüştür. Her bir kusurun oluşum sebebi ortaya konarak, yenilikçi prosesler, yardımcı prosesler, katkı malzemeleri, yenilikçi alaşımlar geliştirilmeye çalışılmıştır. Mekanik dövme, aktif soğutma, manyetik osilasyon, sıcak tel, geçiş sıcaklığı kontrolü, mikro-nano katılama, takım yolu optimizasyonu, ultrasonik titreşim gibi birçok yöntem yukarıda sayılan kusurların en aza indirilmesi için çalışılan başlıca alanlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ultrasonik titreşim, ergiyik havuzda ürettiği kavitasyon ve akustik akış fenomenleri sayesinde ergiyik havuzda meydana gelen akış ve katılma sürecini doğrudan etkileyen bir yardımcı prosestir. Ergiyik havuza uygulanan uygun ultrasonik enerjinin gözeneklilik, tane büyüklüğü, tane oluşumu ve formu, çatlaklar, tane yönelimi, çekme gibi problemlere önemli derecede iyileştirme getirdiği ve mekanik özelliklerde önemli ölçüde artış sağladığı araştırmacılarla ortaya konmuştur. Literatüre bakıldığında ultrasonik titreşimin, kaynak, döküm gibi metallerin katılma süreçlerinde kullanılan bir yardımcı proses olduğu bilinmektedir. Konvansiyonel yöntemlerde metallerin katılması sürecine etkisiyle kullanılıyor olması sebebiyle eklemeli imalat da araştırma alanları arasına girmiştir.

Ultrasonik titreşimin uygulanmasında iyileştirici etkilerin ortaya çıkması, uygun titreşim enerjisinin ergiyik havuzda elde edilmesine bağlıdır. Düşük titreşim enerjisinde arzulanan iyileştirmeler elde edilemezken, yüksek titreşim enerjisi ise ergiyik havuzun sürekliliğini bozmakta istenmeyen kusurlar açığa çıkarmaktadır. Ergiyik havuzda elde edilen ultrasonik enerjinin miktarı ise titreşimin ergiyik havuza girdiği katı-sıvı etkileşim arayüzünde elde edilmiş olan titreşimin frekans ve genlik değerine bağlıdır. Döküm gibi uygulamalar incelendiğinde titreşimin yeri, titreşimin üretildiği ve iletildiği sistem ve katı-sıvı etkileşim bölgesinin birçok uygulamada sabit olduğu görülmektedir. Buna nazaran eklemeli imalat ve kaynak uygulamalarında iki önemli değişken katı-sıvı etkileşim bölgesinde elde edilecek

olan titreşimin büyüklüğünü ve karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Eklemeli imalatla kütlenin sürekli artması ve kütle artışının yanı sıra geometrinin de üretilmek istenen ürüne göre yığılma boyunca farklı yönlerde değişmesi, kütle ve geometriye doğrudan bağlı olan titreşim mekanizmasını, katı-sıvı etkileşim bölgesinde elde edilen titreşim büyüklüğünü ve buna bağlı enerjisini üretim boyunca değiştirmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, WAAM yönteminde yığılma sırasında kütle ile birlikte geometri değişiminin sisteme verilen titreşimin iletilmesi ve ergiyik havuzda elde edilmesi sürecini nasıl etkilediği tartışılmak, değişen titreşim karakteristiğinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi nedenleri ile birlikte ortaya koymaktır. Çalışmada sisteme verilen ultrasonik güç ile ergiyik havuzda elde edilen ultrasonik enerji arasındaki fark detaylı şekilde irdelenerek ortaya konmuştur. Sayısal çalışmalar COMSOL analiz programı kullanılarak ele alınmış, piezoseramik malzemeye gerilim uygulanmasından titreşimin ergiyik havuzun konumuna kadar nasıl ilerlediği, geometri ve konum değişiminin titreşimin karakteristiğini nasıl değiştirdiği irdelenmiştir. Deneysel çalışmalar paslanmaz çelik malzemenin nokta ile yığılması metoduyla ele alınmıştır. Üretim sırasında titreşim enerjisi uygulanmış, katmanlar boyunca değişen kütle ve geometrinin titreşim karakteristiğine ve mikroyapıya etkisi araştırılarak ortaya konmuştur. Sayısal ve deneysel çalışmalar karşılaştırılarak tartışılmış, elde edilen sonuçlar nedenleri ile birlikte ortaya konmuştur. Sonuç olarak sabit ultrasonik güç kullanılmasına rağmen kütle ve geometri değişiminin ergiyik havuzda elde edilen titreşim enerjisini önemli ölçüde etkilediği, buna bağlı yığılan parçada elde edilen özelliklerin de kararlı yapıda olmadığı, parçanın farklı bölgelerinde elde edilen ultrasonik enerji ile doğru orantılı olarak farklılıklar gösterdiği görülmüştür.

Tez çalışmasında aşağıda listelenmiş hedefler gerçekleştirilmiştir;

- Kütle ve geometri değişiminin sistemin titreşim davranışını nasıl etkilediğini ortaya koymak için analitik çalışmalar yapılmıştır,
- Analitik çalışma çıktıları değerlendirilerek, Sistem sayısal metotlarla modellenerek her bir katman için titreşimin karakteristiği elde edilmiştir,
- Katmanlar boyunca değişimin sayısal olarak ortaya konmuştur,
- Modellenen ve sayısal sonuçları olan sistem deneysel olarak gerçekleştirilmiştir,
- Deneysel çalışmada elde edilen numune detaylı mikroyapı analizlerine sokularak sonuçlar elde edilmiştir.

- Sayısal verilerin ışığında katmanlar boyunca mikroyapıdaki değişimin tartışılarak kütle ve geometri değişiminin mikroyapı üzerindeki etkisinin tartışılarak ortaya konmuştur.
- Sabit güç kullanımına rağmen değişen titreşim davranışı sonucunda üretilen parçanın özelliklerinde ortaya çıkan radikal farklılıklar tartışılarak, adaptif ultrasonik titreşim desteği önerisi literatüre kazandırılmıştır.

Tez kapsamında 2. bölümde çalışmaya dair literatür ortaya konmuş, 3.bölümde çalışmada kullanılan malzeme ve çalışmanın metodu anlatılmıştır. 4. bölümde ise analitik ve sayısal çalışmalara dair sonuçlar verilmiş, elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Akabinde deneysel çalışmalara dair sonuçlar verilmiş ve katmanlar boyunca değişim karşılaştırılarak tartışılmıştır. Sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tartışılmıştır. 5. bölümde ise sonuç ortaya konmuş, gelecekte ele alınabilecek çalışmalar belirtilmiştir.

2. LİTERATÜR

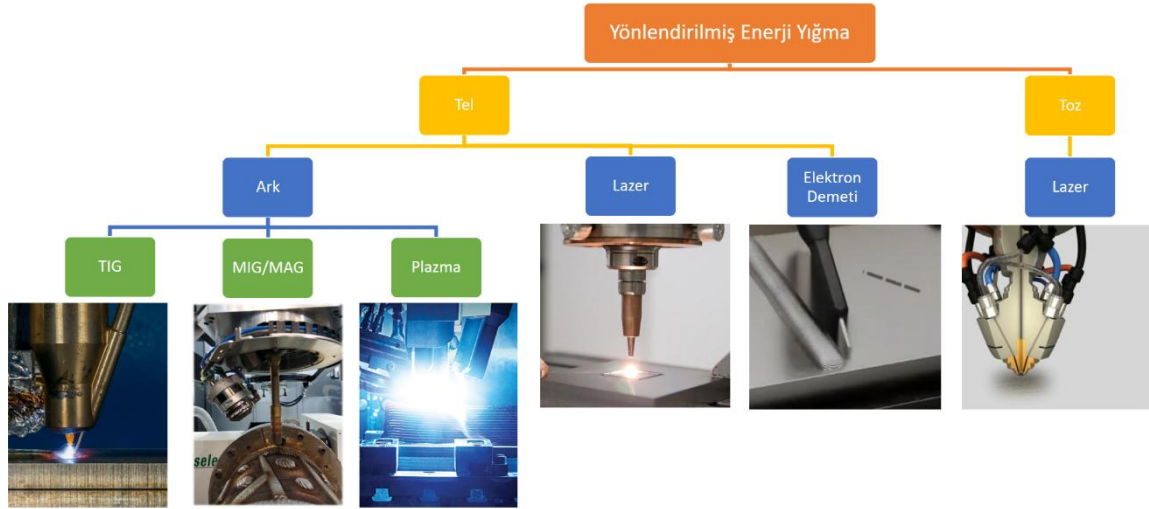
Gelişen teknoloji ile birlikte imalatta üretim yöntemleri genişlemektedir. Son yıllarda adından bahsettiren eklemeli imalat yöntemleri sunduğu tedarik sürelerinde kısalma, az sayıda üretimler için düşük maliyet [11], dijital dönüşüm, yüksek tekrarlanabilirlik, insandan bağımsız üretim [12] gibi birçok avantaj sayesinde yatırım yapılan yüksek önceliklendirilmiş teknoloji alanlarındandır. Çeşitli malzemelerin özelinde veya birbirleri ile kullanılarak endüstrinin ihtiyaçlarının karşılandığı eklemeli imalat yöntemleri, tasarım açısından da geleneksel imalat yöntemlerinin çok üstünde serbestlik sunmaktadır. Plastik, seramik, kompozit ve metal eklemeli imalat yöntemleri araştırmacılarca çalışılmaktadır. Eklemeli imalat metotları Malzeme Püskürtme, VAT Foto Polimerizasyonu, Bağlayıcı Püskürtme, Malzeme Ekstrüzyon, Toz Yatağı Füzyon, Sac Laminasyon ve Yönlendirilmiş Enerji Yığma başlıkları altında sınıflandırılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Metal eklemeli imalat yöntemleri içerisinde Toz Yataklı sistemler ve Yönlendirilmiş Enerji Yığma (DED; İng. Directed Energy Deposition) yöntemleri olmak üzere iki başlık pazar payı ve akademide araştırılması bakımından öne çıkmaktadır. ISO/ASTM 52943-2 [13]'ye göre DED kategorisinde sınıflandırılan Tel Beslemeli Ark Ergitmeli eklemeli imalat (WAAM; İng. Wire Arc Additive Manufacturing), ısı kaynağı olarak kullanılan elektrik arkı ile besleme stoğu malzemesi olarak kullanılan telin kombinasyonu olarak tanımlanır. WAAM, temelde MIG/MAG, Plazma, TIG gibi kaynak işlemlerine dayanmaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri içerisinde WAAM yüksek yığma oranına sahip olması, düşük

yatırım bütçeleri gerektirmesi sebebiyle maliyet etkinliği açısından öne çıkan yöntemdir [14]. DED yöntemleri sınıflandırması Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. DED yöntemlerinin sınıflandırılması

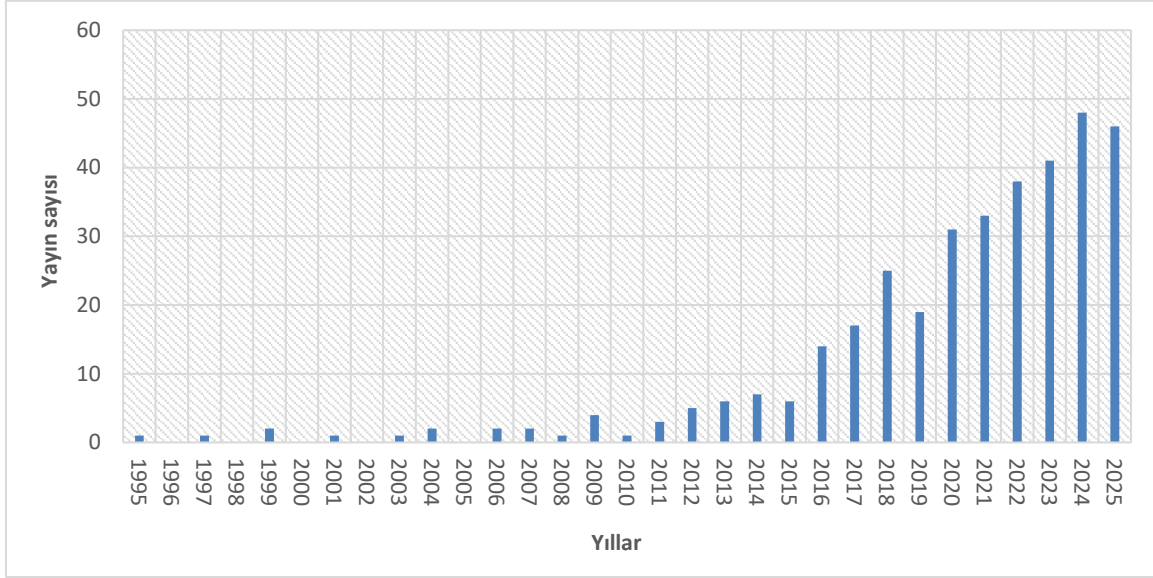
Endüstriyel bilgi birikiminin hali hazırda olmasına ve yatırım maliyetlerinin diğer yöntemlere nazaran daha düşük olmasına karşın nihai parça üretmek amaçlı eklemeli imalat yöntemi olarak kullanılmak istenildiğinde hala çözülmesi gereken konu başlıkları karşımıza çıkmaktadır. Bunlar yüksek ısı girdisi, çarpılma, gevreklik, porozite, tane büyüklüğü, tane yönelimi ve anizotropi olarak sıralanabilir [15]. WAAM sürecinde yığma gerçekleştirilirken sürekli bir ısıtma ve soğutma döngüsü meydana gelir. Bu termal döngüler sonucu ortaya çıkan farklılıklar, malzemenin mekanik özelliklerinde yerel değişikliklere neden olmaktadır. Özellikle tanelerin büyüklüğü ve dağılımı, malzemenin mukavemet, süneklik ve tokluk gibi mekanik performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu durum parça kalitesinde ve mekanik dayanımda tutarsızlıklar oluşturur. Yüksek ısı girdisi uygulanması ve ardından hızlı bir soğumanın olması, parça içerisinde kalıntı gerilmelerin oluşmasına yol açmaktadır. Oluşan bu kalıntı gerilmeler üretim esnasında veya sonrasında parçada çarpılmalara ve geometrik bozulmalara neden olabilir. Bu tür deformasyonlar, özellikle boyutsal hassasiyet gerektiren uygulamalarda büyük bir problem teşkil etmektedir. Bu durum son işlem ihtiyacını doğurmaktadır. Delaminasyon da önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yetersiz enerji girişi, yeterli penetrasyonun elde edilememesine ve dolayısıyla mikroyapıda hatalara neden olmaktadır. Bu durum, malzemenin bütünlüğünü ve dayanımını azaltarak olası mekanik yükler altında çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesini kolaylaştırır. Üretilen parçaların yüzey kalitesi genellikle istenen standartların altında kalmaktadır. Yığma

sırasında erimiş metalin yüzey gerilimi ve yer çekimi etkisiyle dalgalı bir yüzey formu oluşmaktadır. Bu nedenle, WAAM ile üretilen parçaların genellikle talaşlı imalat gibi ikincil işlemlere tabi tutulması gerekmektedir. Bu ek işlem adımları, üretim maliyetini ve toplam üretim süresini artırarak WAAM'in verimliliği üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Ergitilmiş metalin yüksek soğuma hızı ile katılaşması nedeniyle iç yapıda çatlak, gözenek gibi hatalar elde edilmektedir. Bu tür gözeneklilik, özellikle yorulma dayanımı gerektiren uygulamalarda malzemenin performansını ciddi şekilde sınırlamakta, fonksiyonel anlamda kullanımını engellemektedir. Isı girdisinin kontrolü oldukça kritik bir öneme sahiptir. Yüksek ısı girdisi büyük termal gerilmeler ve alt katmanlarda tane büyümesi gibi olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Özellikle katman katman yığma sürecinde önceden yığılan katmanların yüksek ısıya tekrarlı bir şekilde maruz kalmasıyla alt katmanlarda tane büyümesi problemi görülmektedir.

Endüstride ve akademide yukarıda sayılı problemlerin elimine edilmesi yahut en aza indirilmesi ile alakalı birçok proje yürütülmektedir. Mekanik dövme, katmanlar arasında mukavemeti artırmak ve içsel hataları önlemek amacıyla kullanılan bir yardımcı prosestir. Yığılmış katmanlara belirli bir kuvvet uygulanarak malzeme yoğunluğunu artırır ve gözenekliliği azaltır. Yüzeysel olarak tanelerin küçülmesine de sebebiyet vermesi sebebiyle mekanik dayanım yükselir [16]. Bu yöntem mikroyapıdaki hataların minimuma indirilmesine ve parçanın daha homojen bir yapıya sahip olmasına olanak tanır. Aktif soğutma, yığma sürecinde eriyik havuzun ve katmanların hızlı ve kontrollü bir şekilde soğutulmasını sağlamak için kullanılan bir tekniktir. Aktif soğutma, kristalleşme sürecinin daha etkili bir şekilde gerçekleşmesini sağlayarak tanelerin boyutlarını kontrol altında tutar ve mikroyapı açısından homojenliği artırır [17]. Karşılaşılan kusurların elimine edilmesinde kullanılan bir diğer yöntem ise Manyetik osilasyondur. Bu yöntemde eriyik havuzuna uygulanan manyetik alanla sıvı metalin hareketliliğini artırarak katılaşma süreci kontrol altında tutulmaya çalışılır. Manyetik osilasyon, sıvı metalin daha iyi karışmasını sağlayarak kristalleşme sırasında daha homojen bir yapı elde edilmesini sağlar. Tanelerin daha ince ve daha eş eksenli dağılımına katkıda bulunur [18]. Sıcak tel kullanımı, telin yığma öncesinde belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasını içeren bir yardımcı prosestir. Telin önceden ısıtılması, eriyik havuzun daha dengeli bir şekilde oluşmasına olanak tanır ve bu durum kalıntı gerilmeleri azaltarak çarpılma riskini minimuma indirir. Telin ısıtılması, süreçte ani sıcaklık değişimlerini önleyerek eriyik havuzun daha kontrollü bir şekilde yönetilmesini sağlar [19]. Geçiş sıcaklığı yığma gerçekleşmeden hemen önce yığma bölgesinin sıcaklığını ifade eder

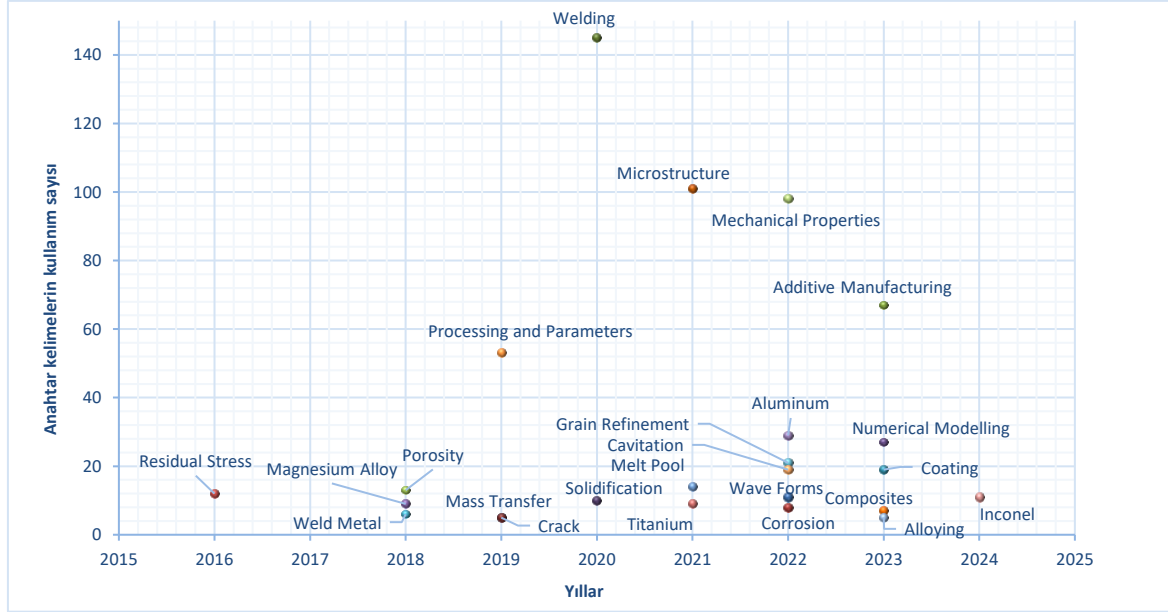
ve yığma esnasında oluşacak ısı gradyanı doğrudan etkiler. Geçiş sıcaklığının dikkatlice kontrol edilmesi, tanelerin büyümesini ve faz geçişlerini düzenler. Bu sayede daha homojen bir mikroyapı elde edilebilir ve malzemenin mekanik özellikleri geliştirilir. Geçiş sıcaklığı kontrolü ile katmanlar arasındaki termal gradyanlar azaltılarak kalıntı gerilmeler minimize edilir ve parçada çarpılma oluşumu indirgenir [20]. Nano katkı kullanımıyla da parça kalitesi yükseltilebilmektedir. Nano katkılar, eriyik metalde çekirdeklenme bölgelerinin artmasını sağlayarak daha ince taneler oluşumuna katkıda bulunur. Bu sayede malzeme içindeki mikro ölçekte yapısal hatalar minimize edilir [21]. Bir diğer önemli konu da takım yolu optimizasyonudur. Isının ne şekilde ne zaman ve nereden gireceğinin kontrolü parça içerisinde hem geçiş sıcaklığını hem de ısı gradyanının yönünü doğrudan etkilemektedir. Takım yolunun ısıl döngüler ve malzeme özellikleri hesaba katılarak belirlenmesi yığma kalitesini ve elde edilen mikroyapıyı doğrudan etkilemektedir. Optimum takım yolu kullanılarak termal girdi daha dengeli bir şekilde dağıtılır [22]. Ultrasonik titreşim, WAAM sürecinde yığma işlemi sırasında kullanılan, malzemenin mikroyapısal özelliklerini iyileştiren önemli bir yöntemdir. Ultrasonik titreşimler, eriyik havuzundaki sıvı metalin hareketliliğini artırarak daha ince ve homojen taneler elde edilmesini sağlar. Titreşimler, malzemenin daha kontrollü soğumasını sağlayarak kalıntı gerilmeleri ve çarpılma riskini azaltır. Bu da parçanın boyutsal doğruluğunu artırır. Penetrasyonu artırarak katmanlar arasında delaminasyonu engeller [23].

Ses dalgaları üçe ayrılır. Infrason ses dalgaları frekansı 20 hertz veya altındaki ses dalgalarını ifade etmektedir. 20-20.000 Hertz arasında olan ses dalgaları işitilebilir seslerdir. 20 kHz ve üzeri ses dalgaları ise ultrasonik ses dalgalarıdır. Ultrasonik enerji geleneksel imalat yöntemi olan kaynak yöntemlerinde özel proseslerde kullanıldığı literatür taramaları sonucu görülmüştür. Kaynaklı birleştirme uygulamalarında ultrasonik enerji 1990'lerden [24] itibaren akademik olarak çalışılmış ve özel endüstriyel uygulamalarda kullanılmıştır. Kaynaklı imalat ve eklemeli imalat alanında yapılan ultrasonik titreşim desteği yayın sayısının yıllara göre dağılımı Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Kaynaklı ve eklemeli imalatta ultrasonik titreşim desteği hakkında yapılan yayın sayılarının yıllara göre dağılımı

Başlarda kaynaklı imalatla kaynak kalitesinin artırılması için kullanılan ultrasonik titreşim desteği, eklemeli imalat olması ile birlikte yayın sayısında üstel olarak artış göstermiştir. Eklemeli imalatın birçok sorunu için iyileştirme önerisi sunan titreşim desteğinin öncelikle temel kaynak yöntemlerinde iyileştirme için kullanılırken, zamanla mikro yapı ve mekanik özelliklerin kontrol altında tutulması, tane küçültme, alaşımlama, titanyum ve çelik alaşımlarında iyileşme ve son olarak kaynaklanabilir olmayan alaşımların kaynaklanabilirliğinin artırılması için akademik çalışmalar yürütülmüştür. Araştırmacılar tarafından kullanılan anahtar kelimelerin yıllara göre dağılımı Şekil 2.4'de verilmiştir. Noktalar ilgili anahtar kelimenin en sık kullanıldığı yılı verirken, kesikli çizgi ilgili anahtar kelimenin kullanıldığı yıllar boyunca yatayda uzamaktadır.



Şekil 2.4. Yazarlar tarafından kullanılan anahtar kelimelerin yıllara göre dağılımı

2.1. Ergiyik Havuzun Elde Edilmesi

Tel beslemeli ark ergitmeli eklemeli imalat (WAAM) yönteminde elektrot ile tabla arasında elde edilen elektrik ark, yoğun ısı üretir. Bu ısı iş parçasına aktarılır ve lokal erime meydana gelir. Ergiyik havuz oluştuğundan sonra ilerleme yönü ve tel besleme bölgesine göre ısı kaynağından ergiyik havuzun cidarına doğru termal gradyan oluşur. Ark merkezine yakın sıcak sıvı metal yükselirken, havuzun kenarlarından gelen daha soğuk metal içeriye doğru akar ve bu da konvektif akış yaratır. Sıcaklık gradyanları, eriyik havuzunda yüzey gerilimi değişimlerine neden olarak Marangoni etkisine yol açar. Daha yüksek sıcaklıklara sahip bölgelerde (arka daha yakın), yüzey gerilimi daha düşükken, daha soğuk bölgeler daha yüksek yüzey gerilimi sergiler. Bu fark akış desenleri oluşturur. Daha sıcak, daha az yoğun sıvı ile daha soğuk, daha yoğun bölgeler arasındaki yoğunluk farkı, kaldırma kuvvetiyle yönlendirilen akışa yol açar. [25].

2.2. Ultrasonik Enerjinin Elde Edilmesi

Ultrasonik destekli kaynak yahut eklemeli imalat, yüksek frekanslı ultrasonik titreşimleri yığma yöntemleriyle birleştiren gelişmiş bir üretim tekniğidir. Bu işlemde, ultrasonik dalgalar, kavitasyon, akustik akış, artırılmış çekirdeklenme gibi etkilere sebep olurlar. Sistemde bir ultrasonik üreteç aracılığıyla titreşim üretilir ve ergiyik havuz bölgesine uygulanır. Bu etkiler, ergiyik havuzunun termal ve akış dinamikleriyle sinerji içinde

çalışarak katılaşma sürecini etkiler ve mikroyapıda iyileştirmelere sebebiyet verir. Ultrasonik titreşim, ergiyik havuzda iki ana dinamiği tetikler. Bunlar kavitasyon ve akustik akıştır [26]. Kavitasyon ve akustik akışın elde edilmesi ise ergiyik havuz içerisine aktarılan basınç dalgalarının birbirlerinin üzerine binerek çok küçük alanda alçak ve yüksek basınç noktaları oluşturmaları ile olur. Ultrasonik titreşim üreteçten çıktıktan sonra horn ve iş parçası üzerinde ilerler ve ergiyik havuza ulaşır. Ergiyik havuzun cidarı katı formda titrer. Bu titreşim hareketi ergiyik havuzda dinamik basınç dalgaları oluşturur. Bu oluşum denklem (1) ile ifade edilmiştir [27] .

$$I = c \frac{1}{2} \rho [2\pi f A]^2 \quad (1)$$

Burada I (W/m^2) ultrasonik güç yoğunluğunu, c ilgili malzemede sesin ilerleme hızıdır, ρ malzemenin yoğunluğunu, f kullanılan frekansı, A ise genlik değerini ifade eder. Bu formüle dikkat edildiğinde frekans ile genliğin çarpımı hızı verirken, yoğunluk ile hızın karesinin çarpımı bizlere dinamik basıncı vermektedir. Basınç dalgalarının, ergiyik havuza ergiyik havuzdaki cidarın hareketi ile girdiği ve bu hareketin frekans ve genlik değerinin ergiyik havuz içerisinde elde edilecek ultrasonik güç yoğunluğunu belirlediğini denklem (1) ile formülize edebiliriz. Basınç dalgaları ergiyik havuzun oval şekli üzerinden ergiyik havuza girer ve ergiyik havuz içerisinde birbiri üzerine biner. Birbiri üzerine binen dalgalarda tepelerin çakışmasıyla daha yüksek basınca sebebiyet verirken, çukurların birbirleri üzerine binmesiyle daha düşük basınç noktaları oluştururlar.

2.3. Akustik Akış

Ergiyik havuz içerisinde dalgaların ilerlemesiyle elde edilen akışa akustik akış denir. Akustik akış ergiyik havuz içerisinde bulunan konvansiyonel akışların üzerine gelir ve ergiyik havuzun kendi içerisindeki devinimi artırır. Termal gradyan akustik akış sayesinde daha homojen bir şekilde elde edilir. [28-30]. Daha homojen olarak elde edilen ergiyik havuzda çekirdeklenme arayüzü oluşur ve katılaşma oranı artar. Bu durum tane oluşumunda dendritik ve büyük taneli yapının oluşmasını zorlaştırır. Akustik akış etkisi, alaşım elementlerinin ve sıcaklığın eşit şekilde dağılmasına yardımcı olarak elementel dağılımda homojenliği artırmaktadır [31].

2.4. Ultrasonik Enerjinin Penetrasyon Üzerindeki Etkisi

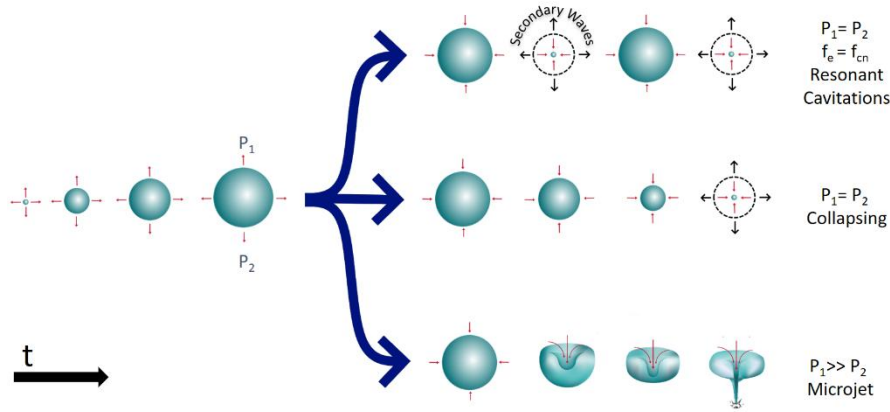
Metallerde ergime işlemini gerçekleştiren ısı kaynakları için ısı yoğunluk kavramı ısıнын verimliliği açısından öne çıkar. Isı kaynağı bir malzemeyi ertitirken aynı zamanda ortama da ısı verir. Kısaca ısı yoğunluk, harcanan enerjinin ne kadarının ergimeye sebep olduğunu tanımlar. Isıl yoğunluk lazer gibi odaklı enerji kaynaklarında çok yüksek iken oksi-asetilen kaynağı gibi proseslerde çok düşüktür. Isıl yoğunluk düştükçe HAZ bölgesi büyür ve parçanın istemediğimiz bölgeleri istemsiz ve kontrolsüz ısınır. Bu ısınma ve soğuma işlemi parçada çarpılma açığa çıkarır. Isıl yoğunluk ne kadar düşükse ise çarpılma etkisi altında kalacak bölge o kadar büyük olur. Ultrasonik titreşim uygulaması iki ana sebepten dolayı ısı kaynağından duyulan ihtiyacı azaltır. Bunlardan birincisi, ultrasonik titreşimin kendi içerisinde enerji barındırması ve bu enerjinin kaynak banyosunda açığa çıkmasıdır. İkincisi ise penetrasyon ile alakalıdır.

Isı iletim, taşınım ve ışıınım olarak üç şekilde iletilir. Kaynak banyosunda penetrasyonun elde edilmesi alt katmanların ergiyebilmesine bağlıdır. Yüksek ısı kullanılmasıının bir sebebi ilave metali ertitmenin ötesinde ergiyik havuzun alt katmanlara kadar ulaşarak penetrasyonun sağlanmasıdır. Ultrasonik titreşim sayesinde kaynak banyosu içerisinde akışkan devinimi artırır. Dolayısı ile ısı kaynağı ile ergiyik banyonun yüzeyine bırakılan ısı, akışın artan etkisi ile normalden daha efektif bir şekilde ergiyik banyonun alt kısmına taşınır. Bu durum ısı iletimini artırırken [32] aynı zamanda penetrasyonu da artırır. Isı iletiminde taşınımın etkisi artar. Bu sayede daha az enerji ile daha çok penetrasyon elde edilir. Uygulanan titreşimin uygulama yönü ve yeri de bu durumu etkileyen faktörlerdendir. Ultrasonik enerjinin ortaya çıkardığı kavitasyon gibi etkilerle lokal bölgelerde yer yer 5000°C'ye çıkan [33] sıcaklığın yanı sıra akış etkisi ile ısı enerjisinin kısa zamanda kaynak banyosunun derinliklerine iletilmesi ısı girdisi ihtiyacını azaltmakta, daha az enerji ile penetrasyon derinliği daha fazla dikişler elde edilebilmektedir. Todaro vd. [33] yaptıkları çalışmada 250 watt ile yapılan yığmayı, deneylerde ultrasonik titreşimli numunelerde lazer enerjisini 150W'a indirerek yapmak durumunda kalmışlardır.

2.5. Kavitasyon

Dalgaların birbiri üzerine binmesiyle elde edilen düşük basınç noktası yüksek sıcaklıktaki ergiyik metal ile bütünleştğinde, düşük basınç seviyesinin metalin ilgili sıcaklıkta buharlaşma basıncının altına düştüğü durumda metal buharlaşır ve kavitasyon oluşumuna

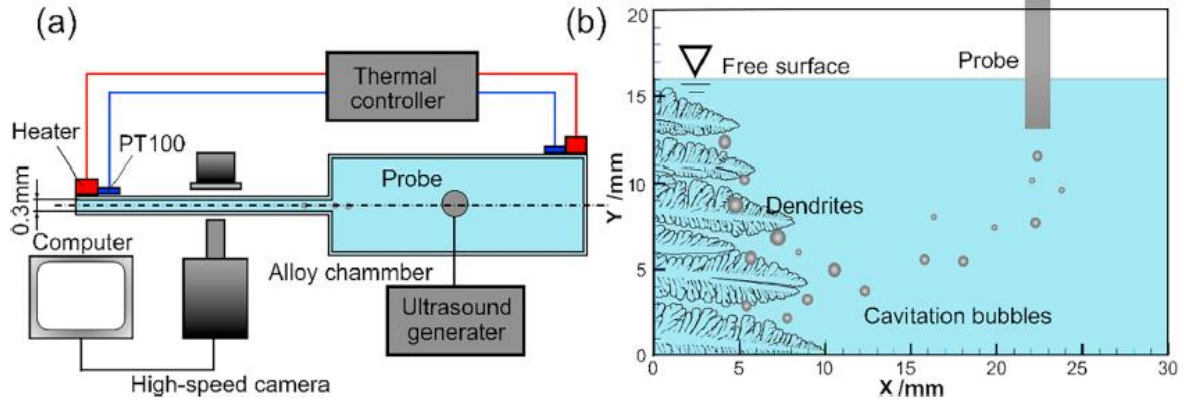
sebebiyet verir. Düşük basınç ve yüksek sıcaklıktaki erimiş metal buharlaşmaya başlar ve dalgalanan basınç altında mikro kabarcıklar oluşur, büyür ve çöker. Kaviteasyon kabarcıklarının davranışı, tek bir kabarcığın dinamiklerini modelleyen Rayleigh-Plesset ile tanımlanabilir [34]. Ultrasonik titreşimin en önemli etken noktalarından biri de ergiyik havuzda kaviteasyonun elde edilmesidir. Elde edilen mikro kabarcıklar basınç dalgalarının ilerlemesi sebebiyle bir kaç mikro saniye sonra yüksek basınç dalgasına maruz kalarak içe doğru kapanır. Bu kapanma 3 şekilde gerçekleşebilir. Kapanmaya sebep olan yüksek basınçtır. Kabarcık cidarında oluşan basınç her yönden görece eşdeğerse kabarcık kendi merkezine doğru kapanır. Bu durumda kapanmanın odaklandığı merkez noktada yüksek basınç ve yüksek sıcaklık oluşur [35]. Yer yer şok dalgalarına da sebebiyet verebilir. Elde edilen kabarcık etrafında oluşan yüksek basınç değerleri eşdeğer değilse ve bir bölgede diğer bölgeye nazaran daha yüksek ise kapanma, yüksek olan bölgeden alçak olan bölgeye doğru gerçekleşir. Bu duruma mikro jet denir [36]. Mikro jetler genellikle akış dinamiğinde basınç farklarının yüksek olduğu pervaneler yahut akışın sifıra yaklaştığı duvara yakın bölgelerde oluşur. Mikro jetler zarar verici etkileri ile bilinir. Ergiyik havuz içerisinde elde edilen mikro jetler duvara yakın bölgelerde peltsemi bölgeyi harekete geçirir ve oluşan dendritleri kırar. Kopan parçacıklar ise ergiyik havuza karışarak tanecik oluşumu için embriyo görevi görmektedir. Kaviteasyon oluşumunun ardından muhtemel üçüncü senaryo ise rezonant kabarcıklardır. Kabarcık oluşumunun gerçekleştiği nokta belirli bir frekansta alçak ve yüksek basınç altında kalmaktadır. Alçak basınçta kabarcık oluşur ve yüksek basınçta kapanır. Kabarcığın oluşumu ve kapanma periyodu zorlanmış titreşimin frekansı ile çakıştığı durumda kabarcık tekrarlı bir şekilde zorlanmış frekansla aynı periyotta oluşur ve içe kapanır. Bu duruma rezonant kabarcık denir [37]. Rezonant kabarcıklar ergiyik havuz içerisinde sürekli ve düzenli olarak ardıl basınç dalgaları oluşturur ve titreşimin etkinliğini önemli ölçüde artırır. Rezonant kabarcıklar, ergiyik havuzdaki sıvı metalin yoğun bir şekilde karışmasını sağlar. Kabarcıkların titreşim hareketi, konveksiyon akımlarını artırarak sıcaklık ve alaşım elementlerinin homojen dağılımını destekler. Şekil 2.5’de bu kaviteasyonun formasyonuna dair senaryolar görselleştirilerek verilmiştir.



Şekil 2.5. Kaviteasyon oluşum senaryoları

Mikro jetler katılma arayüzüne yakın yerlerde oluşur ve katılma arayüzüne darbe vurarak hem oluşmakta olan kolonların kırılmasını sağlar hem de akışı güçlendirir. Kolon yapıdan kopan parçacıklar ergiyik havuzun içerisine karışarak çekirdek görevi görür. Bu çekirdekler tane oluşumunu destekler ve katılma bölgesinin önünde yapay bir çekirdek bölgesi oluşturur. Bu durum kolon şekilli mikroyapının eş eksenli mikroyapıya dönüşmesini sağlar [38,39]. Abrahamov vd. [40] ve Eskin vd. [41] göre tane boyutundaki küçülmenin temel etkeni ultrasonik titreşim sırasında ortaya çıkan kaviteasyondur.

Wang vd. ultrasonik titreşim esansında çıkan kaviteasyonun dendritik yapıyı nasıl kıldığını Şekil 2.6'de gösterilen sistem ile kayıt altına almışlardır [42]. Ultrasonik titreşim sırasında ilerleyen basınç dalgalarında basınç üst ve alt noktaları çok küçük bir alanda üst üste binerek kaviteasyona sebep olmakta, kaviteasyon sonucunda ortaya çıkan şok dalgaları dendritik yapıyı parçalamaktadır. Bu esnada ergiyik havuzda yer yer 5000°C sıcaklık ve 100MPa [33] basınç görülebilmektedir. Kaviteasyon bombardımanı altında ilerlemeye çalışan dendritik yapı, şok dalgalarının etkisi ile kırılmakta ve çekirdeklenme olarak kaynak havuzuna tekrar dahil olmaktadır.

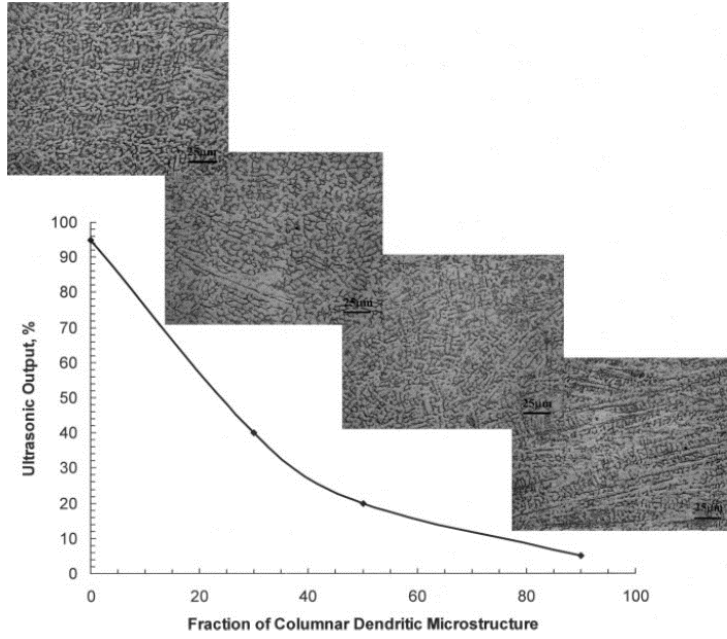


Şekil 2.6. Kaviteasyon oluşumunun izlendiği düzeneğin şematik gösterimi [42]

2.6. Ultrasonik Enerjinin Tane Oluşumu ve Yönelimi Üzerindeki Etkisi

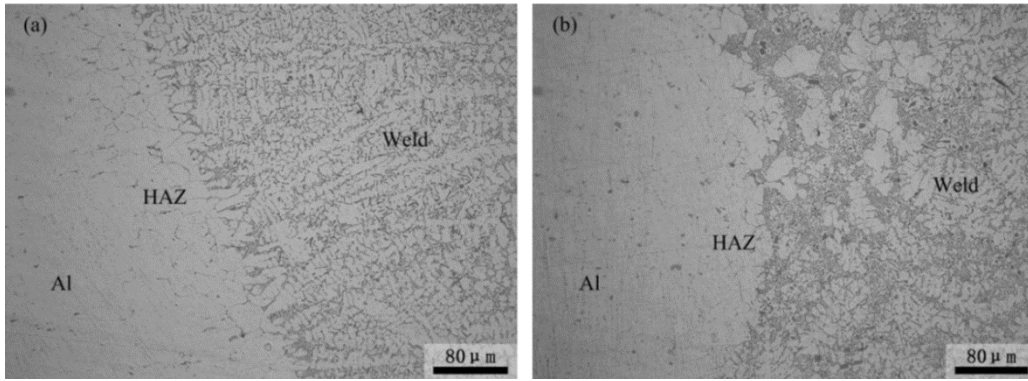
Geleneksel eriyik havuzda termal gradyan ısı kaynağından katılaşma yüzeyine doğru yönlendirilmiş bir şekilde oluşur. Yüksek sıcaklık gradyanı nedeniyle, ergimiş havuzdaki atomlar, alt tabakanın kristalografik yönelimiyle hizalanma eğilimindedir. Hızlı soğuma nedeniyle, katılaşma, çoğunlukla yapı yönüyle aynı olan ısı kaynağının yolu boyunca tercihli olarak gerçekleşir. Bu, alt tabakanın kristalografik yönelimini izleyen tane büyümesini teşvik ederek, birden fazla katman boyunca dikey olarak uzanan sütunlu tanelerle sonuçlanır. Her yeni katman biriktirilip katılaştıkça, alt tabakadaki tanelerin oryantasyonu şablon görevi görür ve katmanlar boyunca aynı tane yöneliminin devam etmesine yol açar. Bu katmanlar arası hizalama, tanelerin eş eksenli oluşması yerine sütunlu bir yapıda büyümesine neden olur. Bu durum birkaç katmanı kapsayan epitaksiyel büyümeye yol açar [43]. Epitaksiyel büyümeden kaynaklanan sütunlu taneler anizotropik özellikler sergiler. Mekanik davranış, uygulanan gerilimin yönüne bağlı olarak değişir. Yönelimli tane yapısı, özellikle yapı yönüne dik olan termal ve kalıntı gerilimlere karşı zayıf noktalar oluşturur. Bu zayıf noktalar üretilen parçanın yorulma dayanımı ve çalışma ömrünü düşürür [44,45]. Şok dalgaları ve mikro jetler, katılaşma yüzeyini doğrudan müdahale ederek, katı-sıvı arayüzünü kırar ve ön çekirdeklenme bölgesi oluşturarak epitaksiyel tane büyümesinin sürekliliğini bozar [46]. Bu etki, alt tabakadan sütunlu tanelerin sürekli, katman katman büyümesinin engellenmesi açısından önemlidir. Ergimiş havuzdaki artan konveksiyon daha düzgün bir sıcaklık dağılımına yol açar ve eş eksenli tane oluşumunu destekler [26]. Termal gradyanlardaki bu azalma, sütunlu tanelerin oluşumunu engeller ve daha rastgele bir tane yönelimini teşvik eder. Mikro jetler ile kopan parçacıklar eriyik havuzda akış içerisinde yüzer. Ultrasonik titreşimin oluşturduğu türbülansif etki sayesinde parçacıklar ve peltemsi bölge için çalkalama etkisi de ortaya çıkar. Eriyik havuzunun titreşimle artırılmış akış karakteristiği

sayesinde, mikro jetlerin kopardığı kopan parçacıkların kristalografik yönelimi ile ısı kaynağı ile soğuma bölgesi arasında oluşan temel termal gradyan arasındaki açı akış içerisindeki savrulma etkisi sayesinde zamanla değişir. Taneler birbirleriyle kavuşup, katılma tamamlandığında, bu açı her tane için rastgele olarak gerçekleşecektir. Bu durum sayesinde sadece daha ince tanelerin oluşmasını değil, aynı zamanda çeşitli tane yönelimi dağılımlarına sahip mikroyapı elde edilir. Böylece anizotropi bozulur. Mekanik özellikler izotropik davranış gösterir. Chen ve diğerleri doku oluşumunu ultrasonik titreşim ile başarılı bir şekilde bozmuş ve taneler için neredeyse rastgele kristalografik yönelim elde etmişlerdir [38]. Cui vd. [47] tablayı ultrasonik olarak titreştirmişlerdir. Ultrasonik enerjinin artırılması ile dendritik yapının kırıldığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada elde edilen mikroyapılar Şekil 2.7’de verilmiştir.



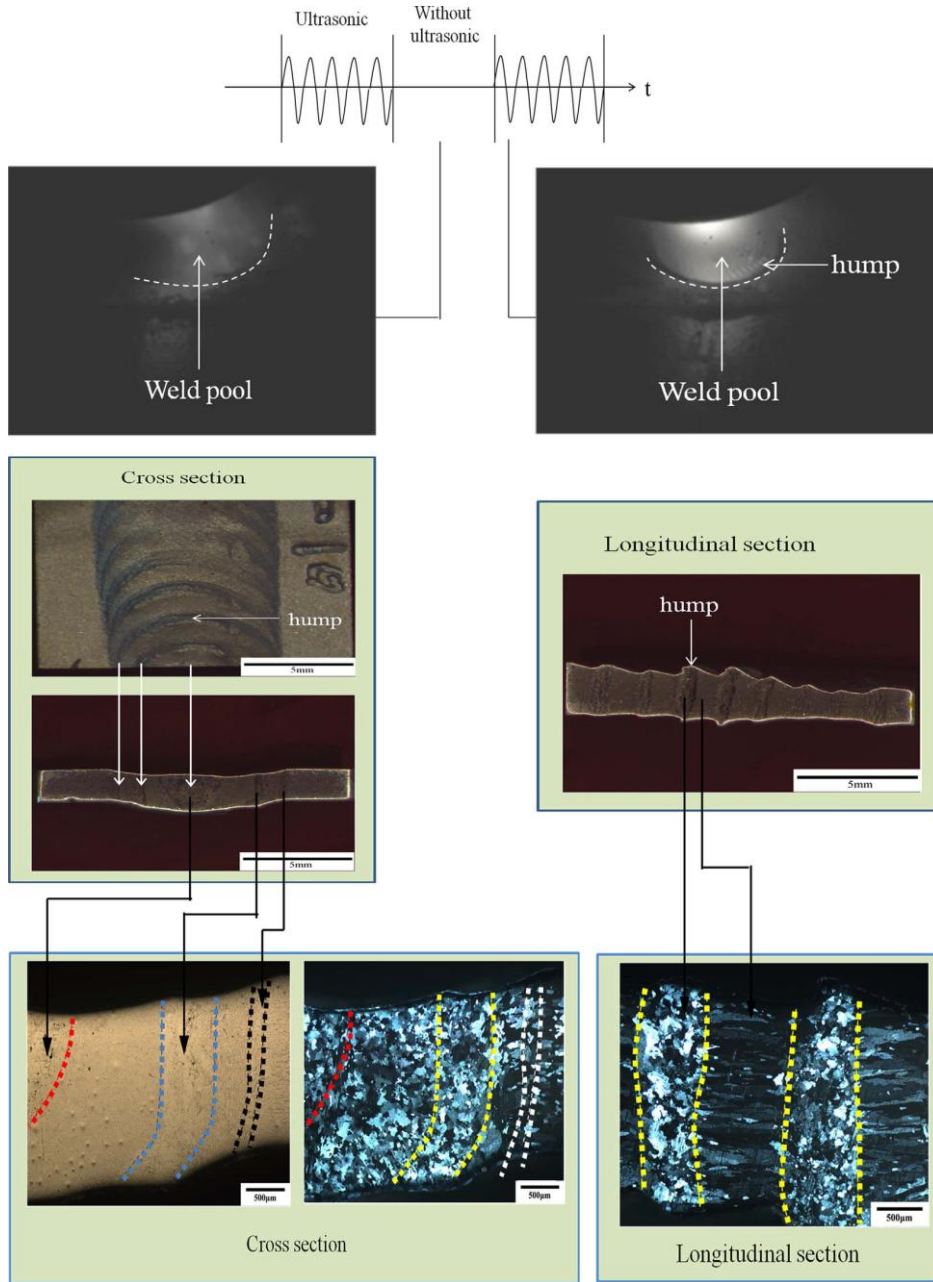
Şekil 2.7. Ultrasonik titreşimin mikroyapıya etkisi [47]

Dong vd. [48] Al-Çelik kaynağında ultrasonik enerji uygulamışlar, uygulamanın malzemeler arası penetrasyonu artırdığını ve dendritik yapıyı kıldığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.8).



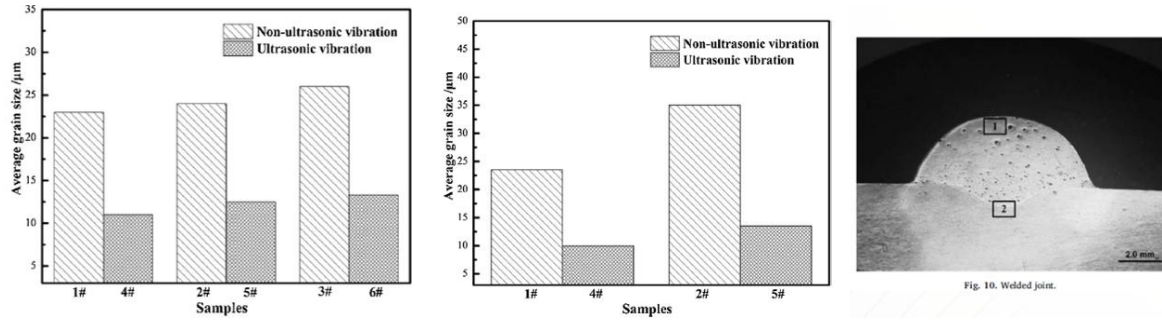
Şekil 2.8. Kaynak Bölgesinin optik mikroskop görüntüsü a) olağan durum, b) ultrasonik enerjili [48]

Chen vd. [46] bir dikiş esnasında ultrasonik enerjiyi periyodik olarak vermişlerdir. Ultrasonik enerjinin uygulandığı bölgelerde kolon şekilli mikro yapı kırılmış, tane boyutu önemli ölçüde küçülmüştür. Etki Şekil 2.9’de gösterilmektedir. Titreşimin verildiği bölgelerde ergiyik havuzun formasyonunun da değiştiği görülmüş, kaynak yüksekliği gözle görülür şekilde artarak tepeler oluşmuştur.



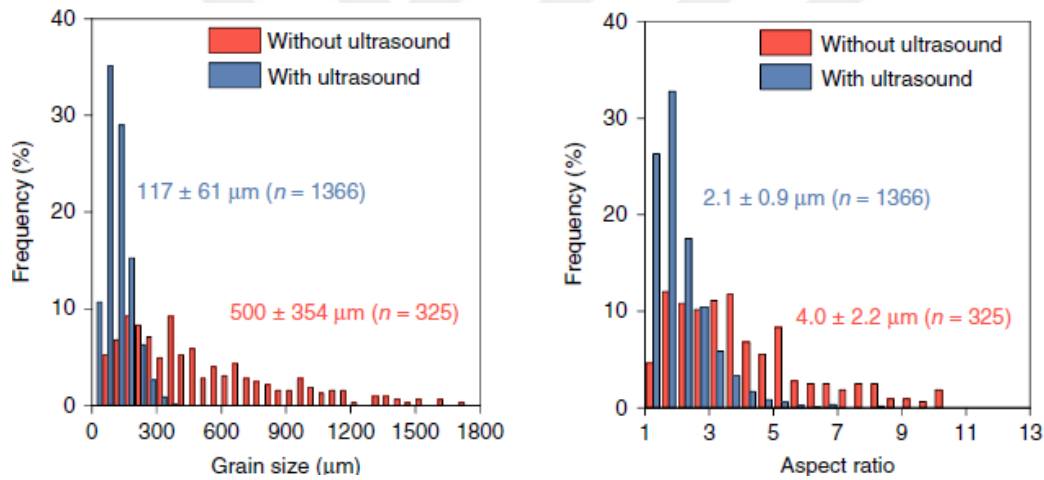
Şekil 2.9. Ultrasonik enerjinin tane büyüklüğüne etkisi [46]

Şekil 2.9’te görüldüğü üzere ultrasonik titreşimin uygulanmadığı bölgede kolon şekilli mikroyapı varken, ultrasonik enerjinin uygulandığı bölgede ani ve büyük oranda bir tane küçülmesi görülmektedir. Tian vd. [49] iş parçasına uyguladıkları 20 kHz ultrasonik enerjinin ortalama tane boyutuna etkisini ölçmüşler kaynak dikişinin tepe noktasında ve penetrasyon derinliğinde ölçümler yapmışlardır. Yapılan ölçümler neticesinde tane büyüklüğünde önemli ölçüde küçülme gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.10’de görülmektedir.



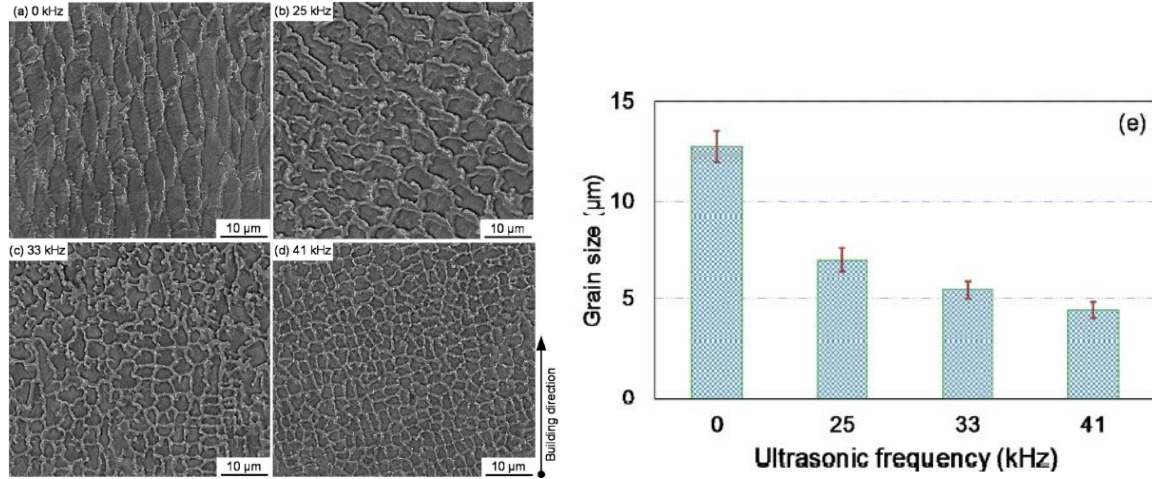
Şekil 2.10. Tane büyüklüğü değerleri [49]

Todaro vd. [50] yaptıkları çalışmada (LPDED, Ti64) tane boyutunun ortalama değerinin üçte birine düşürüldüğünü ve tane yapılarının eş eksenli bir yapıya dönüştüğünü ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışma ultrasonik enerjinin mikroyapıda ne denli büyük bir değişimi ortaya koyduğunu sayısal olarak anlamak adına önemli bir çalışmadır (Şekil 2.11).



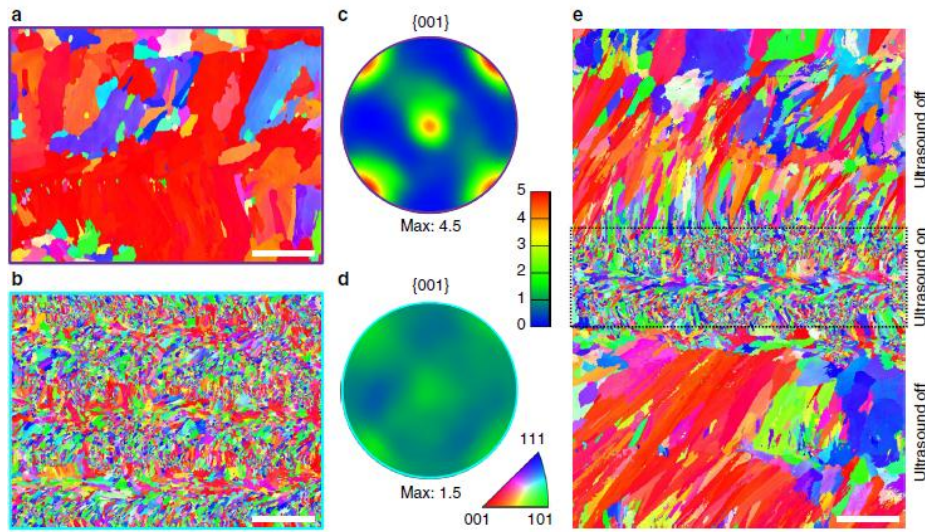
Şekil 2.11. Tane büyüklüğü dağılımı ve eş eksenlilik karşılaştırılması [50]

Wang vd. [51] Inconel 718 için yaptıkları çalışmada farklı frekanslarda ultrasonik enerji uygulamışlar, ultrasonik enerji arttıkça tane boyutunun küçüldüğünü tespit etmişlerdir.



Şekil 2.12. Farklı frekanslarda ultrasonik enerjinin tane büyüklüğüne etkisi [51]

Todaro vd. yaptıkları çalışmalarda ultrasonik enerjinin tane küçülmesi ile birlikte tanelerin yönelimini de iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir [23].



Şekil 2.13. Inconel 626 için ultrasonik enerjinin tane yönelimine ve tane küçülmesine etkisi [23]

2.7. Ultrasonik Enerjinin Gözeneklilik Üzerinde Etkisi

Gözeneklilik, malzeme içinde boşlukların varlığına işaret eder. Bu olgu, yoğunluğun azalmasına, mekanik özelliklerin düşmesine ve nihayetinde ürünün dayanıklılığında ve ömründe azalmaya yol açar. Yığılma parametreleri, malzeme kirliliği ve alaşımda bulunan ham madde dahil olmak üzere çeşitli faktörler gözenekliliğe neden olmaktadır. Gözenekler, yükleme koşulları altında gerilimin biriktiği noktalar olarak davranış sergiler ve malzemenin içerisinde oluşabilecek çatlakların başlangıç noktalarına dönüşürler. Bu nedenle, eklemeli

imalatta gözeneklilik seviyelerini azaltmak, fonksiyonel kullanıma dair uygulamalarda istenen yapısal bütünlüğü ve güvenilirliği elde etmek için kritik öneme sahiptir. Marangoni, kaldırma kuvveti, yerçekimi ve Lorentz kuvveti nedeniyle oluşan akışlar, eriyik havuzunun içindeki gazı yukarı doğru hareket ettirir ve oluşan gözenekler ergiyik havuzdan zamanla uzaklaşır. Ancak eklemeli imalatın sahip olduğu yüksek soğuma hızı sebebiyle gözenekliliğin bir kısmı erimiş havuzdan kaçamaz. Ultrasonik titreşimin etkisi ile oluşan akustik akış, ergiyik havuzun olağan akışını artırır ve gözeneklilik, ergiyik havuzdan daha hızlı bir şekilde kaçabilir. Bunun yanı sıra, mikro jetler ve kavitasyonun kapanması sırasında oluşan ardıl yüksek basınç dalgaları ve gelişmiş akış gözenekliliği daha iyi bir şekilde parçalar ve onu küçük gözenekliliğe böler. Bunlar boşluk oranını en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda kalan gözenekliliğin yarıçapını da azaltır. Böylece, stres konsantrasyonları inşa edilen parçada en aza indirilir. Zhu ve diğerleri, farklı genlik büyüklüğünün etkisiyle değişen boşluk oranını araştırmıştır. Boşlukların miktarı ve boyutunun ultrasonik genlikle değiştiği sonucunu elde etmişlerdir [52]. Ning ve arkadaşları, paslanmaz çelik malzemede ultrasonik titreşimle boşluk oranını %0,68'den %0,35'e düşürmüştür. Tian vd. [49], Titreşimin uygulanmasının hem kaynak bölgesinde oluşan poroziteyi azalttığı hem de penetrasyon derinliğini artırdığını gözlemlemişlerdir. Şekil 2.14'de solda ultrasonik enerjinin kaynak dikişinde şekilsel etkisi gösterilmiştir. a,c,e numunelerinde ultrasonik titreşim yok iken, b,d,f numunelerinde ultrasonik enerji uygulanmıştır. Bununla birlikte a ile b, c ile d, e ile f numuneleri ultrasonik enerji dışında kalan tüm parametreleri aynıdır. Şekil 2.14'de sağda numunelerdeki porozite miktarları ölçülerek grafik haline getirilmiştir. Ultrasonik enerjinin porozite miktarında önemli bir düşüşe sebep olduğu yapılan çalışmalarda açıkça görülmektedir.

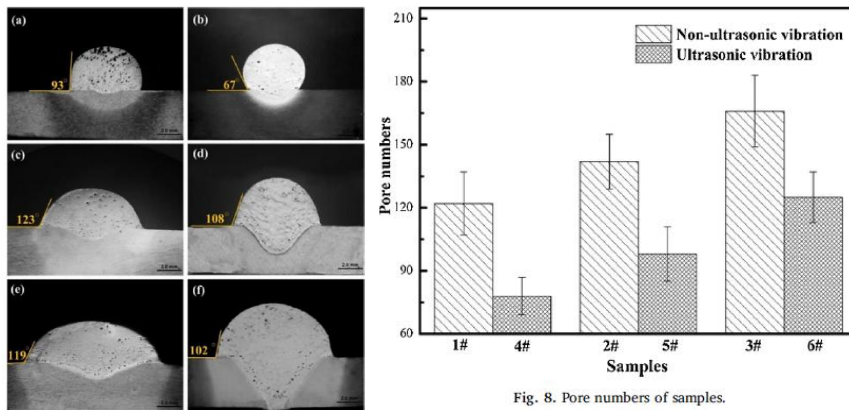
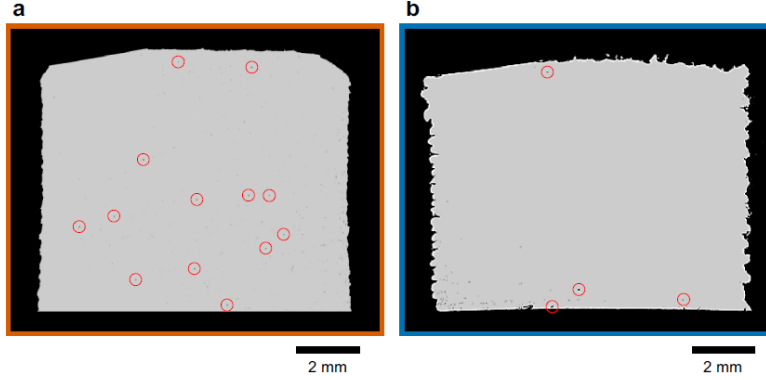


Fig. 8. Pore numbers of samples.

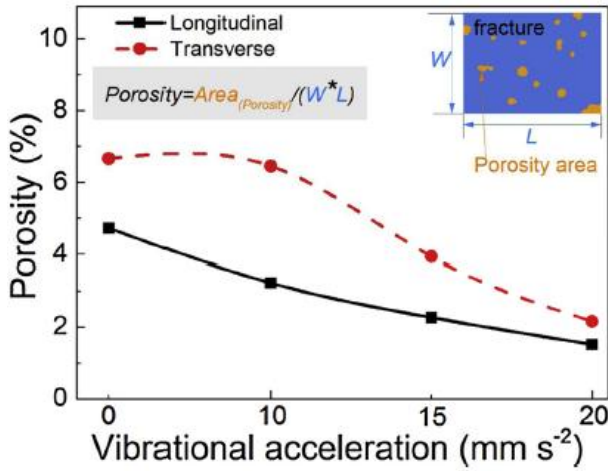
Şekil 2.14. Ultrasonik titreşimin kaynak şeklinde ve porozite miktarına etkisi

Todaro ve ark. [50] titanyum alaşımı üzerinde iş parçasını titreşime tabi tutarak yaptıkları çalışmada porozitenin azaldığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.15. Numunelerde porozite durumu, ultrasonik enerji (a)uygulanmayan, (b)uygulanan [50]

Zhang vd. [53] titreşime tabi tutulan iş parçasında titreşimin enerji arttıkça porozitenin azaldığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Titreşime bağlı porozite dağılımı [53]

2.8. Ultrasonik Enerjinin Katılaşmada Aşırı Soğuma Etkisi

Kavitasyon, akustik akış ve artırılmış çekirdeklenmeye ek olarak, ultrasonik enerji ergiyik havuzunda yerel aşırı soğuma bölgeleri oluşturmaktadır. Aşırı soğuma, sıvı metalin sıcaklığının katılaşma gerçekleşmeksizin katılaşma sıcaklığının altına düştüğü durumu ifade eder. Tane boyutunu doğrudan etkileyen bu olgu, mikroyapı ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için önemlidir. Ultrasonik enerji, katılaşmada kritik yarıçapı ortaya koyan Gibbs serbest enerjisini etkileyerek eşik değerinin geçilmesine yardımcı olur. Termodinamik

sürece etki ederek metal eriyik havuzunda tane oluşumunu etkiler. Çekirdeklenme için toplam Gibbs serbest enerjisi (ΔG_{total}) iki ana bileşeni içerir [54];

$$\Delta G_T = \Delta H - T\Delta S = \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta g_v\right)_{volume} + (4\pi r^2 \gamma)_{surface} \quad (2)$$

Burada r çekirdeğin yarıçapını, Δg_v birim hacme düşen serbest enerji miktarını, γ yüzey gerilmesini ifade etmektedir. Ultrasonik dalgalar sayesinde sıvı içerisinde yüksek ve alçak basınç noktaları oluşur. Bu durum entalpi değerinde değişikliğe sebebiyet verir [55];

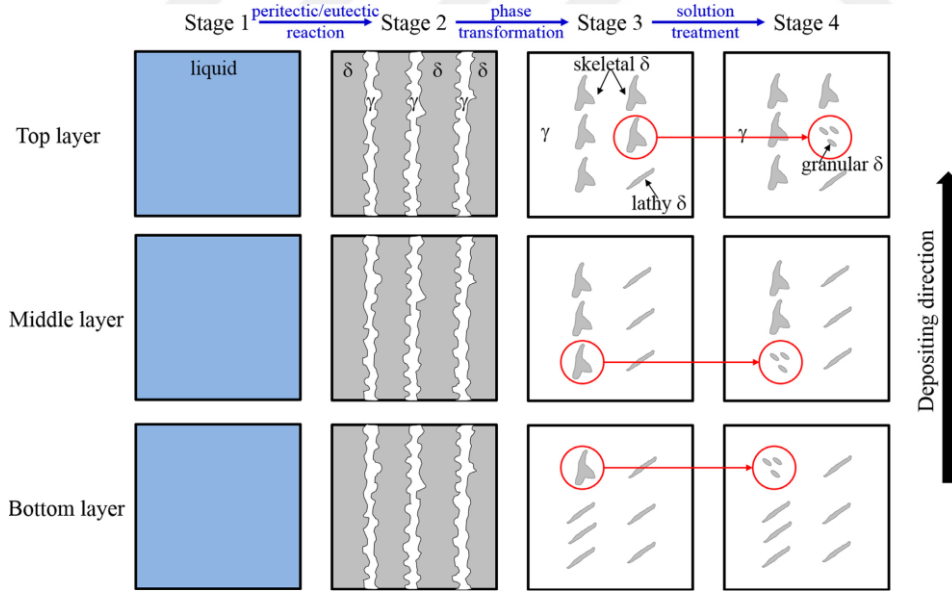
$$\Delta H \approx \Delta u + v\Delta p + p\Delta v \quad (3)$$

Burada H entalpiyi, u iç enerjiyi, p ve Δp basınç ve değişimini, v ve Δv ise hacim ve değişimini ifade etmektedir. ultrasonik enerji, entalpiyi basınç ve hacim değişiklikleri üzerinden etkilemektedir. Basıncın yükseldiği bölgede hacimce neredeyse aynı olan eriyik haldeki sıvı metalin sıcaklığı artar. Basıncın düştüğü bölgede ise öncelikle hacimce değişiklik olmadığından basınç düşümü doğrudan enerjinin düşümü anlamına gelmektedir. Eğer basınç belirli bir değerin altına düşer ve kavitasyon oluşursa, Denklem (3)'ün son terimi devreye girerek hacim artışı ortaya çıkar. Basıncın düştüğü, lakin kavitasyonun oluşmadığı bölgelerde aşırı soğuma oluşur ve çekirdeklenmeyi tetikler. Bu durum katılaşma oranını doğrudan etkileyerek çekirdek sayısını artırır ve kolon şekilli mikro yapının oluşmasını engeller. Bu sayede eklemeli imalatla oluşan kolon şekilli taneler yerini eş eksenli tanelere bırakır.

2.9. Ultrasonik Enerjinin Mikroyapıya Etkisi

Östenitik paslanmaz çelikler demir alaşımı grupları arasında yüksek mekanik özellikler, yüksek korozyon direnci, yüksek kriyojenik özellikler ve yüksek sıcaklık dayanımı açısından öne çıkmakta, bu özelliklerin kombinasyonunu barındırdığından önemli bir alaşım olarak belirtilmektedir [56]. Östenitik paslanmaz çelikler bu özellikleri ile nükleer reaktörlerin birincil çevrim ve diğer kısımlarındaki borularında da ana malzeme olarak, çevrimin farklı bölgelerinde kaplama malzemeleri olarak kullanılmaktadır [57,58]. Geleneksel döküm ve dövme prosesleri ile üretilen östenitik paslanmaz çelikler ile karşılaştırıldığında WAAM östenitik paslanmaz çelik, üretim sırasında gerçekleşen karmaşık termal döngüler nedeniyle kendine özgü bir mikro yapıya sahiptir [59,60].

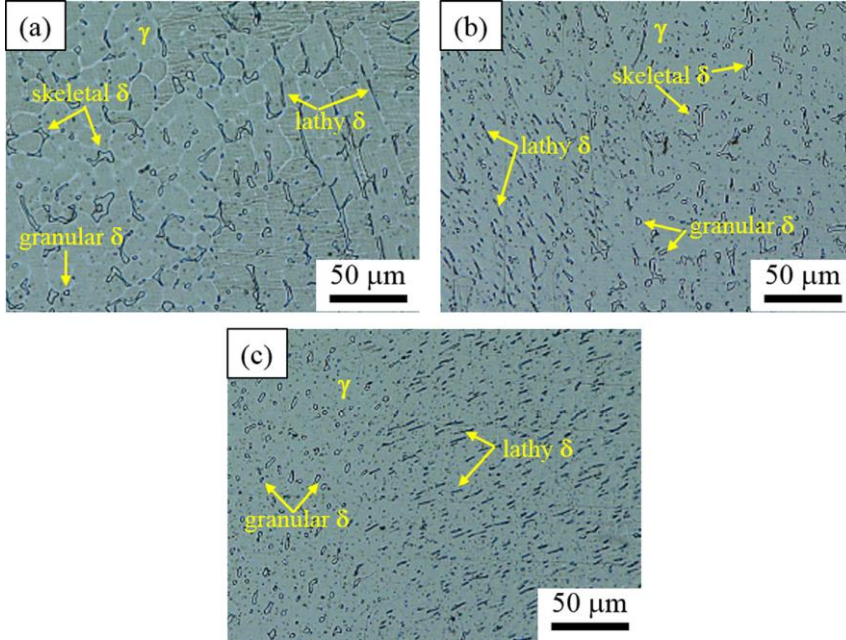
Li v.d yaptıkları çalışmada [57] 308L paslanmaz çelik malzemenin tek dikiş duvardan üretilmesi sürecini irdelemişler ve Şekil 2.17’de şematik olarak gösterilen mikroyapı oluşumu ile karşılaşmışlardır. Mikroyapı oluşumu 4 aşamada incelenmiştir. 1-3 aşamaları WAAM ile yığmada katılma, 4. aşama ise çözeltiye alma ısıtma işlem sürecidir. 1. aşamada ark enerjisi ile ergitilmiş sıvı metal görülmektedir. Daha sonra birincil ferrit, biriktirme yönüyle paralel olarak dendritik morfolojide büyüme gerçekleştirir. Ferritin interdendritik bölgesinde, 2. aşamada gösterildiği gibi ötektik veya peritektik reaksiyonla östenit oluşmaya başlar [61]. Ferrit, sıcaklığın azalmasıyla giderek daha kararsız hale gelir ve büyük miktarlarda östenite dönüşür. Farklı katmanların farklı soğutma hızları nedeniyle [62-64], ferrit içeriği ve morfolojisi üst, orta ve alt katmanlarda farklı şekilde formlanır. Daha yavaş soğutma hızına sahip üst katmanlarda, ferrit büyük miktarda iskelet ferritinin yanı sıra az miktarda lathy ferritten oluşur. En hızlı soğutma hızına sahip alt katmanda ise iskelet ferritinin çoğu lathy ferrit ile yer değiştirir. Bunun nedeni, ferrit-östenit dönüşümünün hızlı soğutmada kısıtlanabilmesidir. Hızlı soğumada, faz dönüşümü sırasında difüzyon süresi düşüktür, iğnemi lathy ferritler oluşur [65]. Bu nedenle, soğuma hızının daha yüksek olduğu alt katmanlarda ferrit fazı çok sayıda lathy ferrit ve az miktarda iskelet ferritten oluşur.



Şekil 2.17. WAAM ile üretilmiş duvar numunede farklı yüksekliklerde elde edilen mikroyapı oluşumunun şematik gösterimi [57]

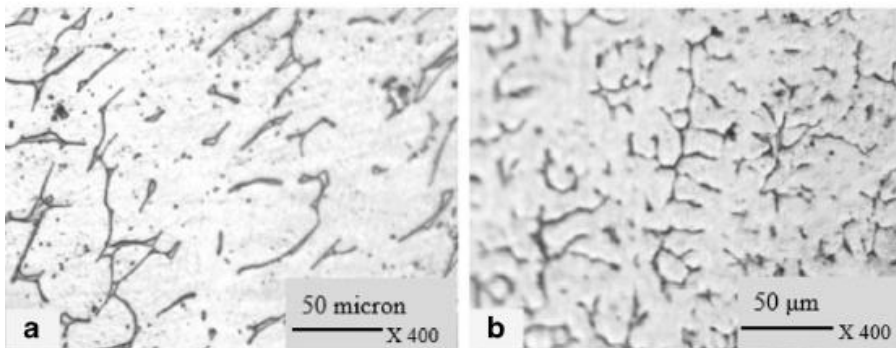
Orta katmanlarda mikro yapı iskelet ve lathy ferritin karışımıdır. Benzer ferrit morfolojisi ve dağılımı, biriktirilmiş WAAM 316L paslanmaz çelikte de gözlemlenmiştir [66]. Bununla birlikte WAAM 308 L malzemesinin ferrit oranı alt katmanlarda en yüksek iken, bunu orta

katman ve üst katman takip eder [60,66] . Isı birikmesi ile soğuma hızının azalması bu durumun başlıca nedenlerindendir. Ayrıca Li vd. yaptıkları çalışmada elde ettikleri mikroyapıyı Şekil 2.18’da gösterildiği gibi elde etmişlerdir.



Şekil 2.18. 308L malzemesi ile yığılan duvar numunede elde edilen mikroyapılar; a) son katman, b) Orta katman, c) ilk katman

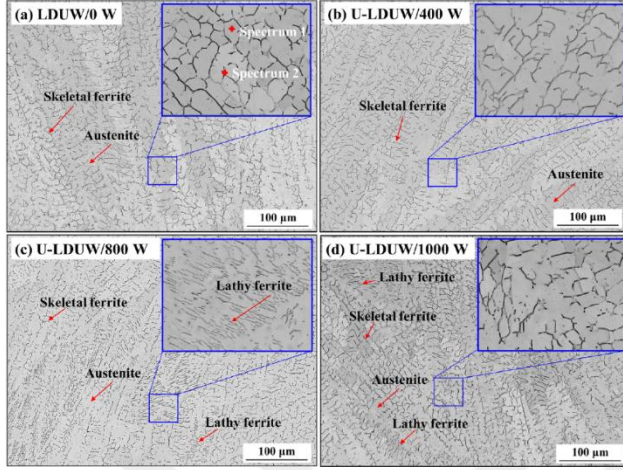
Yılmaz vd. yaptıkları çalışmada farklı proses parametrelerinde 308LSi malzemeyi yığmışlar, soğuma hızının yüksek olduğu numunelerde mikroyapıyı daha ince yapıyı elde etmişlerdir. İlerleme hızının 0.24 ve 0.42 m/dk olarak yığdıkları numunelerden mikroyapı görüntüleri Şekil 2.19 ‘te verilmiştir.



Şekil 2.19. Farklı ilerleme hızları ile yığılan numuneler, a) 0.24 m/dk, b)0.42 m/dk

Liao vd. Paslanmaz çelik malzemeyi tek dikiş olarak yığarak inceledikleri çalışmada 1000W’a kadar farklı güçlerde uyguladıkları ultrasonik enerjinin etkisini incelemiştir.

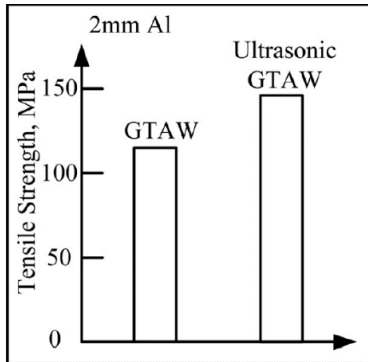
Ultrasonik enerji arttıkça mikroyapıda lathy ferritlerin görüldüğü saptanmıştır. Bu durum mikroyapı oluşumunda soğuma hızının değişimine bağlanmıştır.



Şekil 2.20. Ultrasonik titreşimin farklı enerji seviyelerinde mikroyapıya etkisi a)0W, b)400W, c) 800W, d)1000W

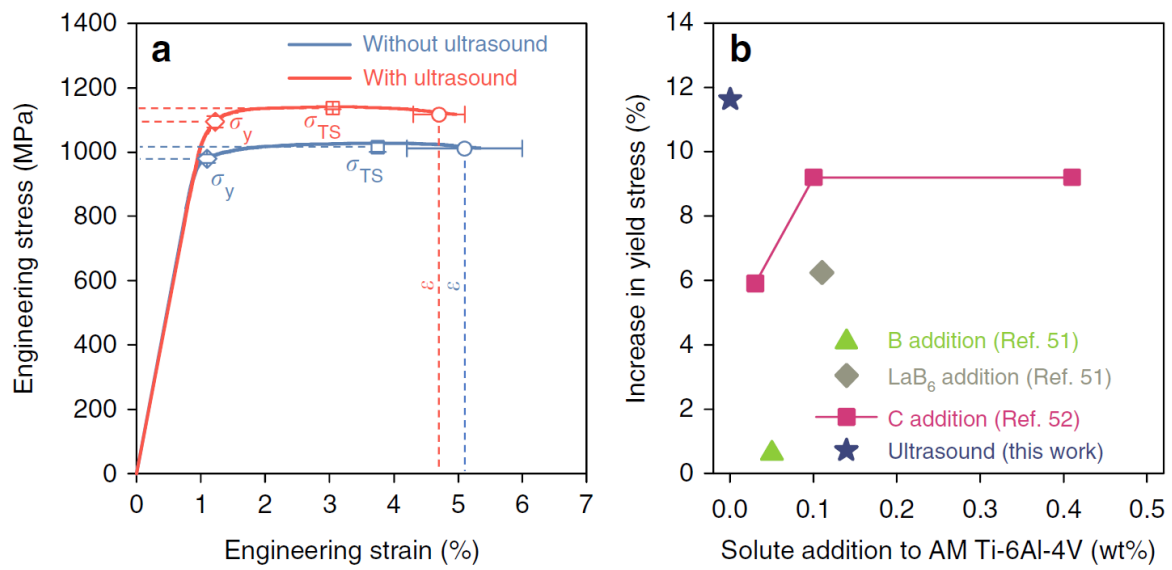
2.10. Ultrasonik Enerjinin Mekanik Özelliklere Etkisi

Tane küçülmesi, tane yönelimi dağılımı, porozite gibi iyileştirmeler sonucunda mekanik özellikler önemli ölçüde artmaktadır. Akma dayanımı ile tane büyüklüğü arasındaki ilişki hall-petch prensibi ile ortaya konmuştur. Literatürde yapılan çalışmalar ultrasonik titreşim ile elde edilen ince taneli yapıların numunelerin mekanik özelliklerini artırıcı etkisini ortaya koymuştur. Dong ve ark. [48] alüminyum ve demirin kaynatılması sırasında iş parçasına 20 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulamışlardır. Çekme gerilmesinin 115 MPa'dan 146 MPa değerine çıkartmışlardır.



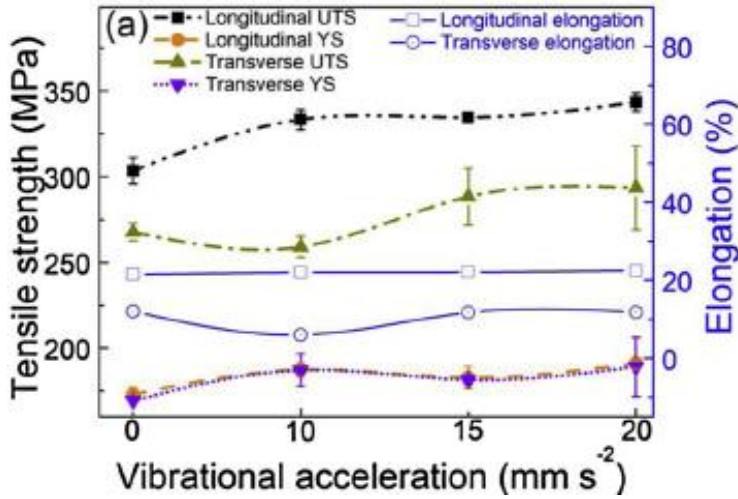
Şekil 2.21. 20 kHz titreşim enerjisine dair çekme test sonuçları [48]

Todaro vd. [50] lazer tabanlı DED sisteminde Ti6Al4V malzemesi parça üretiminde ultrasonik titreşimin etkisini incelemiştir. 20 kHz titreşim frekansının kullanıldığı ve 25 mm sonotrode ile iş parçasının titreştirildiği sistemde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda ultrasonik enerji uygulanan parçanın ultrasonik enerji uygulanmayan parçaya kıyasla akma ve kopma gerilmelerinin ± 12.5 arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca Şekil 2.22 diğer iyileştirme yöntemlerine kıyasla ultrasonik titreşimin üstünlüğü gösterilmektedir. B, LaB₆ C eklentilerine kıyasla ultrasonik titreşim akma dayanımını iyileştirmesi bakımından önemli bir artım ortaya koymuştur.



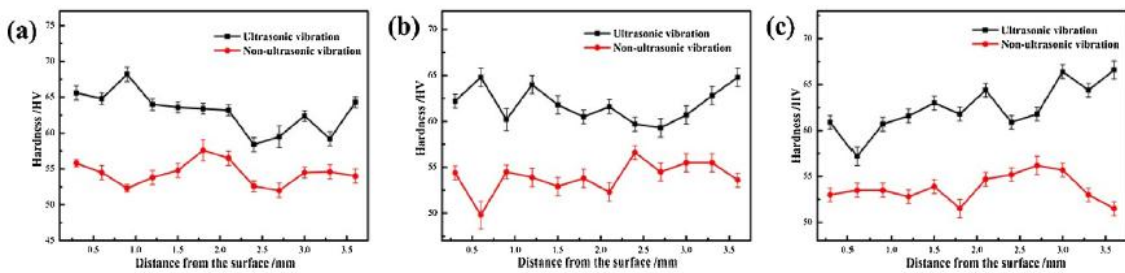
Şekil 2.22. Ti6Al4V parçada elde edilen iyileşme ve diğer yöntemlerle kıyaslanması [50]

Zhang ve ark. [53] Al-M alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmada iş parçasının titreşime tabi tutulmasının ortalama tane büyüklüğünü %22.5'a kadar düşürmüşler, poroziteyi azaltmışlar ve mekanik özellikleri iyileştirmişlerdir.



Şekil 2.23. Al-Mg alaşımında titreşimin etkisi [53]

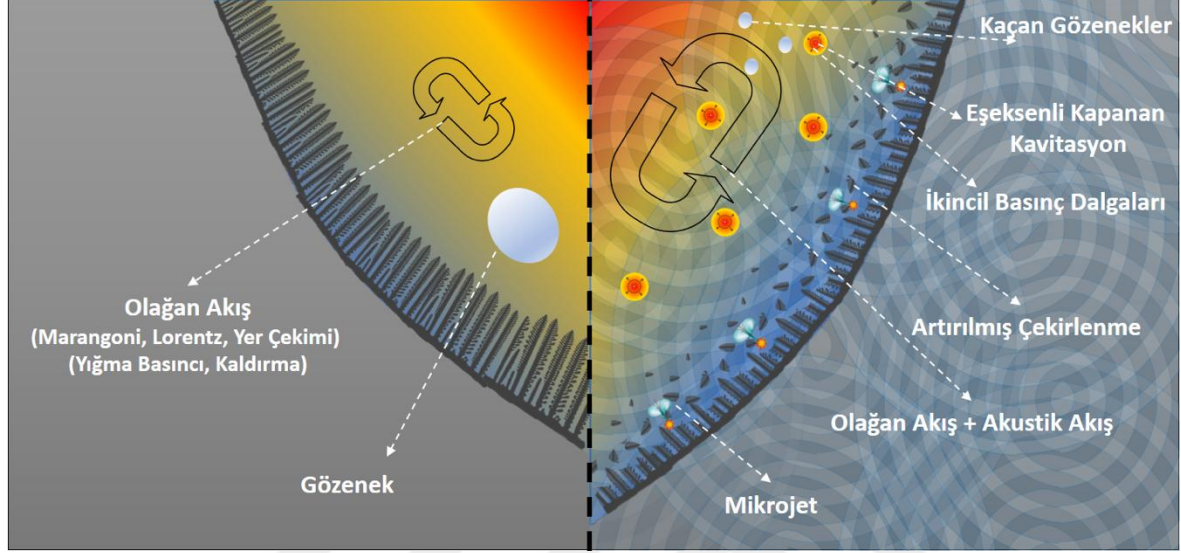
Cong ve arkadaşları, AISI 630 paslanmaz çelik biriktirmiş ve akma dayanımını %117,7, nihai çekme dayanımını %144,2 ve sünekliği %108,5 oranında artırmıştır[67]. Grunov[68], UA uygulayarak %12 daha iyi mikro sertlik değeri elde etmiştir. Mikroyapıda taneleri küçülmesi, porozitenin azalması mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Bu iyileştirmelerin neticesinde elde edilen bir başka çıktı da mikrosertlik değerinde artış olarak önümüze çıkmaktadır. Yapılan literatür taramalarında elde edilen iyileştirmelerin neticesinde mikrosertlik değerlerinde artışın olduğu gözlenmiştir. Tian vd. [49], yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşimin sertlik değerini önemli ölçüde artırdığını yaptıkları çalışmada saptamışlardır.



Şekil 2.24. Alüminyum malzeme için yüzeyde ve içeri doğru elde edilen sertlik değerleri [30]

Mikrosertlik değerinde artış iş parçasının aşınma direncini de olumlu yönde etkilemektedir. Wang ve ark. [69] Inconel 718 için yaptıkları çalışmada aşınma direncinin arttığını gözlemlemişlerdir.

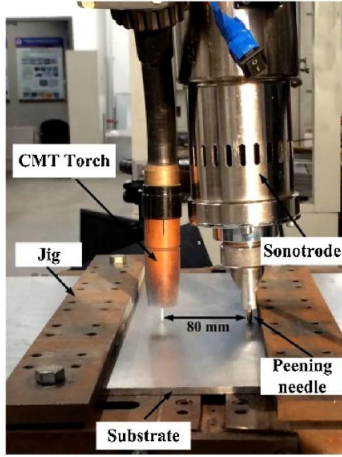
kavitasyonun etkisi ile tane boyutunun ve gözenekliliğin azaltılması [23,47,53,70], eş eksenli tanelerin elde edilmesi ve epitaksiyel büyümenin kırılması [23], kolon şekilli mikroyapının kırılması [46,49,69], ısı girdisinin, ısı birikiminin ve çarpılmanın azaltılması [50] elde edilir. Sonuç olarak mekanik özellikler artırılarak daha kaliteli bir parça üretilir.



Şekil 2.27. Ultrasonik destekli ve ultrasonik destekli olmayan ergitme havuzunun dinamikleri arasındaki farkın şematik görünümü

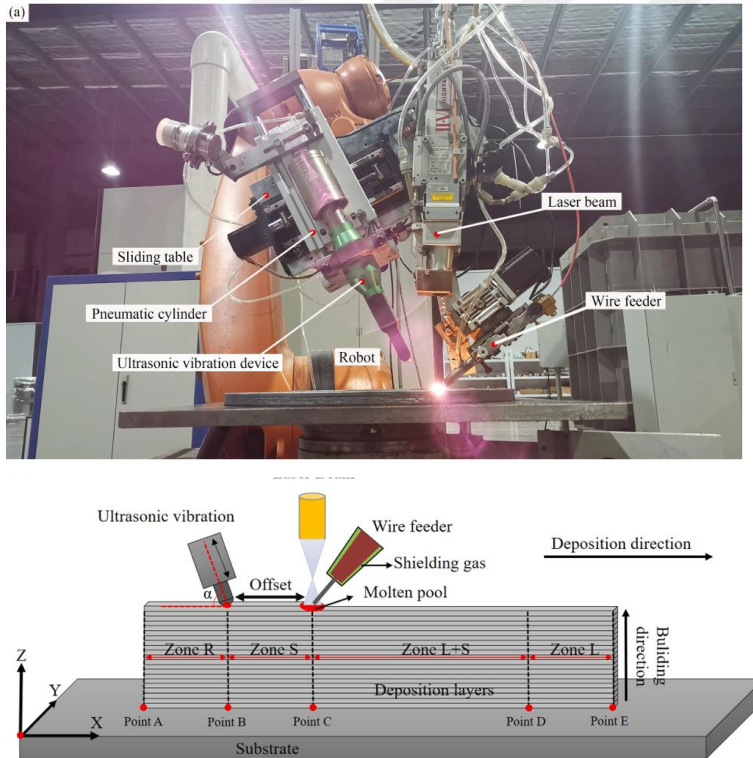
2.11. Uygulama Örnekleri

Ultrasonik titreşim ile iyileştirmede sonuç alabilmenin kritik noktası ergiyik havuz içerisinde yüksek frekansta yeterli seviyede titreşim elde etmektir. Titreşimin basınç dalgaları olduğu kabulü ile titreşimin ergiyik havuza girmesinin çeşitli yolları vardır. Akımın yüksek frekansta dalgalandırılması ile ark basıncını değiştirmek, iş parçasının ergiyik havuza yakın bölgesinden titreşim vermek, tablanın bütünüyle titreştirilmesi gibi farklı bölgelerden uygulanabilir. Literatüre bakıldığında çalışmaların ekseriyetinin tablanın yahut katılaşmış iş parçasının ergiyik havuza yakın bölgeden titreştirilmesini kapsadığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.28’da tablanın bir sonotrode ile titreştirilmesi gösterilmiştir.



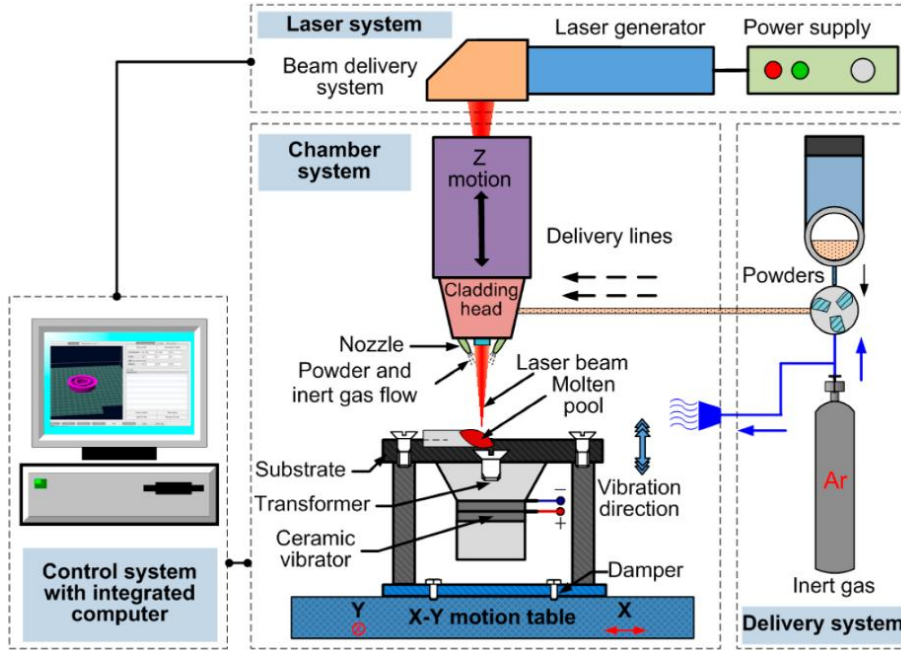
Şekil 2.28. Tablanın titreştirilmesine bir örnek [49]

Şekil 2.29’de Robotik bir uç işlevciye titreşim cihazı entegre edilmiştir. Yığma gerçekleştirilince katılardan bölge titreşime tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmada ultrasonik enerjinin hem uygulandığı katı bölgede mikroyapı değişimi hem de katılarda esnasında mikroyapı değişimi irdelenmiştir.



Şekil 2.29. İş parçasının titreştirilmesine bir örnek [71]

Literatürde tabla titreştirilmesine sıklıkla rastlanmaktadır. Tabla Şekil 2.28’de titreştirilebileceği gibi Şekil 2.30’de görüldüğü gibi de titreştirilebilir. Bu sistemde tablanın altına çok güçlü bir horn koyulup tüm tabla şekilde gösterildiği gibi titreştirilmektedir.



Şekil 2.30. Toz püskürtme prosesinde tabla titreşimi[72]

2.12. Titreşimin Üretilmesi ve Aktarılması

Elde edilen tüm iyileştirmelerin kaynağı ergiyik havuzda ultrasonik titreşimin elde edilmesinden geçmektedir. Ultrasonik titreşim ise ergiyik havuza katı sıvı etkileşim arayüzünden girmektedir. İçeride elde edilen ultrasonik enerjinin miktarını denklem (1) ile formülüze edebiliriz. Burada etkileşim arayüzünün genlik ve frekans değerine bağlıdır. Yoğunluk ve ses hızı sıcaklıkla birlikte değişmekle beraber, kontrollü bir proses parametresi olarak ele alınamamaktadır. Ergiyik havuzda elde edilecek iyileştirmenin kontrol edilebilmesi için ise genlik ve frekans değerinin kontrol altında tutulması gerekmektedir.

Ultrasonik titreşimler, yüksek frekanslı ses dalgalarının bir malzemeye veya ortama mekanik enerji olarak aktarılmasıyla oluşur. Bu titreşimlerin üretim süreci, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi, bu enerjinin güçlendirilmesi ve hedef yüzeye aktarılması aşamalarını içerir. Ultrasonik sistemlerin etkin bir şekilde çalışabilmesi, bileşenlerin birbirine uyumlu olarak rezonans koşullarında çalışmasına ve enerji kaybının en aza indirilmesine bağlıdır [73].

Ultrasonik titreşimlerin üretimi için ilk adım, elektrik enerjisinin sistemin gerektirdiği yüksek frekansa dönüştürülmesidir. Bu amaçla kullanılan ultrasonik jeneratör, şebeke elektriğinden sağlanan 50-60 Hz frekansındaki düşük frekanslı alternatif akımı, 20 kHz veya daha yüksek frekanslara yükseltir. Jeneratör, yalnızca frekansı artırmakla kalmaz, aynı zamanda transdüserin rezonans frekansında çalışmasını sağlamak için çıkış sinyalini sürekli izler ve ayarlar. Bu işlem sırasında, sistemin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla geri bildirim mekanizmaları devreye girer. Modern jeneratörler, sinüzoidal dalga formunda sabit genlikli bir sinyal üretir ve bu sinyal piezoelektrik transdüseri tetiklemek için kullanılır [74,75].

Ultrasonik sistemlerin temel bileşeni olan piezoelektrik transdüser, elektrik enerjisini mekanik titreşimlere dönüştürür. Bu dönüşüm, piezoelektrik malzemelerin fiziksel boyutlarının üzerlerine uygulanan elektrik alanına bağlı olarak değişmesi prensibine dayanır. Kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi piezoseramik malzemeler, yüksek mekanik dayanım ve elektriksel dönüşüm verimliliği sayesinde en yaygın kullanılan malzemelerdir. Transdüser, genellikle bir veya birden fazla piezoseramik diskten oluşur. Bu diskler, transdüserin iki ucunda bulunan metal elektrotlar aracılığıyla elektrik sinyali alır ve bu sinyali mekanik titreşimlere dönüştürür. Negatif ve pozitif gerilim altında yüksek frekansta gerilime ardıl bir şekilde maruz bırakılan piezoseramik uygulanan frekansta genişler ve çeker. Bu genişleme ve çekme hareketi önce güçlendiriciye ardından horna son olarak ise iş parçasına deformasyon dalgaları olarak aktarılır. Bu deformasyonun büyüklüğü ve hızının tespit edilmesi önemlidir[76]. Titreşimler, elektrik sinyalinin frekansı ile senkronize olarak meydana gelir ve bu sayede yüksek frekanslı mekanik deformasyon dalgaları elde edilir. Bu senkronizasyon geometri ve kütleyle bağımlı bir şekilde hesaplanarak elde edilir [77].

Transdüserden gelen titreşimler, doğrudan uygulama için genellikle yeterli değildir. Bu nedenle, sistemde bir güçlendirici (ing. Booster) kullanılarak titreşimlerin genliği artırılır. Güçlendirici, transdüser ile horn arasında bir köprü görevi görür ve mekanik bir rezonatör olarak çalışır. Titanyum veya alüminyum gibi hafif ve dayanıklı malzemelerden üretilen güçlendiriciler, transdüserden aldığı titreşimleri güçlendirir ve horn'a iletir. Güçlendirici, sistemin rezonans frekansında maksimum verimlilikle çalışmasını sağlayacak şekilde tasarlanır. Ayrıca, titreşimlerin genliğini artırarak enerji aktarımını optimize eder [78].

Titreşimlerin son aşamada hedef yüzeye veya malzemeye aktarılması horn aracılığıyla gerçekleşir. Horn, ultrasonik sistemin uygulama bölgesine mekanik enerjiyi odaklayan ve yoğunlaştıran bir bileşendir. Genellikle uygulamaya özel olarak tasarlanan horn'un boyutları ve geometrisi, titreşimlerin genliğini ve etkisini belirler. Örneğin, hassas yüzey işlemleri için ince ve keskin uçlu hornlar, daha geniş alanlar için ise büyük yüzeyli hornlar kullanılır. Horn'un rezonans frekansı, sistemin diğer bileşenleriyle uyum içinde olacak şekilde tasarlanır. Böylece, enerji kaybı minimize edilir ve titreşimlerin hedef yüzeye aktarımı sırasında maksimum verimlilik sağlanır.

Titreşim, bir sistemin denge konumundan saparak periyodik bir hareket gerçekleştirmesi durumudur. Ultrasonik sistemlerde bu hareket, bir piezoelektrik transdüser tarafından üretilen mekanik titreşimlerin bir malzemeye veya ortama aktarılmasıyla oluşur. Titreşimlerin analizinde kullanılan temel matematiksel model, Newton'un hareket denklemlerine dayanır. Bu denklemler, bir sistemin hareketini belirleyen kütle, rijitlik, sönümleme ve harici kuvvet terimlerini içerir. Ultrasonik titreşimlerin modellenmesinde ise genellikle harmonik bir kuvvetin bir mekanik sisteme uygulanmasıyla ortaya çıkan zorlanmış titreşimler ele alınır. Bu analiz, ultrasonik sistemlerin rezonans koşullarını, enerji transferini ve titreşim genliğini optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Titreşime bağlı deformasyon dalgalarının hareketi denklem (4) ile incelenir [79];

$$m\ddot{x} + c_d\dot{x} + kx = F(t) \quad (4)$$

Burada m sistemin kütlesini ifade eder. Sistemde bulunan piezoelektrik transdüser, booster ve horn gibi bileşenlerin toplam kütesinden oluşur. Kütle, bir sistemin ataleti üzerinde doğrudan etkili olup, sistemin doğal frekansını belirleyen temel bir parametredir. k Sistemin rijitliğini ifade eder. k parametresi, kullanılan malzemelerin elastik özelliklerinden ve bileşenlerin geometrisinden türetilir. Örneğin, piezoelektrik seramiklerin elastik modülü (E) ve metalik bileşenlerin rijitliği (G), sistemin şeklini ifade eden (I) atalet momenti rijitlik parametresinin belirlenmesinde önemli rol oynar. c_d sistemin sönümleme kabiliyetini temsil eder.

$$C_d = 2m\omega_n\zeta \quad (5)$$

Burada C_d sönümleme katsayısını, ω_n doğal frekansı, ζ sönümleme oranını ifade etmektedir. Bu kayıplar, deformasyonun ısıya dönüşmesi gibi iç kayıplardan, bağlantı bölgelerindeki enerji dağılımlarından ve çevreye yayılan akustik dalgalar nedeniyle meydana gelir. Ultrasonik sistemlerin rezonans frekansında maksimum verimlilikle çalışabilmesi için sönüm katsayısının düşük tutulması gereklidir. $x, \dot{x}, \ddot{x}$, ise sırasıyla sistemin denge noktasına göre konumu, hızı ve ivmelenmeyi ifade etmektedir. Bu yer değiştirme, zamanın bir fonksiyonu olarak değişir ve harici kuvvetin sistem üzerindeki etkisini doğrudan yansıtır. Harici kuvvet $F(t)$ sisteme uygulanan kuvveti ifade eder. Ultrasonik sistemlerde bu kuvvet, piezoelektrik transdüser tarafından üretilen ve elektrik enerjisinden mekanik enerjiye dönüştürülen bir kuvvet olarak tanımlanır. Kuvvetin genliği piezoelektrik malzemeye uygulanan voltaj değerine bağlıdır. Titreşim analizi sırasında sistemin farklı dinamik durumları göz önünde bulundurulur. Eğer sisteme harici bir kuvvet uygulanmıyorsa sistem serbest titreşim yapar. Bu durumda, sistemin frekansı yalnızca rijitlik (k) ve kütle (m) parametrelerine bağlıdır. Doğal frekans olarak adlandırılan bu frekans denklem (5) ile ifade edilir;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

Sistem serbest titreşim yaparken, sönümleme etkileri titreşimlerin genliğini zamanla azaltır. Eğer sisteme bir kuvvet uygulanıyorsa sistem zorlanmış titreşim yapar. Bu durumda sistem, harici kuvvetin frekansı ω ile aynı frekansta titreşim yapar. Titreşim genliği, sistemin rijitlik, kütle ve sönümleme parametrelerinin yanı sıra harici kuvvetin frekansına ve genliğine bağlıdır. Rezonans, sistemin harici kuvvet frekansı (ω) ile doğal frekansının (ω_n) eşit olduğu durumu ifade eder. Bu durumda, titreşim genliği maksimuma ulaşır ve enerji transferi en verimli şekilde gerçekleşir. Ultrasonik sistemlerde rezonans, enerji kayıplarını azaltmak ve maksimum titreşim genliği elde etmek için tercih edilen bir çalışma modudur. Ancak, rezonans sırasında meydana gelen yüksek genlik, sistem bileşenlerinde aşırı gerilmelere ve malzeme yorgunluğuna neden olabilir. Bu nedenle, ultrasonik sistemlerin tasarımında rezonans koşulları dikkatle analiz edilir ve güvenli sınırlar içinde tutulur.

Titreşimin performansını etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bunlardan ilki malzeme özellikleridir. Kütle (m), kullanılan malzemelerin yoğunluğuna (ρ) ve geometrisine bağlı iken; rijitlik (k), malzemenin elastik modülüne (E, G) ve geometrisine bağlıdır. Malzemenin

elastik modülünün yüksek olması, daha yüksek seviyelerde doğal frekanslara izin verirken, yoğunluk artışı doğal frekansı azaltıcı bir etki gösterir. Geometri sistemin dinamik davranışını önemli ölçüde etkiler. Bileşenlerin boyutları ve şekilleri, hem rijitlik hem de kütle parametrelerini belirler. Özellikle horn tasarımında, titreşim genliğinin odaklanması ve enerji aktarımının verimliliği açısından boyutlar kritik bir rol oynar. Bağlantı yöntemleri ve montaj şekli ise sönüm katsayısını doğrudan etkiler. Yetersiz veya zayıf bağlantılar, enerji kayıplarına ve düşük performansa yol açabilir.

Harici kuvvetin frekansı, sistemin rezonans koşullarına ne kadar yakın çalışacağını belirleyen bir diğer önemli parametredir. Rezonans frekansından sapmalar, enerji kaybına ve düşük genlikli titreşimlere neden olur. Çevresel faktörler de sistem performansını etkileyebilir. Özellikle sıcaklık değişimleri, malzemelerin elastik modüllerinde ve sönümleme katsayısında değişikliklere yol açarak sistemin dinamik davranışını değiştirebilir. Ultrasonik titreşimlerin elde edilmesi ve idame ettirilmesi kütle, rijitlik, sönümleme ve harici kuvvet parametrelerine direkt olarak bağlıdır.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında titreşimin ergiyik havuzda ne tür etkiler oluşturduğu, ergiyik havuzda akışı nasıl etkilediği ve katılma sürecini nasıl etkilediği konularının detaylı şekilde incelendiği görülmektedir. Birçok çalışmada ultrasonik güç bir parametre olarak ele alınmıştır. Farklı ultrasonik güçlerde yığımlar gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar tartışılmıştır.

Literatür incelendiğinde titreşimin üretilmesi, iletilmesi ve ergiyik havuzda elde edilme süreçlerine dair çalışmalar hususunda açıklar olduğu görülmüştür. Eklemeli imalatla titreşim karakteristiğini doğrudan etkileyen 3 temel unsur katmanlar boyunca ve yığma sırasında değişmekte olup, bu sürecin ve sürece dair unsurların yeterince irdelenmediği gözlemlenmiştir. Bu üç temel unsur kütle, geometri ve sıcaklıktır. Bu unsurlardan kütle denklem (4) ün birinci terimidir. Geometri değişimi parçanın sahip olduğu ve denklemin (4)'ün üçüncü terimi olan rijitlik katsayısını etkilediğinden denklemini doğrudan etkilemektedir. Sıcaklık ise malzemenin özelliklerini etkilemesi açısından hem rijitlik katsayısını hem de sönümleme katsayısını etkileyen önemli bir unsurdur. Eklemeli imalatla yığma boyunca kütle, geometri ve sıcaklık değişmektedir. Ayrıca ergiyik havuz parçanın üzerinde farklı noktalarda yığma gerçekleştirmekte, dalga dalga yayılan titreşim için ergiyik havuzun konumu da başka bir değişken olarak karşımıza çıkmaktadır. Kısacası sabit güç

kullanımına rağmen ergiyik havuza iletilen ultrasonik enerji miktarı kütle ve geometrideki değişimden doğrudan etkilenmektedir. Mikroyapı ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde etkin parametre ergiyik havuzda elde edilen ultrasonik enerji olup bu kapsamda literatürde açık vardır. Bu çalışma literatürde var olan bu açığa odaklanarak, titreşimin üretilmesi ve ergiyik havuza iletilmesi sürecini metal eklemeli imalat süreçleri ve dinamikleri zemininde tartışarak detaylı bir şekilde ortaya koymuştur.





3. MALZEME ve YÖNTEM

Ultrasonik enerji maddelerin içerisinde dalga olarak yayılmaktadır. Kullanılan enerji ile ergiyik havuzda elde edilen enerji değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada değişkenliğin kütle ve geometriye bağımlılığı incelenmektedir. Çalışmanın ilk zamanlarında kurgulanan sisteme ait analizler gerçekleştirildiğinde üretilen ultrasonik enerjinin büyük boyutlu parçalar içerisinde dağıldığı gözlemlenmiş ve verimlilik sorunları ile karşılaşmıştır. Aynı zamanda büyük boyutlu parçalar için sistemin sonlu elemanlar analizlerinin icrasının gerektirdiği işlem kapasitesi ihtiyacı çoklu fizik analizlerinin icrasını teknik anlamda sınırlamıştır. Deneysel ve Sayısal çalışmalarda karşılaşılan teknik sınırlamalar sistem tek boyutta ve küçük bir alanda incelenmesine araştırmayı yöneltmiş, literatürde nokta ile yığma (DbD, İng. Dot by Dot) yığma yöntemi tek ekseninde, görece küçük ve görece değişmeyen bir kesit alanına sahip olduğu için yığma stratejisi olarak belirlenmiştir. Sayısal ve Deneysel çalışmalar DbD yığma stratejisine göre hazırlanmıştır.

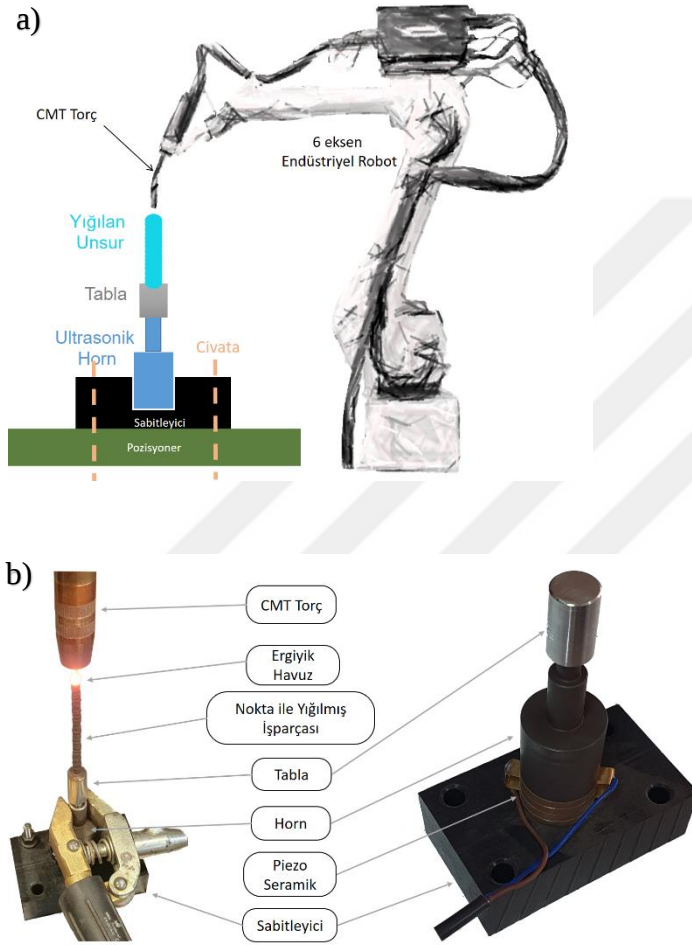
3.1. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmaların icra edilebilmesi için ultrasonik frekansta elektronik gerilimin üretilmesi, bir piezoseramik malzemeye aktarılması gerekmektedir. Ardından bu titreşimin horna aktarılması, hornun ise belirlenen frekansta çalışmaya uygun olması gerekmektedir. Deneysel çalışmalar altyapı, malzeme ve proses başlıkları altında incelenmiştir.

3.2. Deney Düzeneği

Altyapıda; Ultrasonik enerjinin üretilmesi için ultrasonik üreteç, horn ve tablanın yanı sıra ergiyik havuzun oluşturulması ve kütle transferinin gerçekleşmesi için ise Fronius CMT kaynak makinası ve 6 eksen endüstriyel robot ile hareket ettirilen CMT torç mevcuttur. Yığma robotik kontrol ile programlanarak gerçekleştirilmiş, her bir yığma esnasında yükseklik kontrol edilerek her bir yığma için torç mesafesi sabit tutulmuştur. 38 mm çapında piezoseramik malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan piezoseramik malzemenin çapının seçiminde sistemin boyutsal olarak küçük olması gerekliliği göz önüne alınmıştır. 4 adet piezoseramik malzeme 1000V alternatif gerilim ile 20.4 kHz frekansta tetiklenecek şekilde sistem tasarımı gerçekleştirilmiş ve sistem üretilerek devreye alınmıştır. Sistem Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Sistemde kullanılan horn tasarlanırken, yığmanın küçük bir alanda olacağı düşünülmüş, ultrasonik enerjinin bu küçük alanda odaklanması hedeflenmiştir. Yığma tabla

üzerine yapılmış, yığılan parçalar kesilerek tabla tekrarlı şekilde kullanılmıştır. Sabitleyiciye horn avare olarak oturtulmuş, herhangi bir bağlayıcı kullanılmamıştır. Hornun tabanından itibaren 2 cm yüksekliğine kadar olan kısım için sabitleyiciye yuva açılmış, horn ilgili kısma oturtulmuştur. Horn sıkı geçme ile oturtulmamış, yuva çapı ise hornun içinde gezecek kadar geniş değildir. Sabitleyici pozisyonere cıvata ile bağlanmış ve titreşim sırasındaki hareketi engellenmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmanın şematik ve gerçek gösterimi a) bileşenler, b) yığma süreci, horn ve sabitleyici

3.2.1. Yığma ve titreşime dair proses parametreleri

Enerji kaynağı olarak Fronius kaynak makinesi kullanılmıştır. Soğuk Metal Transfer yöntemi (CMT) ile yığma gerçekleştirilmiştir. Tel besleme hızı 4,6 m/dk, akım ise 160 A olarak ayarlanmıştır. Yığma nokta kaynağı metoduyla yapılmış, her nokta için biriktirme süresi 0,9 sn seçilmiştir. Her biriktirmeden sonra sıcaklığın 150 °C düşmesi beklenmiş, bir sonraki katman bu su sıcaklıkta yığılmıştır.

Ultrasonik titreşimin üretilmesi için 100W'lık bir üreteç kullanılmıştır. Çalışmalar 50W, 75W ve 100W ultrasonik güçte yapılmıştır. dört numune yığılmış, birincisi ultrasonik enerji olmadan, diğerleri ise sırasıyla 50W, 75W ve 100W ultrasonik güç kullanılarak yığılmıştır. Ultrasonik titreşimin frekansı 20,4 kHz'dir. Tüm numunelerde ultrasonik güç hariç tüm parametreler sabit tutulmuştur.

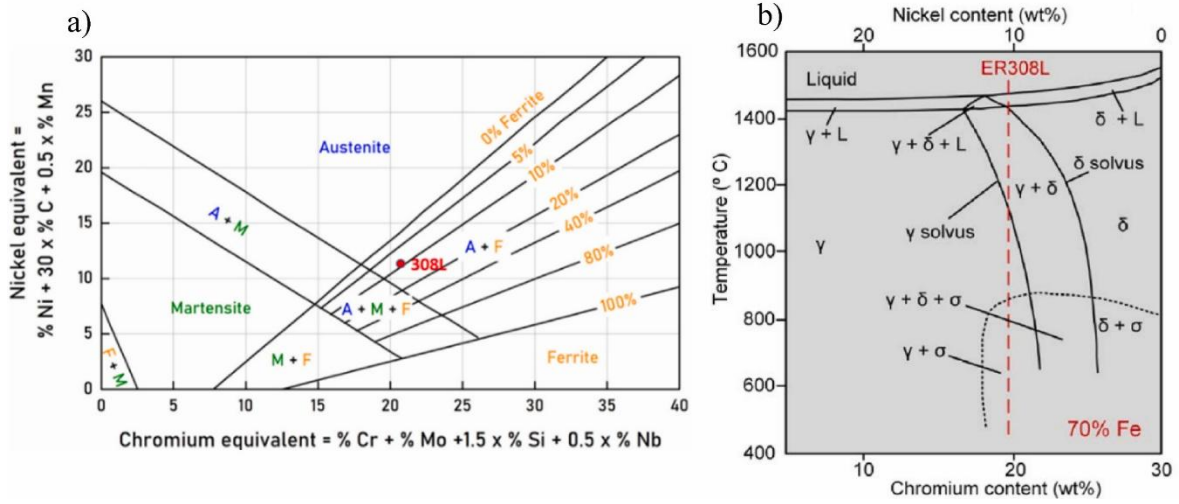
3.2.2. Malzeme

Çalışmalarda geometrinin üretilmesi için malzeme olarak ER308LSi kaynak teli kullanılmıştır. 308LSi paslanmaz çelik, özellikle kaynak uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir dolgu malzemesidir. Akma dayanımı 400 MPa, kopma dayanımı ise 580 MPa dolaylarında olan dolgu malzemesinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. ER308LSi malzemesinin kompozisyonu

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Mo	Cu
% Ağırlık	0.03 max	1 – 2.5	0.65-1	19.5 - 22	9 – 11	0.03 max	0.03 max	0.75 max	0.75 max

308L malzemesinin mikroyapısının değerlendirilmesinde kullanılacak olan Schaeffler diyagramı ve faz diyagramı Şekil 3.2'de verilmektedir. 308L malzemesi katılaşmaya başlarken delta ferrit fazı oluşur. Soğuma devam ettikçe delta ferrit fazı östenite dönüşür. Oda sıcaklığında ferrit oranının %8-10 arasında olması beklenmektedir [80].



Şekil 3.2. 308L malzemesi için a) Schaeffler diyagramı ve b) faz diyagramı [80]

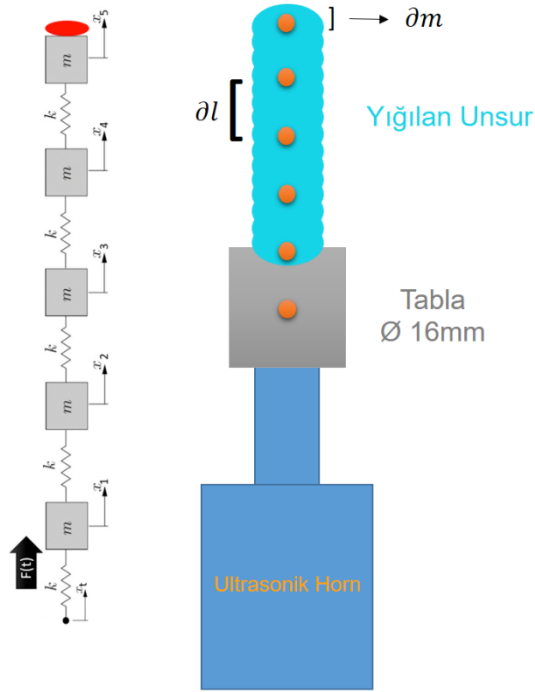
3.3. Analitik ve Sayısal Model

Analitik çalışmalarda sistem 5 serbestlik dereceli olarak ele alınmıştır. 5 ayrı düğüm noktasına göre sistem analitik denklemlerle çözümlenmiştir. Analitik çalışmalarda işlem hacminin ve işlemci ihtiyacının düşük tutulması istenmesi sebebiyle frekanslar daha düşük tutulmuştur. 5 düğüm noktasına ve serbestlik derecesine sahip lineer bir sistem için öncelikle 1 numaralı denklem inşa edilmektedir. Denklemden m_i , x_i , k_i sistemin her bir düğüm noktasının sahip olduğu değeri ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{bmatrix} + c \times \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & k_m & 0 \\ k_m & \ddots & k_m \\ 0 & k_m & k_n \end{bmatrix} \times x = F(\sin \omega t) \quad (7)$$

Sistem çözümü n adet düğüm noktası için denklem (7)'deki hali almaktadır. Akabinde sisteme tanımlanan $F(t)$ sonucunda sistemin kütle artışına verdiği cevap irdelenmektedir. Ticari yazılımlarda zamanla kütle artışı konusu önemli bir problem olarak karşımıza çıkmıştır. Yazılımlar sistemi kurarken düğüm noktalarını esnetmektedir fakat bu durumda kütle artışı durumu söz konusu olmamaktadır. Ortaya konan yazılım ile tek eksenli düğüm noktaları arasındaki mesafe her adımda artırılmakta, düğüm nokta sayısı sabit kalmak ile beraber her bir düğüm noktasının kütlesi ve geometrisi artırılmaktadır. Tek eksenli büyütülen bir geometri ile kütle artışı bu sayede sağlanmış, titreşim karakteristikleri çözümlenebilmiştir. Bu sayede her bir zaman adımında hem geometri değişmektedir, hem de kütle değişmektedir. Analitik modelin çözümü ile sistemin sabit sinüzoidal yük altında

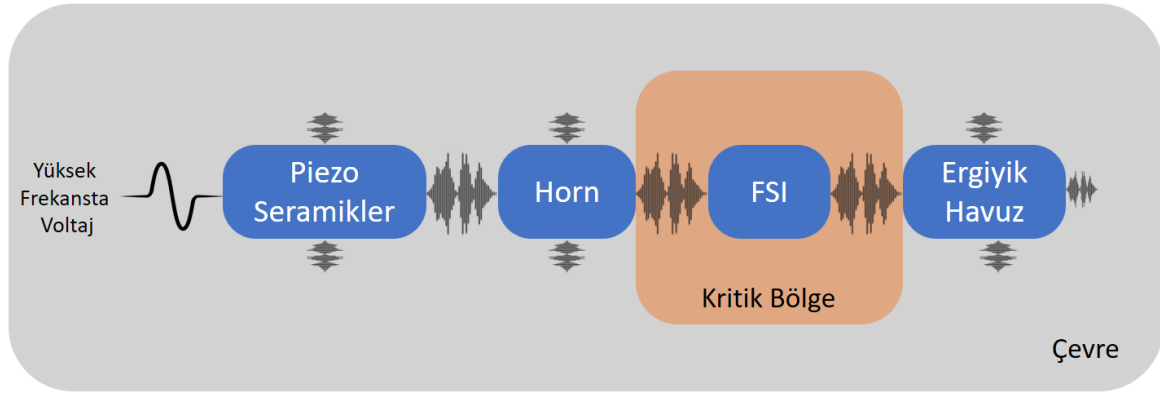
tepkisinin değişiminin irdelenmesi genel hatlarıyla tartışmak hedeflenmiştir. Analitik modelin şematik gösterimi Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Sistemin analitik model kurgusu

Sayısal çalışmalar, titreşimin üretilmesi ve yayılması sürecini detayları ile analiz etmek, anlamak ve deneysel çalışmalara başlamadan önce çalışmanın amacına uygun sistemin üretilmesi amacıyla ele alınmıştır. Sayısal çalışmalar ele alınmadan önce analiz kurgusunun yapılabilmesi için titreşimin ilerleyişi not edilmiş, iyileşmenin elde edildiği bölge hedef olarak alınmış, iyileşmeyi tetikleyen etkilerin modellenmesine odaklanılmıştır (Şekil 3.4).

Yüksek frekansta gerilim ile beslenen piezo seramikler zorlanmış olarak ilgili frekansta şekil değiştirir. Elde edilen periyodik şekil değişimi sonik dalgalar halinde horna, daha sonra ise katı-sıvı arayüzüne iletilir. Her bir aşamada enerji çevreye de aktarılarak kaybedilir. Ergiyik havuzun cidarını ifade eden katı-sıvı arayüzünün (FSI) periyodik hareketi ergiyik havuzda elde edilen titreşimin enerjisini, dolayısı ile tüm akustik etkileri, belirleyen kritik bölgedir.



Şekil 3.4. Titreşimin ilerleyişi ve kritik bölge

Ergiyik havuzda elde edilen ultrasonik enerji yoğunluğu, Denklem (1)'den de anlaşılacağı üzere ultrasonik enerjinin ergiyik havuza girdiği katı-sıvı etkileşim arayüzü (FSI) bölgesinin hareketine bağlıdır. FSI arayüzünün genlik ve frekans değeri, ergiyik havuzun içerisine yayılacak olan basınç dalgalarının genlik ve frekansını dolayısı ile ultrasonik enerji yoğunluğunu belirler. Çalışmalara başlarken ele alınan ilk titreşim analizleri ergiyik havuzun içerisindeki basınç dalgalarına yönelik kurgulanmış, yapılan analizlerde titreşim enerjisinin FSI bölgesinin hareketine bağımlılığı tespit edilmiştir. Kritik etkinin FSI'ın hareketi olduğu tespit edilmesi ile birlikte takip eden analizlerde ergiyik havuz analizi, analiz yükünün hafifletilmesi hedeflenerek elimine edilmiştir. Ergiyik havuzun bulunduğu nokta FSI olarak kabul edilerek ilgili noktanın frekans ve genlik değerinin tespitine odaklanılmıştır.

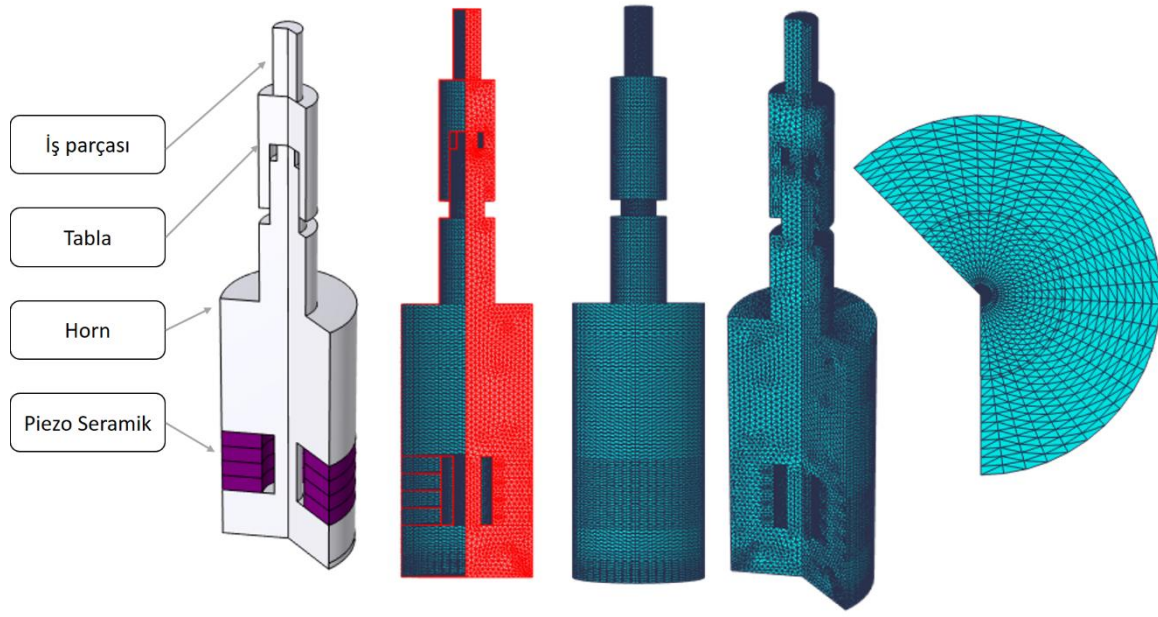
Sayısal çalışmalar; ilgili zaman adımıyla ergiyik havuzun konumlandığı düşünülen noktanın titreşimine ait verilerin tespitine odaklanmıştır. Sayısal çalışmalardan elde edilen veriler ultrasonik enerjinin yoğunluğunun büyütülen geometri boyunca nasıl değiştiğinin tespiti için yapılmış, elde edilen veriler deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak tartışılmıştır. Çalışmalara öncelikle sistemin analitik çözümü yapılarak başlanmıştır.

Ultrasonik titreşim analizleri, yüksek frekansta şekil değişimlerinin irdelenmesi gereken analizlerdir. Titreşim dalgalar halinde yayılmakta, kullanılan üreteç ise bir AC akım ile çalışmaktadır. Piezoelektrik kristallerinin tetik karakteristikleri, AC akım dolayısı ile bir sinüs dalgası gibi oluşmaktadır. Yapılan analizlerde deneysel altyapıya uygun olarak piezoelektrik kristallere saniyede 20.400 kez tetik verilmiştir. Bir sinüs dalgası başlangıç, çukur, nötr, tepe ve bitişten oluşan 5 kritik noktaya sahiptir. Bu durum analizlerin çözünürlüğünün frekans olarak en az 20.400'ün 5 katı olan 102 kHz olması anlamına

gelmektedir. Çözünürlüğü bir kademe daha artırmak için noktalar arasına birer aralık değeri girildiğinde başlangıçtan bitişe 9 adım oluşmakta bu durumda ise 20.400'ün 9 katı olan 183600Hz frekans çözünürlüğüne sahip analizlerin kurgulanması gerekmektedir. Özetlemek gerekirse kurgulanan analizlerin zaman adımının saniyenin 183600'de biri kadar olması gerekliliği açığa çıkmaktadır. Ultrasonik titreşim analizlerinde mekanik deformasyon elde edilmekte, özellikle yüksek düğüm noktasına sahip sayısal çalışmalarda her bir nodun deformasyon verisinin zamana bağlı hesaplanması işlem ve depolama hacmini zorlamaktadır. Ultrasonik titreşim analizleri için işlem kapasitesi ve işlem yükü dengesine bakıldığında analiz edilen sistemin boyutları büyüdükçe her bir düğüm noktasının çözümü için 1 saniyelik bir analizde iş yükü açısından çözüm elde etmek imkan dahilinden çıkmaktadır.

DbD (nokta ile yığma) geometrisi seçilirken dikkate alınan hususlardan biri de işlem hacminin küçük tutulması gerekliliğidir. Bu durum da göz önüne alınmış ve sistem tasarımı bu şekilde kurgulanmıştır. Piezoelektrik seramiklerin dairesel olması sebebiyle eksenel simetrik bir yapı sistem tasarımında kullanılmış ve tek eksenle büyütülerek geometri inşa edilirken nokta ile yığma metodu kullanılmıştır. Bu metotta nokta kaynağı metodu ile üst üste yığmalar gerçekleştirilir. Büyüme tek eksenle meydana gelir. Büyümenin yukarı doğru tek eksen olması da sayısal çalışmalarda kolaylık sağlamış, titreşimin tek bir boyutta ilerleme davranışı irdelenmiştir. DbD geometrisinin kullanılmasındaki en önemli neden, katılma esnasında soğuma hızı, kompleks termal gradyan oluşumu ve geçiş sıcaklığında dalgalanmalar gibi katılma dinamiğine etki eden faktörlerin minimize edilmesi ihtiyacıdır. Dbd geometrisi sayesinde ultrasonik enerjinin katılma dinamikleri içerisindeki etkisi izole edilerek irdelenebilmiştir.

Sayısal çalışmalar çoklu fizik uygulamalarında sayısal çözüme imkan veren COMSOL yazılımı kullanılarak ele alınmış, analizlerde ergiyik havuz modellenmemiş, ergiyik havuzun bulunduğu noktanın titreşim davranışı ele alınmıştır. Tabla, iş parçasının üzerine yığıldığı geometriyi ifade etmektedir. İş parçası ise katman katman veya nokta nokta yükseltilebilir geometriyi ifade etmektedir. İş parçası her bir katman için ilgili yükseklikte modellenerek analizler ele alınmıştır. Başlangıç yüksekliği 2,5 mm olarak ele alınmış, her 1,5 mm yükseklik aralığı için iş parçası yükseltilebilir analizler icra edilmiştir. Analiz modeli Şekil 3.5'de gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Analiz modeli

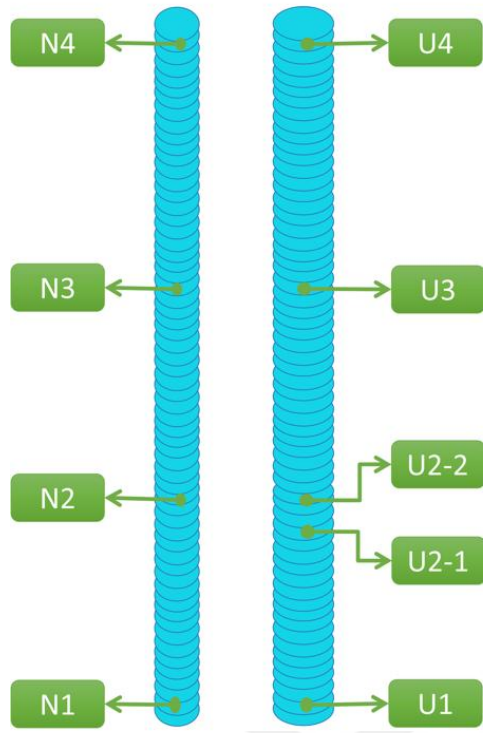
Yapılan analizlerde iki fizik aynı anda çözülmüştür. Birincisi elektro-statik fiziğidir. Bu fizikte piezoseramiklere elektriksel gerilim verilerek onların genişip büzülmelerinin kurgusu tanımlanarak modellenmiştir. İkinci fizik ise katı mekaniğidir. Piezoseramiklerin gerilim altından genişip büzülmesi ile tetiklenen sistem, piezoseramiklerin cidarından deformasyon dalgalarını horna aktarmakta, horn üzerinden titreşim tablaya geçmektedir. Analiz eksenel simetrik olarak kurgulanmış ve zaman adımı frekansa uygun bir şekilde $1/183600$ sn olarak seçilmiştir. Yapılan analizlerin uzunluğu ise $3000 \mu s$ olarak sınırlandırılmıştır. Yapılan analizler $3000 \mu s$ boyunca ele alınmıştır. Analiz süreleri belirlenirken deformasyon karakteristiğinin tamamen açığa çıkması dikkate alınmıştır. Her bir katman için analiz yapılmış, ilk katman yüksekliği $2,5 \text{ mm}$ diğer katman yükseklikleri $1,5 \text{ mm}$ olarak analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda en üst katmanın orta noktasının hız değeri dikkate alınarak ilerlenmiştir. Karşılaştırma yapılırken, her bir katman için yapılan $3000 \mu s$ 'lik analizde ortalama hız değeri kullanılmıştır. Sistemde PZT-8 olarak bilinen piezo seramik malzemeler kullanılmış, analizde de aynı malzeme seçilmiştir.

Deneysel çalışmada katmanlar arası geçiş sıcaklığı 150^0 olarak belirlenmiş, yığmanın başlaması için ön şart olarak yığmanın yapıldığı son yüksekliğin 150^0 'ye düşmesi beklenmiş, sıcaklık değerine düşülmesi ile yığma devam etmiştir. Ek bir ısıtıcı kullanılmadığından ilk katman için geçiş sıcaklığı 150^0 olarak belirlenememiştir. Bu durum ve tablanın geometrik durumu sebebiyle ilk katmanda yüksek soğuma etkisi ile katman yüksekliği daha fazla elde

edilmektedir. Bu sebep ile ilk katmanın yüksekliği 2,5mm olarak ele alınmıştır. Takip eden katmanlar için 1,5mm olarak analizler kurgulanmıştır.

3.4. Mikroyapı Analizleri

Yığılan numunelerden iki tanesi detaylı mikroyapı analizlerine tabi tutulmuştur. Bunlardan birinci ultrasonik destek verilmeden yığılan numunedir. Diđeri ise 50W güçte ultrasonik destek verilerek yığılan numunedir. Sayısal analizlerden çıkan sonuçlar yükseklik boyunca farklı noktalarda ergiyik havuza iletilen enerjinin farklı noktalarda farklı miktarda olduğunu ortaya koymuştur. Ultrasonik enerji yoğunluğunun her bir katmanda farklı elde edilmesi, ergiyik havuzda katılaşma dinamiklerinin her bir katmanda farklı seviyelerde ortaya çıkması anlamına gelmektedir. Katılaşmada ultrasonik enerji yoğunluğunun farklı kademelerden elde edilmesinin mikroyapıya etkisi farklı yüksekliklerde mikroyapı analizi yapılarak değerlendirilmiştir. Hem ultrasonik enerji desteği verilmeyen numunenin hem de 50W ultrasonik desteği verilen numunenin benzer yüksekliklerinden EBSD ölçümleri yapılarak sonuçlar birbirleri ile ve kendi içlerinde karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Ultrasonik destekli numunede 35,5 mm yükseklikte enerji seviyeleri çok hızlı değiştiğinden ve etkinin olumlu ve olumsuz yönlerinin ortaya konması açısından önemli görüldüğünden ilgili yükseklik civarından iki adet bölge sečilerek incelenmiştir.



Şekil 3.6. EBSD analizi yapılan bölgeler ve isimlendirmeleri

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

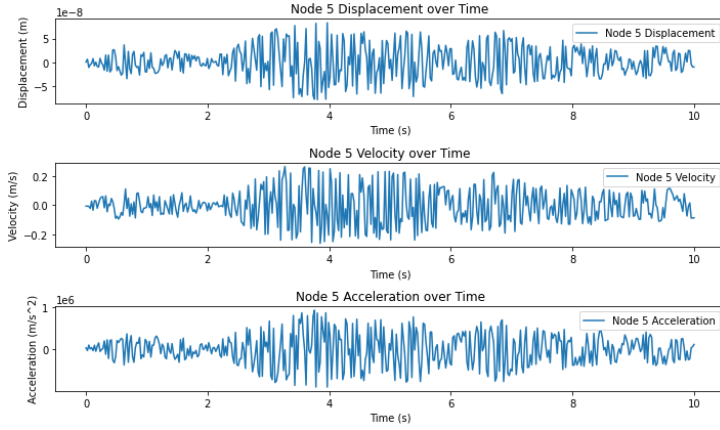
Bu bölümde sayısal ve deneysel çalışmalara ait sonuçlar verilerek, sonuçlar kendi içlerinde ve karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Öncelikle sayısal analizlerde elde edilen veriler ortaya konarak tartışılmış, akabinde deneysel çalışmalarda elde edilen veriler ele alınmıştır. Mikroyapı ve mekanik özellikler elde edilen veriler üzerinden tartışılmıştır.

4.1. Analitik ve Sayısal Çalışmalar

4.1.1. Analitik çalışmaya ait sonuçlar

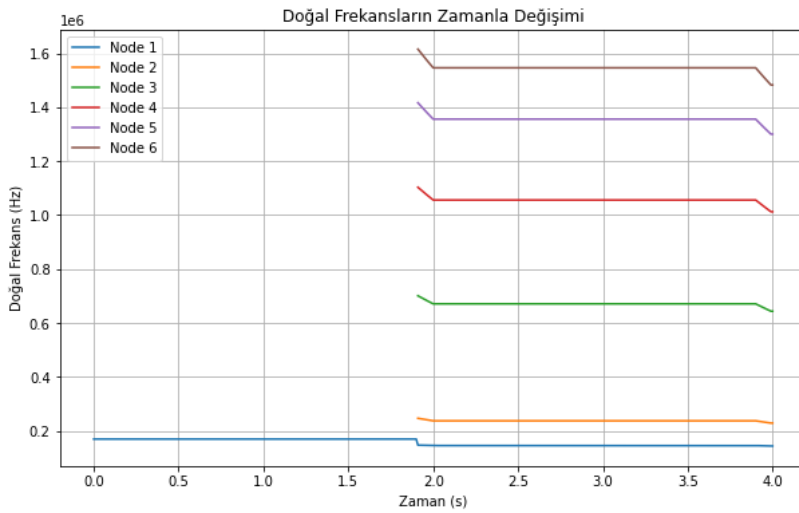
Sayısal çalışmalar ergiyik havuzun bulunduğu noktanın deformasyon verilerinin elde edilmesine yönelik kurgulanmış ve icra edilmiştir. Şekil 4.2’de sunulmuş olan titreşim sisteminin yığılan katmanını temsil eden en yüksek noktasının zamana bağlı deformasyon hızları her bir katman için elde edilmiştir. Denklem (1)’de belirtildiği üzere literatürde bahsedilen iyileştirmeleri açığa çıkaran dinamik basınç ilgili noktanın hız değerine göre oluşmaktadır. Bu noktanın hız değeri ultrasonik enerjinin seviyesini ve mikroyapıda elde edilebilecek iyileşmeleri temsil edecektir.

Yapılan çözümlemeler neticesinde tek ekseninde büyüyen bir geometride sistemde kütle arttıkça doğal frekans değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu değişim irdelendiğinde sadece titreşime verilen tepki değişmekle kalmamakta sistem için (7) numaralı denklem takımı matris olarak çözüldüğünde her bir düğüm noktasının sahip olduğu deformasyon miktarının kütle artışına bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir. Analitik çalışmalar, Python programı kullanılarak kodlanan grafiklerden bir örnek Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bu çalışmada her iki saniyede bir 1,5 mm’lik bir katman eklendiği düşünülmüş, sistem düşük bir frekansta zorlanmış titreşime tabi tutulmuştur. Şekil 4.1’de sistemin en üst noktasını temsil eden 5 numaralı düğüm noktasına 2 saniyelik aralıklarda kütle girdisi yapılmaktadır. Sistemin tetikleme frekansı ve kuvveti aynı olmasına rağmen titreşimin kütle girişi yapılan noktalarında genlik karakteristiğinin değiştiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.1. 5 numaralı düğüm noktası için elde edilen zamana bağlı sonuçlar

Şekil 4.2’de sisteme kütle girişinin mod noktalarını nasıl değiştirdiği görülmektedir. Şekilde ikinci ve dördüncü saniyeden hemen önce sisteme kütle girişi tanımlanmıştır. Kütlenin artması ile birlikte sistemin sahip olduğu altı doğal frekans noktası da azalma göstermiştir. Sistemin doğal frekansını ifade eden denklem (6)’da kütle artışının sistemin doğal frekans değerlerini aşağı çekeği K’nın sabit olduğu durum için görülmektedir.

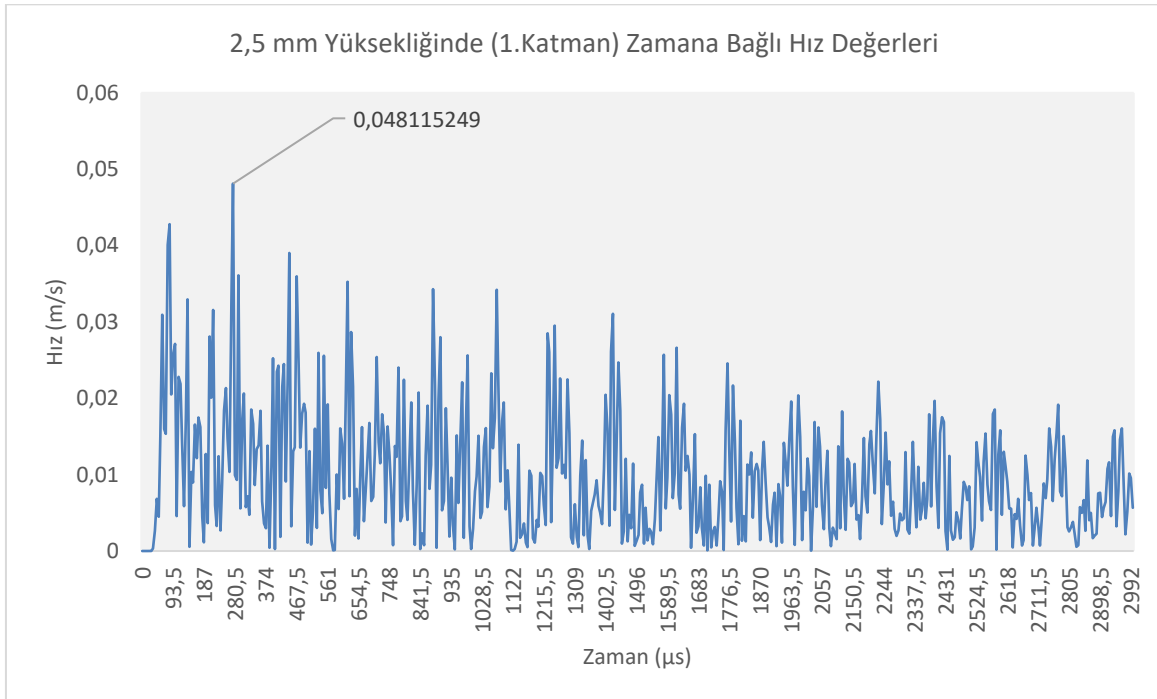


Şekil 4.2. Zamana bağlı doğal frekans değişimi

4.1.2. Farklı yüksekliklerde elde edilen zamana bağlı hız değerleri

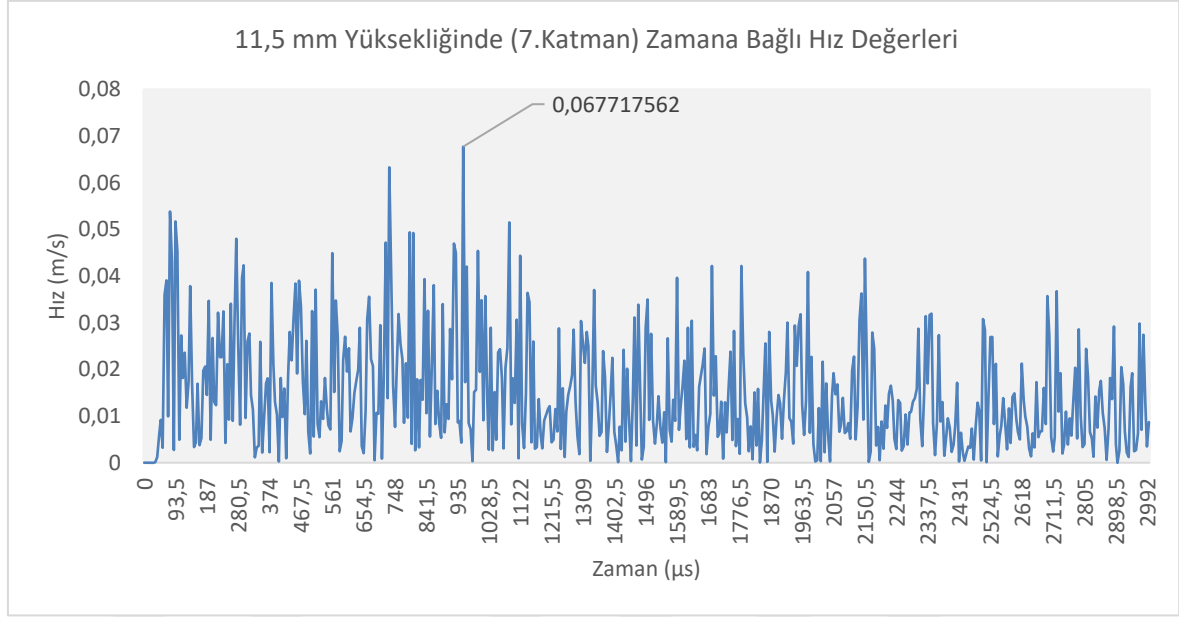
Analizlere 2,5 mm parça yüksekliğinden başlanarak, her bir yığma için 1,5 mm katman yüksekliği ile 101,5 mm ye kadar devam edilmiştir. Her bir katmanda elde edilen en yüksek hız değeri not edilmiş, karakteristik farkını açıkça ortaya koyan katmanların 3000 μ s boyunca hız değerleri detaylandırılmıştır. Her bir katmanın birbirleri ile kıyaslaması en yüksek hız değeri üzerinden yapılmıştır.

Şekil 4.3’de 2,5 mm yükseklikte ultrasonik üretelin piezoelektrik kristallere 20,4kHz frekansta voltaj uygulaması ile sistemin en uç noktasında elde edilen deformasyona dair hız değerleri verilmektedir. Grafiğe bakıldığında maksimum hızın 0,0481 m/s olduğu görülmektedir. Titreşim sonucunda elde edilen hız değeri analiz süresinin başlarında kendi içindeki kıyasla daha yüksek iken, sürekli ve düzenli olarak sabit enerji ve sabit frekans altında titreştirilmesine rağmen verilen enerjinin sistem tarafından sönümlendiği ve titreşim sonucunda elde edilen hızın genliğinin zamanla azalarak devam ettiği gözlemlenmektedir.



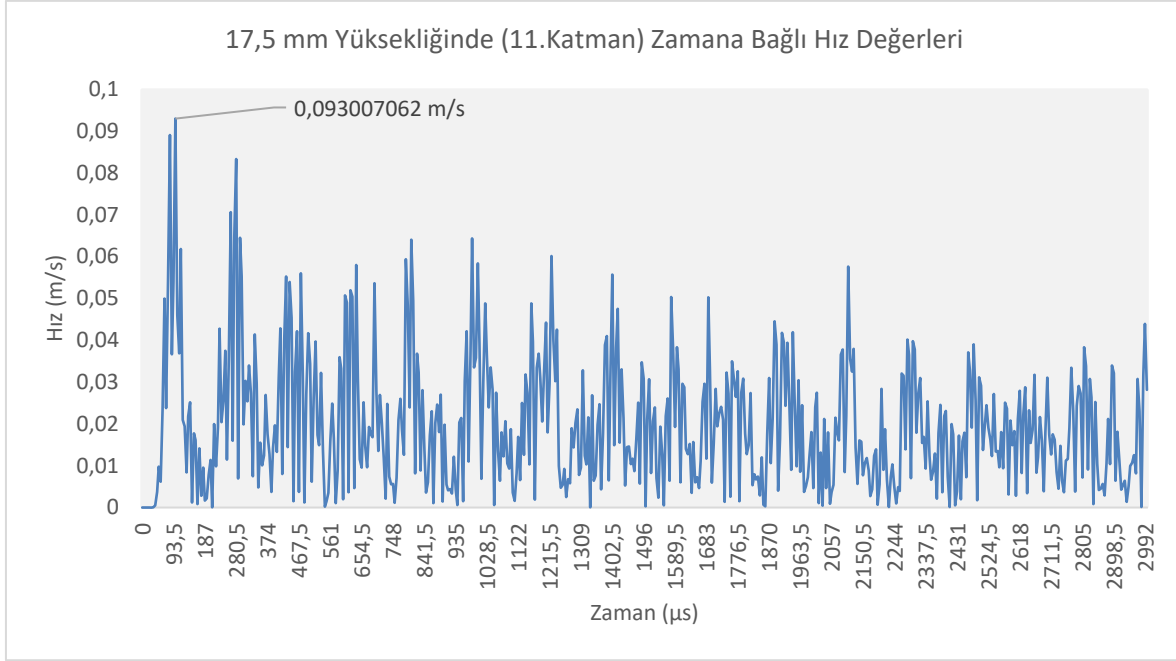
Şekil 4.3. 2,5 mm yüksekliğinde (1.katman) zamana bağlı hız değerleri

Şekil 4.4’de yedinci katmanda elde edilen zamana bağlı hız grafiği verilmektedir. Birinci katmanda en yüksek hız 0,048 m/s iken yedinci katmanda en yüksek hız değeri 0,067 m/s hıza, yaklaşık olarak 1,4 katına çıkmıştır. Ultrasonik enerji, hızın karesi ile doğru orantılı olduğundan, kıyaslanan hızların katının karesi elde edilen ultrasonik enerji farkını ortaya koymaktadır. Birinci katman ve yedinci katman kıyaslandığında iki durumda da sisteme verilen ultrasonik güç girdisi aynı olmasına ve kütleinin artmış olmasına rağmen elde edilen deformasyona ait hız miktarının önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu durum sistemin sönümleme kabiliyeti ile alakalı olup, sönümleme etkisi azaldığı için hız değeri artmaya devam etmiş, hız değeri belirli bir miktara gelmesi ile birlikte sönümleme etkisi hızın bir çarpanı olarak üstün gelmeye başlamıştır. Bu durum sebebiyle maksimum hızdan sonra sistemin hız değerleri sönümlenerek kendi içinde aşağı doğru seyretmeye devam etmiştir.



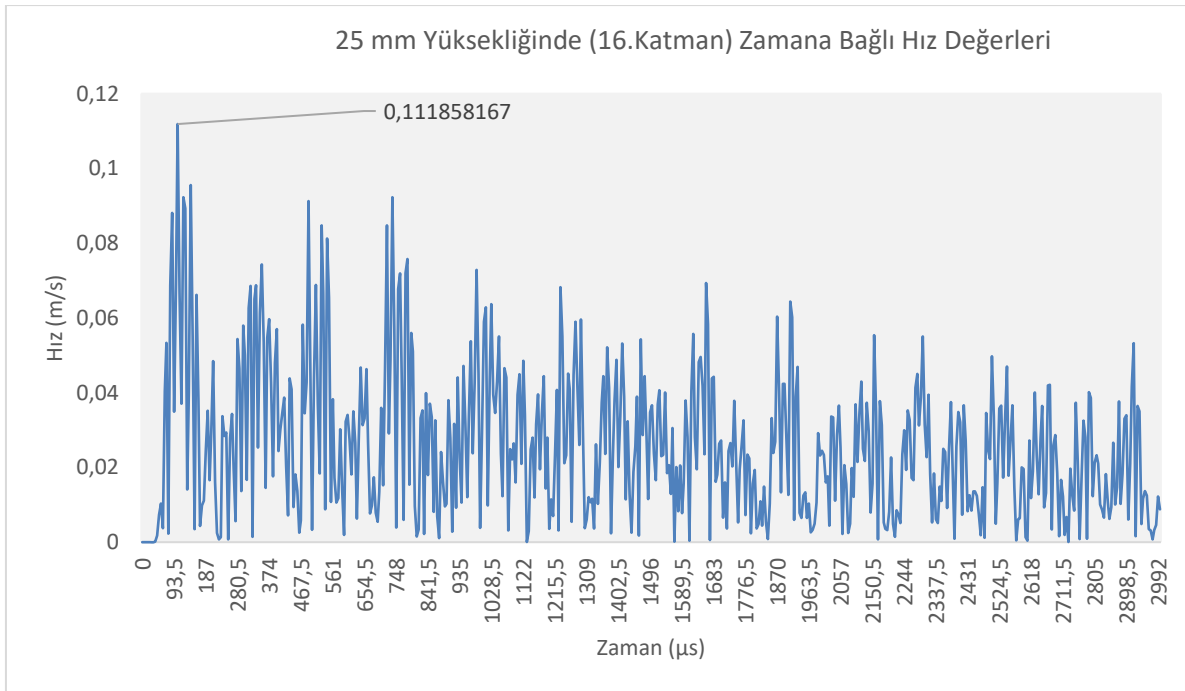
Şekil 4.4. 11,5 mm yüksekliğinde (7.katman) zamana bağlı hız değerleri

On birinci katmanın yığılması sürecine Şekil 4.5'te bakıldığında maksimum hızın 0,093 m/s hıza geldiği görülmektedir. Bu değer birinci katmanda elde edilen maksimum hızın yaklaşık olarak 1,93 katına tekabül ediyorken, yedinci katmanda elde edilen en yüksek hız değerinin yaklaşık 1,4 katıdır. Benzer bir fark burada da görülmektedir. Sistemin kütlesi artmış, sisteme verilen güç miktarı sabit ve birim kütle başına düşen enerji miktarı azalmış olmasına rağmen, elde edilen hızların önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu durum sönümlemenin sistem üzerinde sahip olduğu etki ile açıklanmakta, birinci katman ve yedinci katmanın arasında gerçekleşen farklılık durumu burada da kendini göstermektedir.



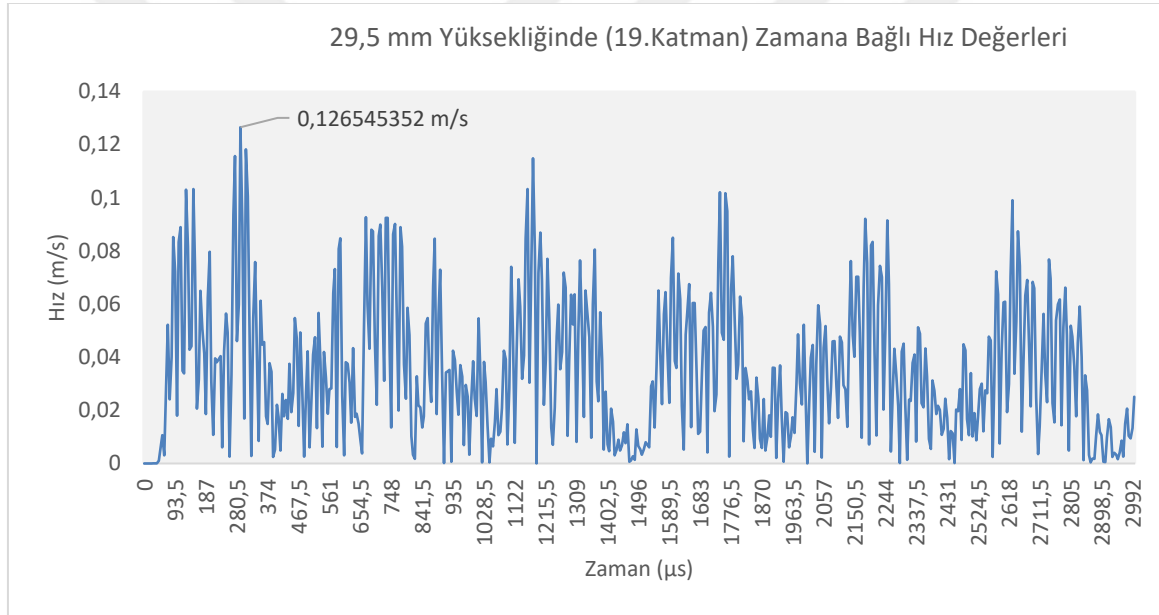
Şekil 4.5. 17,5 mm yüksekliğinde (11.katman) zamana bağlı hız değerleri

Şekil 4.6’te on altıncı katman için elde edilen hız grafiği verilmiştir. En yüksek hız değerinin 0,112 m/s olduğu görülmektedir. Bu değer, bir, yedi ve on birinci katmanlara kıyasla yüksek bir değer olup, sönümlleme etkisinin azalmaya devam ettiği, hızların daha yüksek elde edildiği görülmektedir.



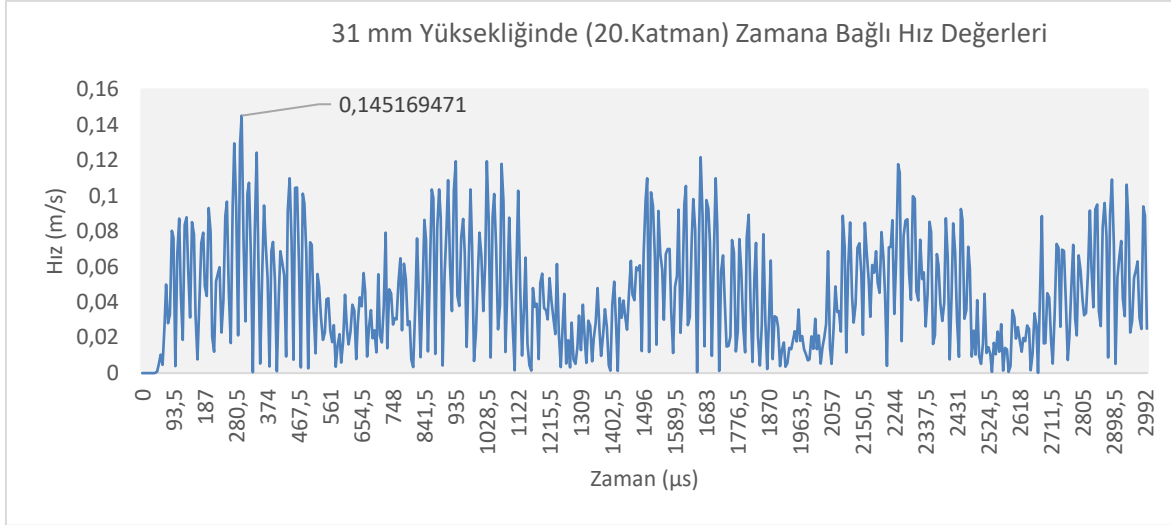
Şekil 4.6. 25 mm yüksekliğinde (16.katman) zamana bağlı hız değerleri

Şekil 4.7’te ergiyik havuzun bulunduğu varsayılan sistemin en üst noktasının sahip olduğu zamana bağlı hız profilinin bir karakteristik kazanmaya başladığı görülmektedir. Öncelikle ultrasonik tetiklenme sonucunda, hız bir noktaya kadar artmakta, hızın belirli bir yüksekliğe ulaşmasından sonra sönümlenme ile kaybedilen enerji de artmaktadır. Sönümlenme baskın çıkmakta ve sisteme verilen enerji sönümlenerek deformasyon hızı durağan noktaya ulaşmaktadır. Durağan noktaya gelen sistem, tetiklenme devam ettiği için, hızın azalması ve sönümlenme ile kaybedilen enerjinin azalması ile birlikte tekrar deformasyon enerjisi birikmeye başlamakta, deformasyon hızı yükselmektedir. Deformasyon hızının oluşturduğu hareket karakteristik bir şekilde değişmekte, belirli periyotlarda tekrar etmeye başladığı görülmektedir.



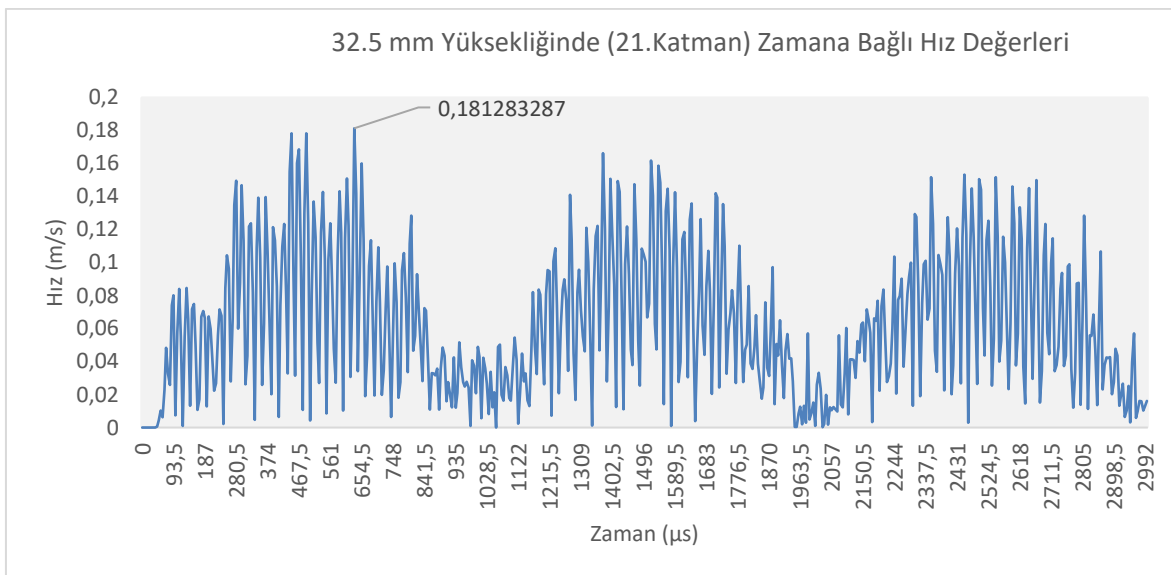
Şekil 4.7. 29,5 mm yüksekliğinde (19.katman) zamana bağlı hız değerleri

Yirminci katmanın deformasyon grafiğine Şekil 4.8’da bakıldığında karakteristiğın daha belirgin hale geldiği, bununla birlikte maksimum hız değeri de artmaya devam ettiği görülmektedir.

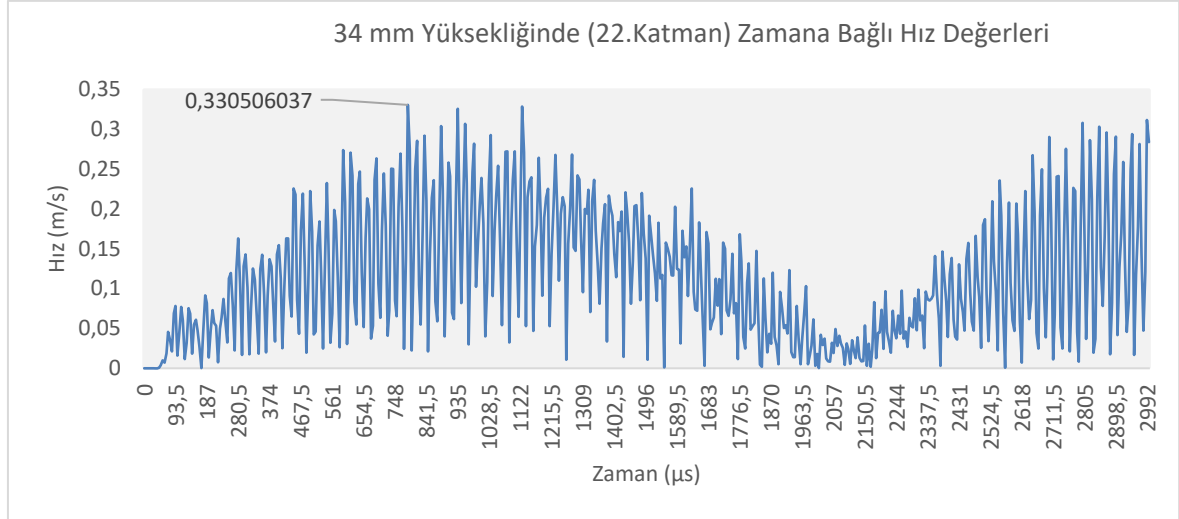


Şekil 4.8. 31mm yüksekliğinde (20.katman) zamana bağlı hız değerleri

Yirmi bir (Şekil 4.9) ve yirmi ikinci katmanlara (Şekil 4.10) bakıldığında karakteristik daha belirgin hale gelmekte, birbirini tekrarlayan periyotların zaman aralığı artmakla birlikte maksimum hız değerinin artmaya devam ettiği görülmektedir. Yirminci katmanda maksimum hız değeri 0,145m/s iken yirmi birinci katmanda bu değer 0,181 m/s olmuştur. Maksimum hız değerinde artış, ilk katmanların birbirleri arasındaki farka kıyasla önemli ölçüde artmıştır. Katmanlar yükseldikçe sönmüleme etkisinin azalma eğiliminin artarak devam ettiği gözlemlenmektedir. Sistemin sabit enerji ile beslenmesine ve kütlenin artıyor olmasına rağmen deformasyon hızının arttığı gözlemlenmeye devam edilmiştir.

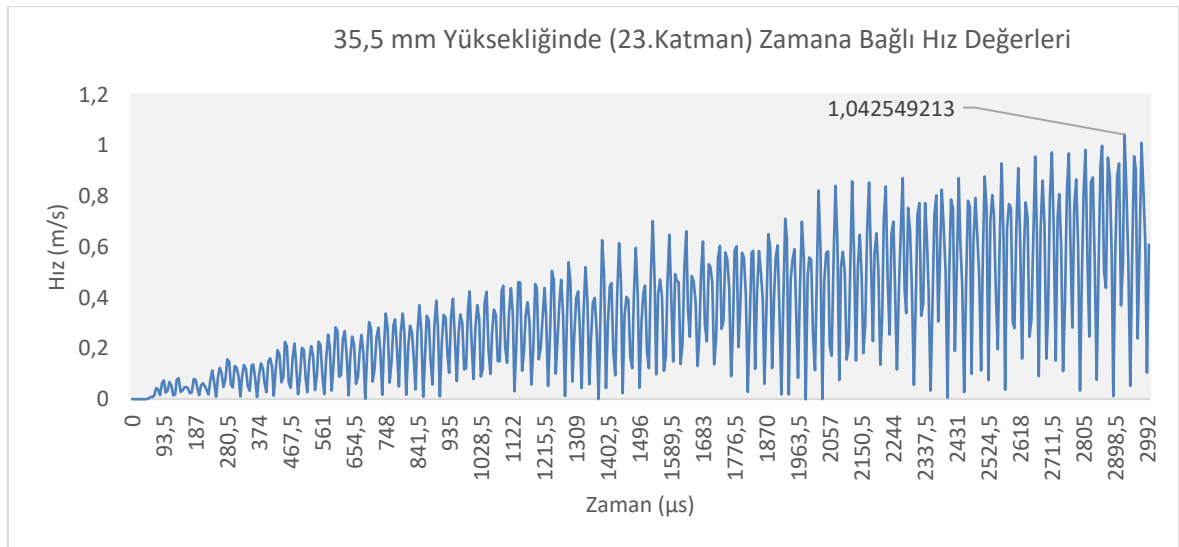


Şekil 4.9. 32,5 mm yüksekliğinde (21.katman) zamana bağlı hız değerleri



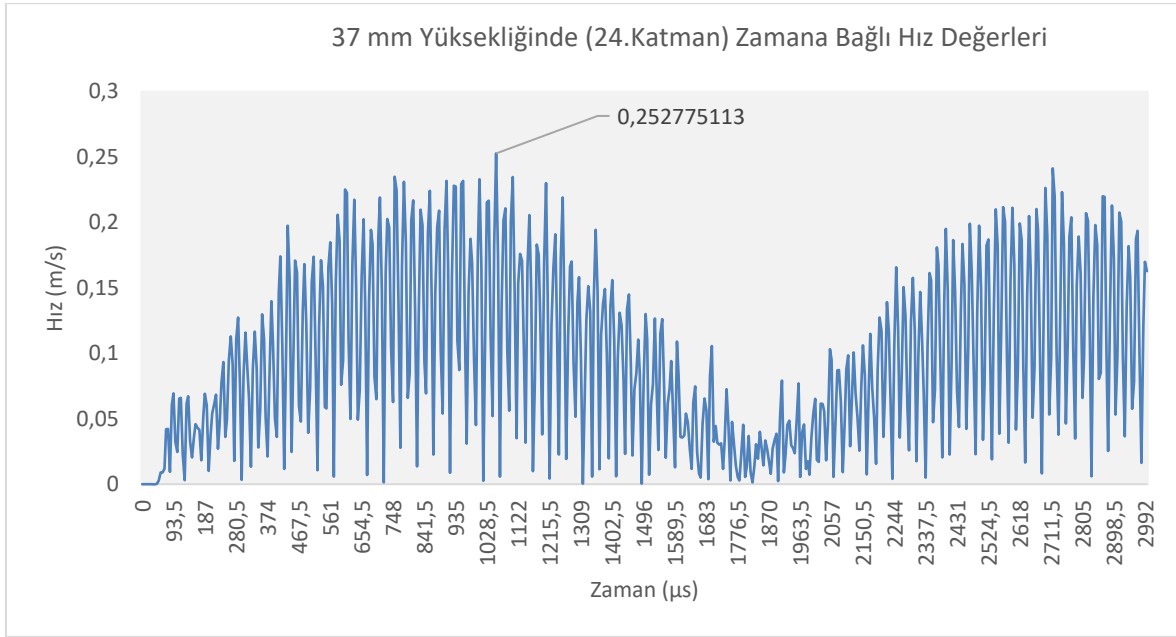
Şekil 4.10. 34 mm yüksekliğinde (22.katman) zamana bağlı hız değerleri

Yükseklik olarak 35,5mm'ye tekabül eden yirmi üçüncü katman, yapılan çalışmada kütle ve geometri değişiminin ultrasonik titreşimde öneminin ortaya konması açısından önemlidir. Yirmi üçüncü katmana gelindiğinde sistemde sönümleme etkisinin 3000µs'lik zaman diliminde henüz hızın çarpan etkisi ile etkin olamadığı bir noktadır. Bu nokta sistemin rezonans noktası olup, sistemin doğal frekansında sistem tetiklenmektedir. Bu sebeple sisteme giren enerji birikimli olarak sistem içerisinde dolaşmakta, biriken enerji artan deformasyon olarak açığa çıkmaktadır. Bu katman yüksekliğinde sönümleme etkisinin neredeyse ortadan kalktığı ve sistemin mod noktasında yahut çok yakın olduğu görülmektedir. Yirmi üçüncü katmanda hız değeri 1 m/s değerini geçmiştir.

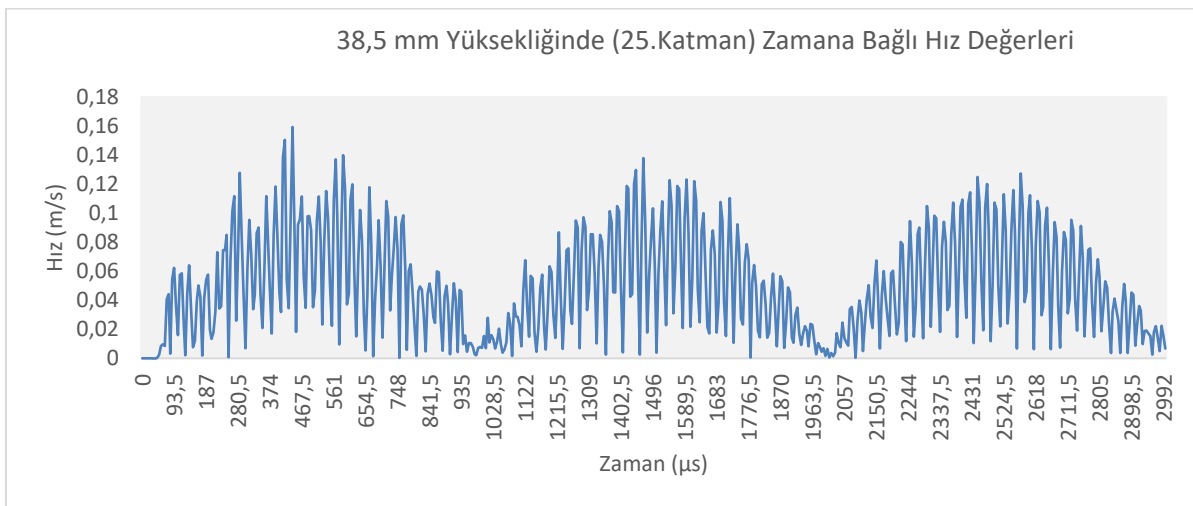


Şekil 4.11. 35,5 mm yüksekliğinde (23.katman) zamana bağlı hız değerleri

Şekil 4.12'a bakıldığında yirmi dördüncü katmanda, yirmi ikinci katmana yakın bir hız profili elde edildiği görülmektedir. Yirmi ikinci katmanda en yüksek hız değeri yaklaşık olarak 0,33m/s iken yirmi dördüncü katmanda bu değer, 0,25m/s dolaylarındadır. 0,25 m/s hız değeri paslanmaz çelik malzeme için yaklaşık olarak 157 W/cm^2 ultrasonik enerji değerine denk gelmektedir. Yirmi beşinci katmanda ise hız profili yirmi birinci katman ile benzer karakteristik göstermektedir.



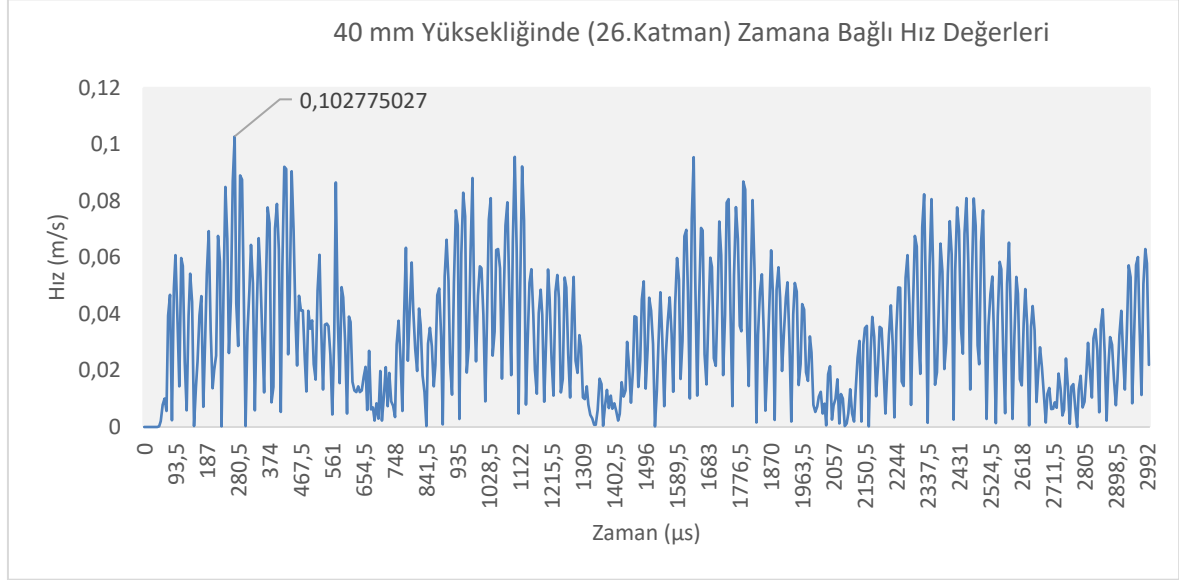
Şekil 4.12. 37 mm yüksekliğinde (24.katman) zamana bağlı hız değerleri



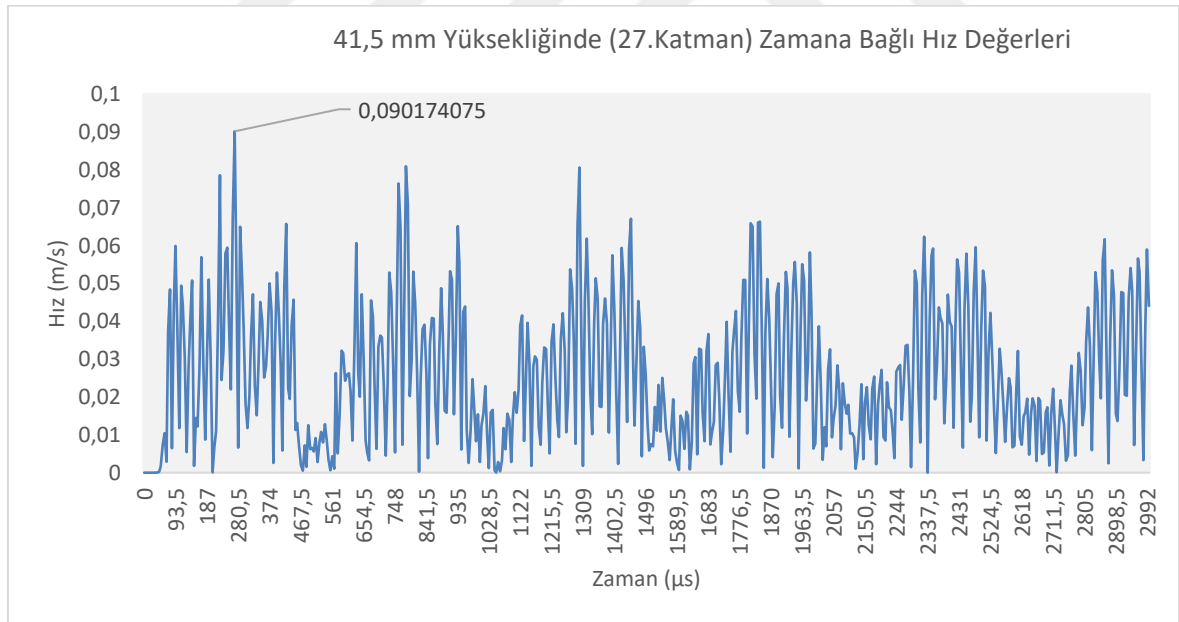
Şekil 4.13. 38,5 mm yüksekliğinde (25.katman) zamana bağlı hız değerleri

26, 27, 35, 43, 51 ve 59. katmanların hız profillerine bakıldığında en yüksek hız değerlerinin tekrar düşmeye başladığı gözlemlenmektedir. Karakteristik olarak ortaya çıkan önce artan

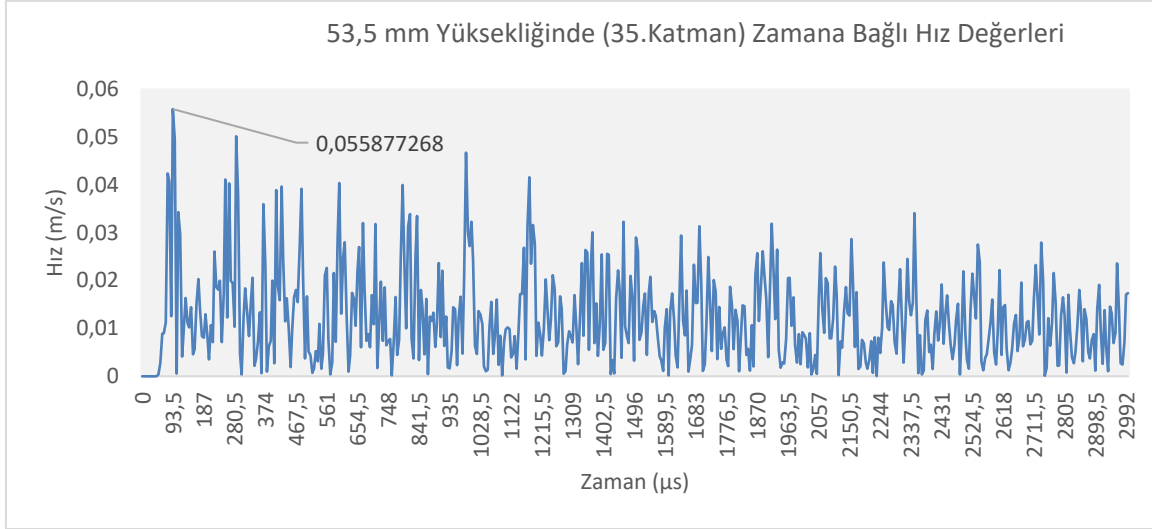
sonra azalan ve periyodik olarak devam eden hız profilinin periyot uzunluklarının azaldığı ve karakteristiğın yükseklik arttıkça dağıldığı ve seçilmesi zorlaştığı görülmektedir.



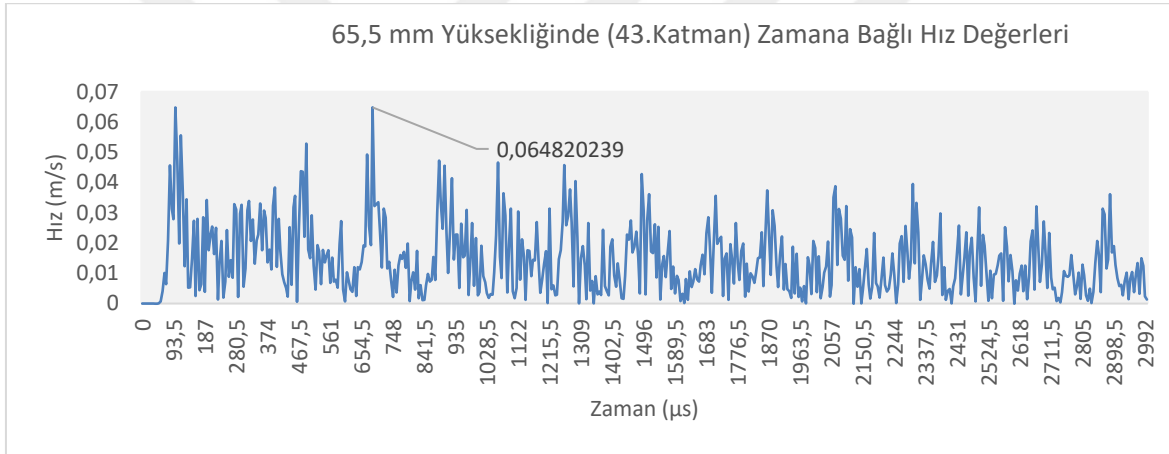
Şekil 4.14. 40 mm yüksekliğinde (26.katman) zamana bağlı hız değerleri



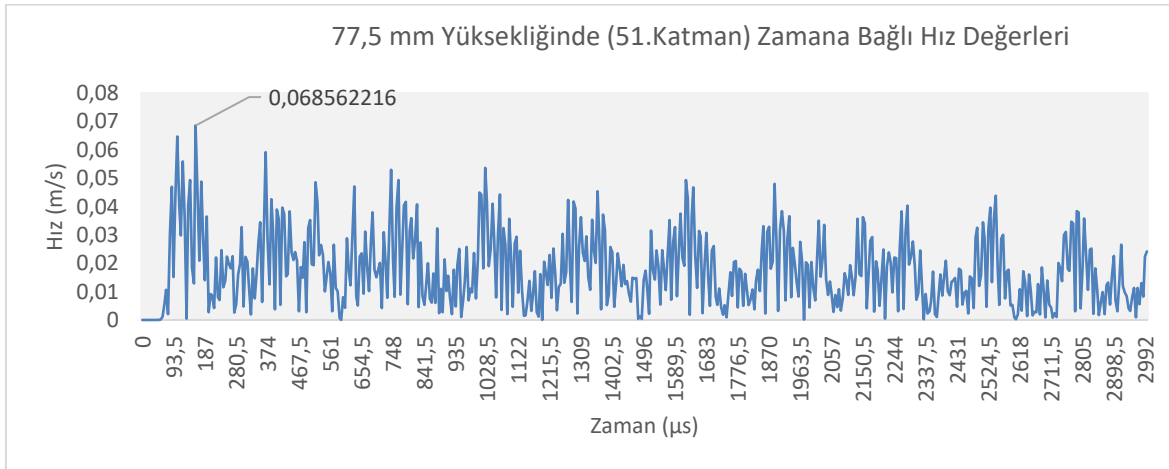
Şekil 4.15. 41,5 mm yüksekliğinde (27.katman) zamana bağlı hız değerleri



Şekil 4.16. 53,5 mm yüksekliğinde (35.katman) zamana bağlı hız değerleri

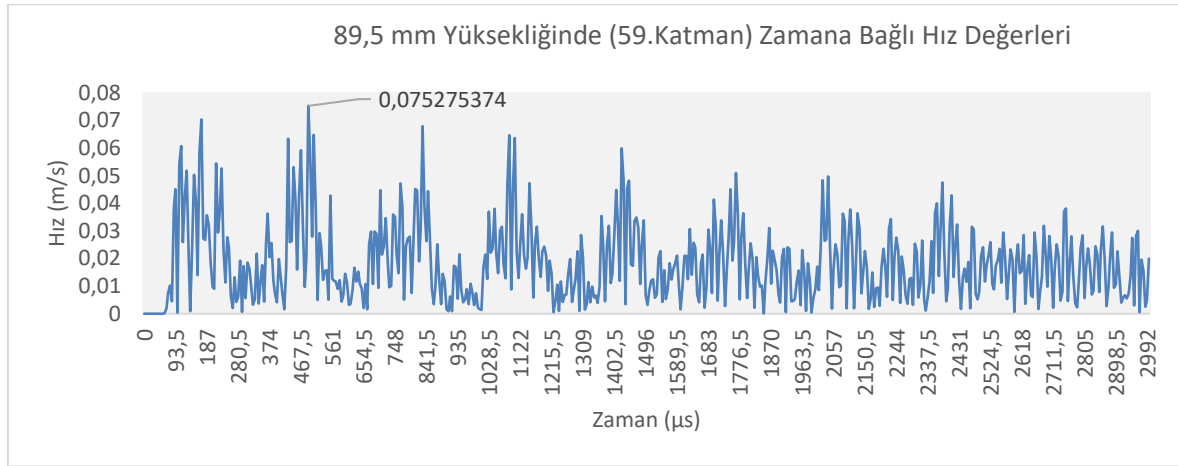


Şekil 4.17. 65,5 mm yüksekliğinde (43.katman) zamana bağlı hız değerleri



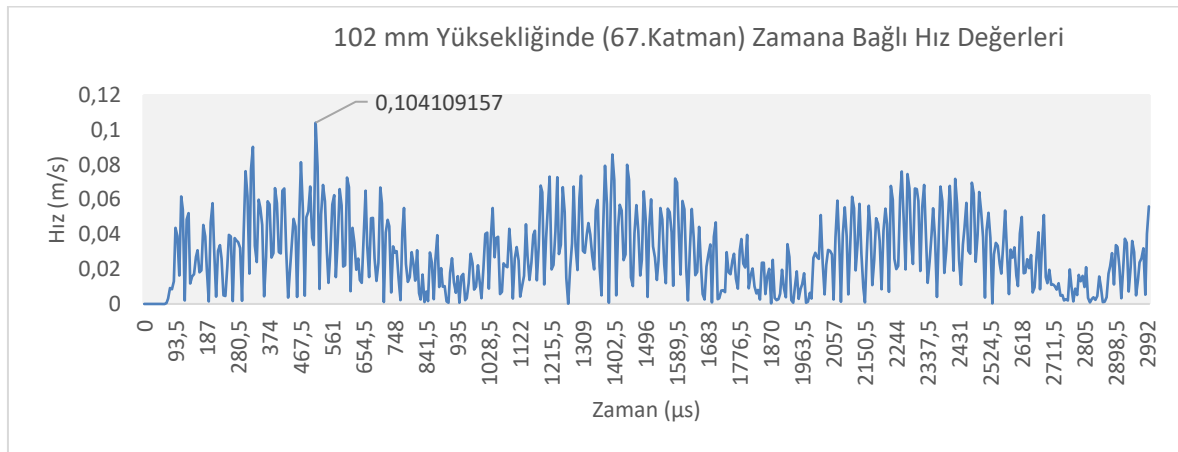
Şekil 4.18. 67,5 mm yüksekliğinde (51.katman) zamana bağlı hız değerleri

Analizlere bakıldığında elli altıncı katmana kadar hız profilindeki azalma devam etmektedir. Elli altıncı katmandan sonra hız profilleri, birinci katmandan itibaren yirmi üçüncü katmana doğru artışın gözlemlendiği gibi yakın bir karakteristik ile artışın başlayarak devam ettiği görülmektedir. Şekil 4.19'de elli dokuzuncu katmanın ve Şekil 4.20'de altmış yedinci katmanın sayısal analizlere göre hız profilleri görülmektedir. Deneysel çalışma da 100 mm yüksekliğe kadar numune yığıldığından, sayısal çalışmalarda bu mertebelere kadar ele alınmıştır.



Şekil 4.19. 89,5 mm yüksekliğinde (59.katman) zamana bağlı hız değerleri

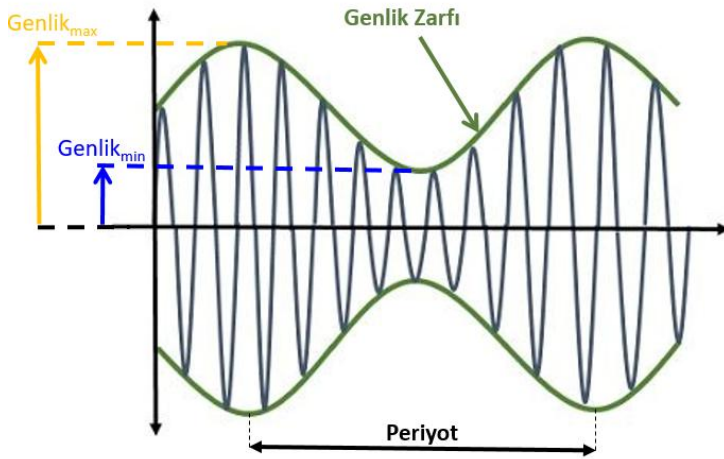
Şekil 4.20'de görüldüğü üzere 102 mm parça yüksekliğinde (67.katman) ait hız profili yirminci ve yirmi birinci katman profillerinin arasında bir profile sahiptir. Bu kıyasla parçanın ilgili frekansta bir başka doğal frekans noktasına yaklaştığını sayısal analizlerden elde ettiğimiz verilerle yorumlayabiliriz.



Şekil 4.20. 102 mm yüksekliğinde (67.katman) zamana bağlı hız değerleri

4.1.3. Titreşim karakteristiği

Titreşimin dalga dalga yayılmasında birçok etki vardır. Bu etkiler içerisinde farklı hızlarda dalgaların birbiri üzerine binmesi, aynı hızda farklı dalgaların birbiri üzerine binmesi ve çevre koşullarının sahip olduğu sönümlleme etkileri ana etkenlerdendir. Doğada bulunan dalgalar dolayısı ile sabit genlikle ilerlemek yerine genliklerin değiştiği bir karakteristik ile ilerlemektedir. Bu durum Genlik (modülasyon) zarfı kavramının ortaya çıkmasına sebebiyet vermiştir. Genlik zarfı, bir sinyalin yahut dalganın genliğini, frekansını veya fazını modüle ederek oluşturulan sinyalin genlik değişimlerini temsil eden bir eğridir. Çalışmalar kapsamında ilk katmandan son katmana kadar tüm katmanlarda Şekil 4.21’de görüldüğü gibi bir dalga karakteristiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.21. Modülasyon (Genlik) zarfı ve periyodunun şematik gösterimi

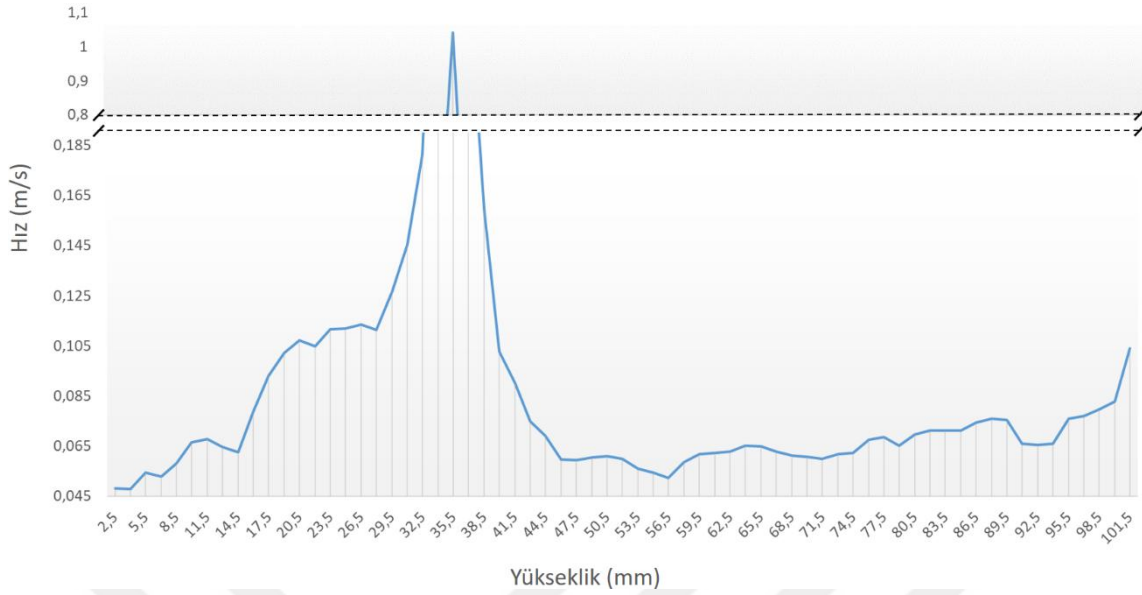
Sönümlleme etkisinin yüksek olduğu bölgelerde genlik değeri yükselmediğinden ve periyotların uzunluğu azaldığından karakteristiğin tespiti zorlaşmakta, fakat detaylı bakıldığında bu karakteristiğin var olduğu görülebilmektedir. Kütle ve geometrinin değişmesi ile birlikte sistemin zorlanma frekansı ile doğal frekansı arasındaki mesafe değişmektedir. Buna bağlı sönümlleme etkisinin farklılaşması durumu ile karşılaşılmaktadır. Genlik zarfının karakteristiği aynı kalmak ile birlikte maksimum genlik değeri ve periyotların uzunluğu değişmektedir. Sönümlleme etkisi azaldıkça sisteme verilen enerji deformasyona dönüşmekte, deformasyonlar birikimli bir şekilde artarak ilerlemektedir. Deformasyonların birikimi ile hız arttıkça, hız sönümllemede bir çarpan olduğundan ve damper etkisi ortaya çıkardığından, sönümlleme artmaktadır. Belirli bir hız değerinden sonra sistem enerjiyi sönümllemekte ve minimum hız değerine kadar sistemi sönümllemektedir.

Deformasyonun birikim hızı bu sebeple yavaşlamakta, hız belirli bir değere ulaştığında sönümleme etkisi baskın çıkmakta ve biriken enerji zamanla sönümlenmektedir. Akabinde enerji kaybı azaldığından sistem maksimum genlik değerine doğru zamanla ilerlemektedir. Bu davranışın periyodik olarak tekrar etmekte olduğu gözlemlenmiştir.

4.1.4. Yükseklik boyunca enerji seviyeleri

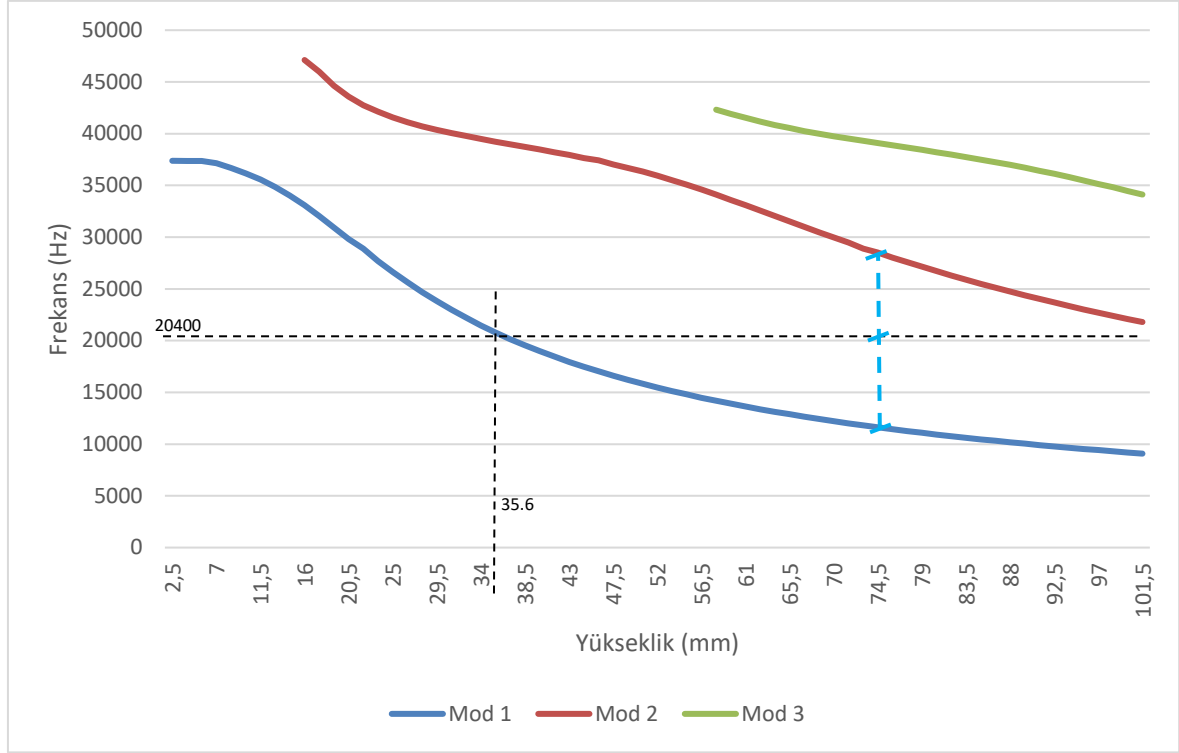
Her bir katmanda elde edilen en yüksek hız değerleri Şekil 4.22’de görselleştirilmiştir. En yüksek hız değeri katman yükseldikçe önce artmaya başlamış, 35,5mm yükseklikte radikal bir artış göstermiştir. Akabinde tekrar azalma eğilimine girmiş ve başlangıç katmanı seviyelerinde bir değere düşmüştür. Takip eden katmanlarda tekrar artış eğilimine girmiş, iş parçasının yükseltilmesinin sonlandırıldığı katmanlarda tekrar radikal artış eğilimine doğru gittiği gözlemlenmiştir. İkinci bir radikal artış gözlemlenmeden katman artımı bitirilmiştir.

Kütle ve geometrinin sistemin kütle matrisini ve rijitlik matrisini değiştirdiğinden dolayı titreşim davranışını değiştirmektedir. Bu sebeple katmana özel titreşim davranışı elde edildiği grafikte açıkça görülmektedir. Kütle ve geometri değişimi sistemin sönümleme kabiliyetini değiştirdiği için bu dalgalı etki görülmektedir. Sönümleme kabiliyetinin en aza indiği nokta olan doğal frekans, belirleyici unsur olarak önümüze çıkmaktadır. Sistem doğal frekansa ne kadar yakınsa sönümleme o denli azalmakta, verilen gücün ergiyik havuzda enerjiye dönüşme miktarı o kadar fazlaşmaktadır. Sönümleme azaldığından sisteme girdi olarak verilen enerji birikimli olarak artarak her bir adımda verilen enerji deformasyona dönüşmektedir.



Şekil 4.22. Sayısal analizlere göre her bir katman yüksekliğinde elde edilen maksimum hız değerleri

35,5 mm civarlarında sistem bir doğal frekans noktasından geçtiği ve katmanlar yükseldikçe tekrar normal sınırlarına indiği gözlemlenmiştir. Akabinde elde edilen hız değerlerinin tekrar artıyor olması ise bir başka doğal frekans noktasına doğru sistemin ilerlemesi sebebiyledir. Şekil 4.23’de bu durum açıkça görülmektedir. Sistemin sahip olduğu doğal frekans değerleri her bir katman için analiz edilmiş ve sonuçlar not edilmiştir. Yapılan modal analizde sistemin sahip olduğu mod noktaları her bir parça yüksekliği için tespit edilmiştir. Parça yükseldikçe doğal frekans değerlerinin her bir katmanda biraz daha azaldığı tespit edilmiştir. 2,5 mm parça yüksekliğinde sistemin sahip olduğu mod değeri 37.378 Hz iken, bu değer 35,5 mm parça yüksekliğinde sistemin zorlanma frekansı olan 20.400 Hz değerine çok yakın bir değere düşmüştür. 35,5 mm yükseklikte sistemin bir başka mod noktası ise 39.220 Hz dolaylarındadır. Kütle artışı devam ettikçe yaklaşık 70 mm yüksekliğe kadar mevcut mod noktasından uzaklaşılırken, bir yandan da bir başka mod noktasına doğru ilerlendiği tespit edilmiştir. Sistem 70 mm yükseklikten sonra diğer mod noktası ve ilgili mod noktasının karakteristik hız profiline doğru evrilmeye başlamıştır. 100 mm yükseklikte ikinci mod değerine çok yaklaştığı yapılan modal analizde görülmüş, sistemin zamana bağlı deformasyon analizlerinde de bu durum hız profillerinden tespit edilmiştir. Yapılan modal analiz, zamana bağlı hız profil verileri ile doğrudan örtüşmektedir. Bu durum, ergiyik havuzda ultrasonik enerji yoğunluğunun kullanılan ultrasonik güç miktarından ziyade, sistemin doğal frekansları ile zorlanma frekansı arasındaki uyum olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.23. Doğal frekans noktalarının yüksekliğe göre değişimi

Sayısal çalışmalar ergiyik havuzun konumlandığı noktanın titreşim sırasında sahip olduğu hız değerlerini ortaya koymuştur. Sistemde tüm parametrelerin sabit olmasına rağmen değişen geometri ve kütlenin ergiyik havuza iletilecek olan enerji seviyesi her katmanda değişmiştir. Sistemin en düşük enerjili katmanı olan birinci katmanda elde edilen deformasyon hızı 0,0521m/s iken, bu hız 6,7 W/cm² enerji değerine tekabül etmektedir. Bununla birlikte sistemin rezonans durumunda elde edilen en yüksek hız değeri 3000µs analiz uzunluğu için 1,042m/s iken buna karşılık gelen enerji değeri 2680 W/cm²'dir. 20 kat hız farkı, ergiyik havuzun içerisine dinamik basıncın ve ultrasonik enerjinin 400 kat değişmesine sebebiyet vermiştir. Elde edilen sonuçlar, eklemeli imalatla ultrasonik enerjinin kullanımında, kullanılan güç miktarının yanı sıra sistemin titreşim karakteristiğinin kütle ve geometri ile değişimi etkisinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

4.2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, robotik kontrollü programlanabilir bir altyapı ile icra edilmiştir. Horn sabitleyici vasıtasıyla bir yere sabitlenmiş, robotik kolun programlanmış hareketi ile yığma işlemleri icra edilmiştir. Yığma işlemleri icra edilirken ultrasonik titreşim aktiftir. Yığma başlamadan önce aktive edilip, 0.9 sn'lik yığma işleminin bitmesinin ardından titreşim

duraklatılmıştır. Bu bölümde yığılan geometrinin fiziksel, mekanik ve mikroyapı bakımından formasyonu incelenmiştir. Sonuçlar sayısal çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

4.2.1. Katman yüksekliği

Tabla üzerinde nokta ile yığma metodu ile yükseltilen iş parçasının katman yüksekliği, her bir katmanda yığılan noktanın yüksekliğine eşittir. Bununla birlikte iş parçasının çapı ise eklenen noktanın çapı olarak elde edilmektedir. Yükseklik ve çap değeri ise katılaşmadan önce eklenen metal ergiyiğin alt katmanı ısıtılabilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Üretim devam ederken her bir katman yığıldıktan sonra yığmanın gerçekleştirileceği en üst nokta 150oC değerine düşmesinin beklenmesi sırasında, kumpas ile yükseltilen iş parçasının tabladan yüksekliği her bir katman için ölçülerek not edilmiştir. Ölçüm iş parçasının en yüksek noktası ile tabla arasında kumpas ile gerçekleştirilmiş ve not edilmiştir. Ultrasonik güç ile desteklenmeyen numuneye ait sonuçlar

Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde katman yüksekliğinin stabil bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Katmanların yaklaşık olarak $2\pm0,5\text{mm}$ dolaylarında katman yüksekliğine sahip olduğu görülmektedir.



Çizelge 4.1. Ultrasonik güç kullanılmadan yığılan numunede katman yükseklikleri

Katman	İş parçasının yüksekliği	Katman Yüksekliği	Katman	İş parçasının yüksekliği	Katman Yüksekliği
1	3,25	3,25	34	53,80	2,20
2	4,95	1,70	35	55,69	1,89
3	6,26	1,31	36	58,09	2,40
4	8,28	2,02	37	60,05	1,96
5	9,64	1,36	38	61,75	1,70
6	11,78	2,14	39	63,90	2,15
7	13,36	1,58	40	66,10	2,20
8	14,90	1,54	41	67,61	1,51
9	17,20	2,30	42	69,72	2,11
10	19,00	1,80	43	71,27	1,55
11	20,5	1,50	44	73,00	1,73
12	22,58	2,08	45	75,20	2,20
13	24,70	2,12	46	77,35	2,15
14	26,30	1,60	47	79,00	1,65
15	28,60	2,30	48	81,10	2,10
16	30,18	1,58	49	82,95	1,85
17	32,63	2,45	50	85,33	2,38
18	34,10	1,47	51	86,70	1,37
19	36,38	2,28	52	89,00	2,30
20	38,48	2,10	53	91,09	2,09
21	40,12	1,64	54	93,00	1,91
22	42,32	2,20	55	95,10	2,10
23	43,89	1,57	56	96,50	1,40
24	45,96	2,07	57	98,60	2,10
25	47,90	1,94	58	100,01	1,41
26	50,00	2,10	59	102,4	2,39
27	51,60	1,60			

Çizelge 4.2’de 50 W ultrasonik güç desteği ile yığılan iş parçasına ait katmanlar ve ilgili katmanlardaki katman yüksekliği ve parça yüksekliği verilmiştir. Ultrasonik güç uygulanan numunede katman yüksekliklerinin azaldığı görülmektedir. Ultrasonik güç ile yığılan numune 67 katmanda 100 mm üstüne çıkmışken, ultrasonik güç kullanılmayan numunede 59 katmanda 100 mm üstüne çıkılabilmektedir. Bu durumun temel sebebi, titreşim sebebiyle ergiyik havuzdaki akışın artması buna bağlı olarak ergiyik havuzun ısıtma kabiliyetinin yükselmesidir. Titreşim enerjisi arttıkça transfer edilen kütle daha yayvan bir şekil almakta ve yüksekliğinden kaybetmektedir. Katamn yüksekliği azaldıkça katmandaki çap artmaktadır. 24. katmanda katman yüksekliğinin sıfırın altında elde edildiği görülmektedir. Yakınlarında ise katman yüksekliğinin diğer katmanlara nazaran daha az elde edildiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2. 50 W ultrasonik güç ile yığılan numunede katman yükseklikleri

Katman	İş parçasının yüksekliği	Katman Yüksekliği	Katman	İş parçasının yüksekliği	Katman Yüksekliği
1	3,4	3,4	34	50,4	1,2
2	6	2,6	35	51,3	0,9
3	7,4	1,4	36	52,85	1,55
4	8,8	1,4	37	54,6	1,75
5	10,7	1,9	38	56,1	1,5
6	12,05	1,35	39	57,9	1,8
7	13,8	1,75	40	59,5	1,6
8	15,1	1,3	41	61	1,5
9	17,05	1,95	42	62,7	1,7
10	18,17	1,12	43	64,4	1,7
11	20,22	2,05	44	66,04	1,64
12	21,6	1,38	45	67,3	1,26
13	22,9	1,3	46	68,8	1,5
14	24,68	1,78	47	70,5	1,7
15	26,4	1,72	48	71,7	1,2
16	27,7	1,3	49	72,6	0,9
17	28,9	1,2	50	74	1,4
18	30,6	1,7	51	75,3	1,3
19	31,27	0,67	52	77,4	2,1
20	32,95	1,68	53	79,06	1,66
21	34,65	1,7	54	81	1,94
22	35,56	0,91	55	82,55	1,55
23	36,55	0,99	56	84,3	1,75
24	36,1	-0,45	57	85,6	1,3
25	37	0,9	58	87,3	1,7
26	38,2	1,2	59	88,3	1
27	39,7	1,5	60	89,6	1,3
28	41,6	1,9	61	91,5	1,9
29	43,25	1,65	62	92,8	1,3
30	44,65	1,4	63	93,7	0,9
31	46	1,35	64	94,8	1,1
32	47,8	1,8	65	96,9	2,1
33	49,2	1,4	66	98,45	1,55
			67	100,2	1,75

Çizelge 4.3'te 75 W ultrasonik güç ile desteklenen üretime ait katman yüksekliği verileri gösterilmektedir. 0 W ile desteklenen numunede 100mm yüksekliğe 59 katmanda ulaşılmışken, 50 ve 75 W numunelerde bu sayı 67 katmandır. Bu durum titreşimli numunelerde katman yüksekliğinde meydana gelen azalmadan kaynaklanmadır. 75 W ile desteklenen numune sonuçları 50 W'a çok benzemek ile birlikte katman yüksekliğinin negatif elde edildiği katman 29.katmandır.

Çizelge 4.3. 75 W ultrasonik güç ile yığılan numunede katman yükseklikleri

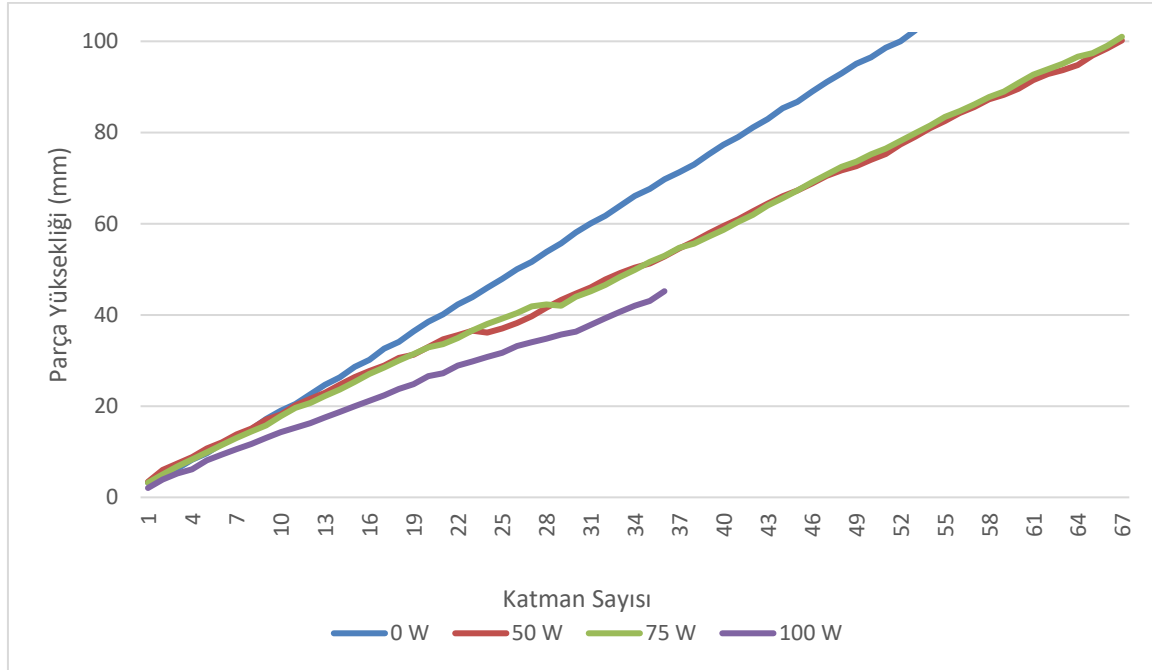
Katman	İş parçasının yüksekliği	Katman Yüksekliği	Katman	İş parçasının yüksekliği	Katman Yüksekliği
1	3,2	3,2	35	51,6	1,7
2	5,06	1,86	36	52,95	1,35
3	6,8	1,74	37	54,7	1,75
4	8,3	1,5	38	55,6	0,9
5	9,9	1,6	39	57,2	1,6
6	11,5	1,6	40	58,65	1,45
7	13	1,5	41	60,4	1,75
8	14,4	1,4	42	61,95	1,55
9	15,8	1,4	43	63,97	2,02
10	17,8	2	44	65,6	1,63
11	19,6	1,8	45	67,3	1,7
12	20,7	1,1	46	69,1	1,8
13	22,2	1,5	47	70,8	1,7
14	23,6	1,4	48	72,5	1,7
15	25,3	1,7	49	73,6	1,1
16	27,1	1,8	50	75,2	1,6
17	28,5	1,4	51	76,5	1,3
18	30	1,5	52	78,18	1,68
19	31,4	1,4	53	79,85	1,67
20	32,87	1,47	54	81,5	1,65
21	33,6	0,73	55	83,4	1,9
22	34,9	1,3	56	84,7	1,3
23	36,6	1,7	57	86,2	1,5
24	38	1,4	58	87,8	1,6
25	39,2	1,2	59	88,95	1,15
26	40,4	1,2	60	90,9	1,95
27	41,85	1,45	61	92,7	1,8
28	42,3	0,45	62	93,9	1,2
29	42,01	-0,29	63	95,1	1,2
30	43,95	1,94	64	96,6	1,5
31	45,2	1,25	65	97,4	0,8
32	46,57	1,37	66	99	1,6
33	48,3	1,73	67	101	2
34	49,9	1,6			

100 W ultrasonik güç desteği ile üretilen numuneye ait veriler Çizelge 4.4'te verilmiştir. 100W ile yığılan numunede parçanın rezonansa yaklaştığı kritik katman 30.katmandır. Bu katmanda iş parçası rezonansın etkisi ile tabla ile olan arayüzünde kırılma meydana gelmiş, kalan çok küçük bir arayüzden iletilen titreşim ile bir kaç katman daha yığılmıştır. Titreşimin kısmi yahut çok az olarak iletildiği anlaşıldığından yığmaya devam edilmemiştir.

Çizelge 4.4. 100 W ultrasonik güç ile yığılan numunede katman yükseklikleri

Katman	İş parçasının yüksekliği	Katman Yüksekliği	Katman	İş parçasının yüksekliği	Katman Yüksekliği
1	2,05	2,05	19	24,8	1
2	3,93	1,88	20	26,6	1,8
3	5,26	1,33	21	27,2	0,6
4	6,17	0,91	22	28,9	1,7
5	8,15	1,98	23	29,8	0,9
6	9,4	1,25	24	30,8	1
7	10,6	1,2	25	31,7	0,9
8	11,7	1,1	26	33,2	1,5
9	13	1,3	27	34	0,8
10	14,3	1,3	28	34,8	0,8
11	15,28	0,98	29	35,7	0,9
12	16,23	0,95	30	36,3	0,6
13	17,5	1,27	31	37,8	1,5
14	18,7	1,2	32	39,3	1,5
15	20	1,3	33	40,7	1,4
16	21,2	1,2	34	42	1,3
17	22,4	1,2	35	43,09	1,09
18	23,8	1,4	36	45,2	2,11

Farklı güç girdileri ile üretilen numune de rezonansa girilen katmanlara bakıldığında 50, 75 ve 100W için rezonans katmanları sırasıyla 24, 29 ve 30 olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebebinin çap değişimi olduğu düşünülmektedir. Nitekim ilgili katmanda ultrasonik enerji arttıkça katman yüksekliğinin miktarı azalmaktadır. Titreşim sayesinde ergiyik metal alt katmanı daha iyi ıslatarak yayılmaktadır. Bu sebeple ilgili katmanda elde edilen katman yüksekliği azalmakta, katmanda elde edilen çap artmaktadır. Parçanın kalınlığı arttıkça rijitliği arttığından, rijitlik matrisi ise doğal frekans değerini arttırdığından daha geç rezonansa girme durumu açığa çıkmıştır. Bu kıyaslama eklemeli imalatla titreşim desteği ile üretim sırasında kütle ve rijitlik matrislerinin birbiri ile sinerjik çalışarak ilerlediğini açıkça ortaya koymakla beraber, kütle artımının geometri değişimi ile birlikte hesaplanması gerekliliğinin tekrar altı çizilmektedir. Şekil 4.24'te parça yüksekliğinin katman sayısı ile ilişkisi verilmiştir. Ultrasonik güç arttıkça elde edilen katman yükseklikleri düşmüş, aynı parça yüksekliğine ulaşmak için daha fazla katman ile yığılma ihtiyacı açığa çıkmıştır.



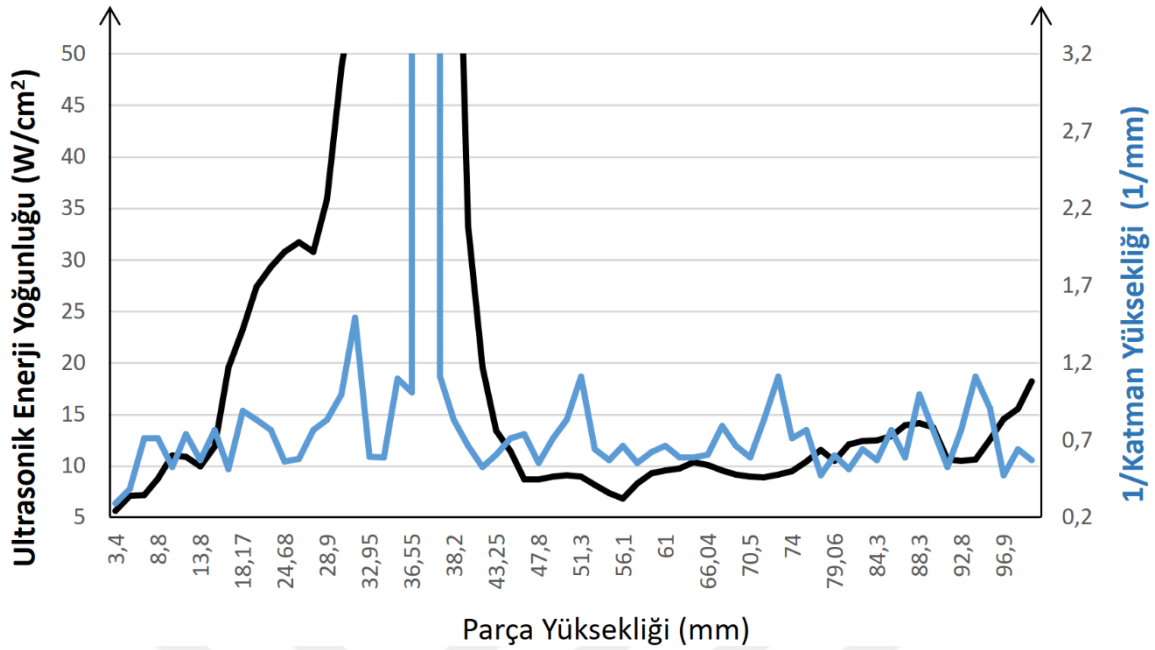
Şekil 4.24. Farklı ultrasonik güç desteği ile yığılan iş parçalarının katmanlar boyunca parça yükseklikleri

Şekil 4.24' te verilen grafik, katman yüksekliği ile ergiyik havuzda elde edilen ultrasonik enerji seviyesi arasında bir ilişki olduğunu beyan etmektedir. Enerji arttıkça, katman yüksekliği azalmaktadır. Ergiyik havuzdaki ultrasonik enerji yoğunluğu ile katman yüksekliği arasında ters orantı vardır.

Tez çalışmasında eklemeli imalatla kütle birikimi ile geometri değişiminin titreşim ile iyileştirmede, sistemin titreşim davranışının değişikliğine sebebiyet vereceği düşünülerek çalışmalar yürütülmüş, Öncelikle analitik olarak hipotez tartışılmış, akabinde sonlu eleman analizleri yapılarak sayısal olarak konu irdelenmiş, deney düzeneği tasarlanarak 4 adet numune yığılmış ve yığılan numunelerle hipotez doğrulanmıştır. Çalışmalara derinlik katılabilmesi için değişken titreşim davranışının mikroyapıya etkisinin irdelenmesi süreci 50 W ile desteklenen numunenin incelenmesi ile yapılmıştır. Bu aşamadan sonra verilecek sonuçlar 50 W güçlük titreşim desteği ile üretilen numuneye aittir.

Sayısal analizler her bir katmanda elde edilen titreşim karakteristiğini, elde edilen deformasyonun konum, hız ve ivme değerlerini ortaya koymak üzere ele alınmıştır. Her bir katmanda elde edilen hız değeri denklem (1)'de yerine konulduğunda her bir katmanda ergiyik havuza aktarılan ultrasonik enerji de elde edilebilir. Enerji denklemi hızın karesi ile doğru orantılı olarak Şekil 4.22'de verilen grafikte benzer karakteristiklerle Şekil 4.25'de

verilmiştir. Şekil 4.25'te ultrasonik enerji ile 50 W numunenin her bir katman yüksekliği verisi karşılaştırılmıştır. Katman yüksekliği ile ultrasonik enerji ters orantılı olduğundan katman yüksekliği 1'e bölünerek grafiğe eklenmiştir. Sayısal çalışmalarda elde edilen veriler sabit bir güç kullanılmasına rağmen ultrasonik enerjinin her bir katmanda farklı seviyelerde elde edildiğini ortaya koymuştur. Deneysel çalışmalarda katman yüksekliği üzerinden konu irdelendiğinde sayısal çalışmalarda elde edilen enerji seviyeleri ile deneysel çalışmalar arasında elde edilen katman yükseklikleri arasında korelasyon olduğu görülmektedir. Katmanların enerji seviyeleri arttıkça ilgili katmanda elde edilen katman yüksekliği düşmüştür. Bu ilişkinin kıyaslanabilir bir karakteristikte uyumlu olduğu Şekil 4.25'te görülmektedir. Sayısal çalışmalarda iki doğal frekans iz düşüm çizgisi (Şekil 4.23) belirlenmiş, her bir katmanda elde edilen enerjinin bu mod noktalarına yaklaştıkça arttığı tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada da aynı durum gözlemlenmiş, sistem mod noktalarına yaklaştıkça sisteme verilen güç aynı olmasına rağmen daha az sönümlenerek daha fazla deformasyona dönüşmüştür. 36 mm yükseklikte yapılan yığma da sistem rezonansa girerek kaynak makinası tarafından ergitilen metal havuz oluşturmamadan saçılmış ve negatif katman yüksekliği elde edilmiştir. Negatif katman yüksekliği, penetrasyon sağlanması için ergitilen alt katmanın da saçılması ile oluşmuştur. Dolayısı ile grafiğin anlamlı hale getirilmesi için negatif olan değer 0 olarak kabul edilmiş, $1/0$ 'ın sonsuza gitmesi sebebiyle ilgili yükseklikte katman yüksekliğinin 1'e bölümü sonsuza doğru gitmektedir. Aynı durum analizlerde de görülmüş, ilgili katmanda sönümleme etkisi olmadığından her bir tetiklemede sönümlenmeden artarak devam eden deformasyon, radikal bir hız ve enerji artışı ile sonuçlanmıştır. Sistem mod noktalarına yaklaştıkça elde edilen deformasyon hızı ve ultrasonik enerji artmış, bu durum sonucunda ilgili katmanda katman yüksekliği düşmüştür.

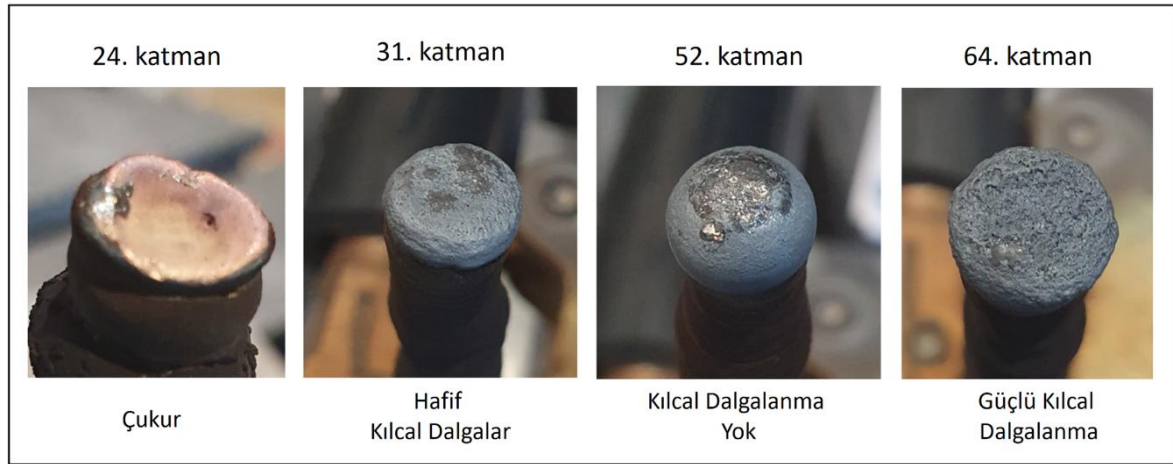


Şekil 4.25. 50W için sayısal sonuçlara göre katmanlarda elde edilen enerji miktarı (yeşil), ve ilgili katmanda elde edilen katman yüksekliğinin (mavi) kıyaslanması

4.2.2. Katılma formu

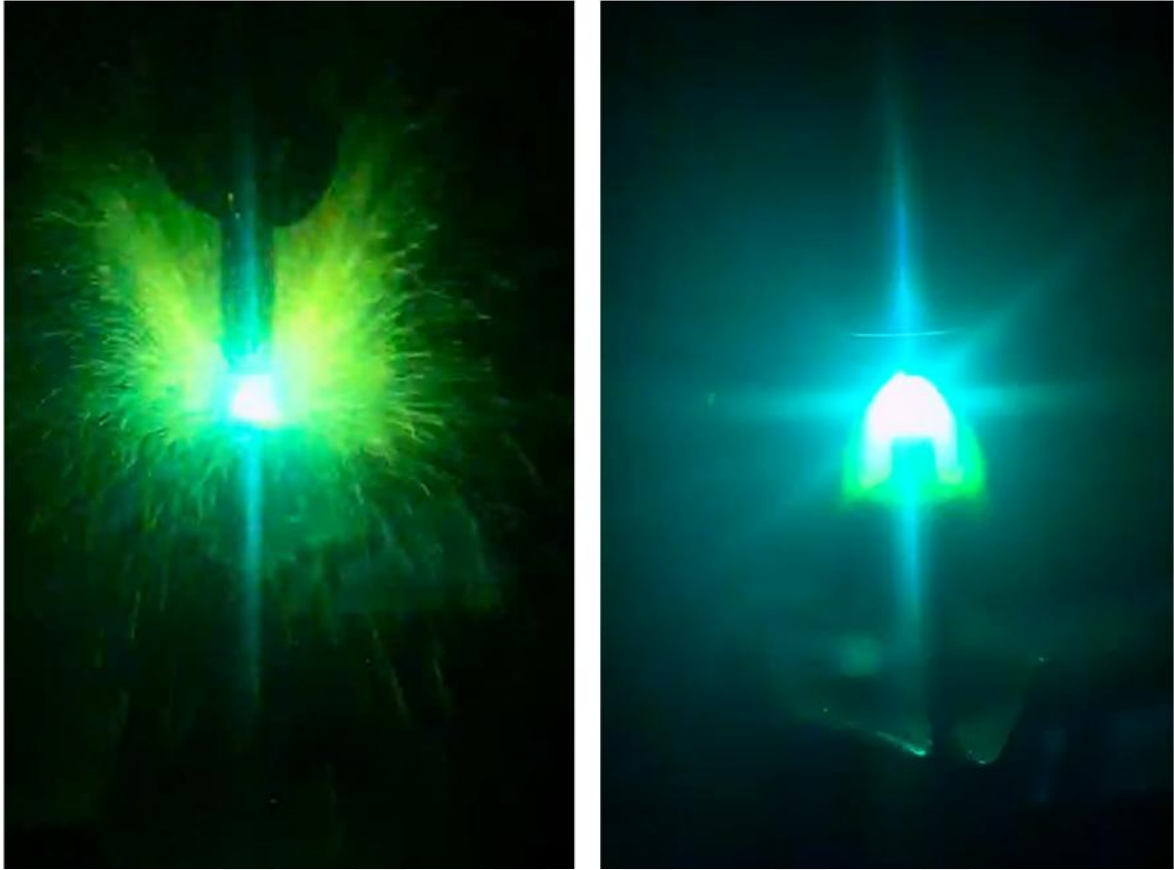
Deneyler icra edilirken her bir katman için katman yüksekliği not edilmiştir. Katmanlar bittikçe katılan bazı katmanların görseli kaydedilerek işleme devam edilmiştir. Farklı katılma formasyonları Şekil 4.26'de gösterilmektedir. Titreşimin etkisi ile katılma sırasında kılcal dalgalanmaların farklı yoğunluklarda olduğu yığılan numunelerde farklı katmanlarda görülmüştür. Şekilde 50 W güç ile yığılan numunelerde elde edilen farklı katılma formları verilmiştir. Yirmi dördüncü katman rezonansın gerçekleştiği katmandır ve penetrasyon sağlanmak için ergitilmiş olan alt katmanın bir kısmı da rezonansın etkisi ile saçılma yapmak suretiyle iş parçasından uzaklaşmıştır. Yığma işleminin sonucunda çukur formunda bir katılma formu elde edilmiştir. Şekil 4.26'nın a bendinde görülen çukur formda katılma yirmi dördüncü katmana aittir. Parça yükseltilmeye devam edilmiş, mod noktasından uzaklaşıldığı için titreşim azalmıştır. Şekil 4.26'nın b bendi otuz birinci katmana ait yığmanın katılma formunun görselinde titreşimin etkisinin devam ettiği oluşan kılcal damarlardan anlaşılmaktadır. Şekil 4.26'nın c bendinde görülen elli ikinci katmana ait görsele bakıldığında ise ultrasonik enerji azalmaya devam ederek neredeyse normale yakın bir katılma formu açığa çıktığı görülmektedir. Elli ikinci katman yaklaşık olarak 77 mm dolaylarına gelmektedir. Sayısal analiz sonuçları da ilgili yükseklikte iletilen titreşim enerjisinin azaldığını ortaya koymuştu. Parça yükseltilmeye devam edildikçe sistem bir

başka mod noktasına doğru ilerlemiş, elde edilen ultrasonik enerji miktarı artmaya başlamıştır. Şekil 4.26'nın d bendinde ise altmış dördüncü katmana ait katılma formu görülmektedir. Burada katılma sırasında ultrasonik titreşimin ergimiş metalde oluşturduğu kılcal formların katılma formunu etkilediği, kılcal yapının katılmış yüzeyde kaldığı gözlemlenmiştir. Katılma formlarına dair çıktılar da, katman yüksekliği gibi, ultrasonik titreşimde güç kavramı ile birlikte kütle ve geometrinin titreşim karakteristiğine etkisinin önemli ölçüde etkin olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.26. 50W ultrasonik destek ile yığılan numunede farklı katmanlarda katılma formları a) 24.katman, b) 31.katman, c) 52.katman, d) 64.katman

Yirmi dördüncü katmanda parça ve tel ergitilerek kütle transferi gerçekleştirilmiş fakat katman yükselmemiş, bilakis yığma sonucunda yükseklik düşmüştür. İlgili yükseklikte gerekli yeter değerin çok üstünde elde edilen ultrasonik enerji ergiyin havuzun sürekliliğinin bozulmasına ve ergimiş tüm metalin saçılmasına sebebiyet vermiştir. Şekil 4.27'te ilgili katmanın yığılması esnasında kaydedilen saçıntı solda gösterilmiştir. Sağda ise nazaran düşük güç desteği ile yığma karşılaştırılabilmesi için verilmiştir. Yüksek saçıntının olduğu ve katman yüksekliğinin azaldığı katılma formasyonu ise şekilde gösterilmiştir. Şekilde yüksek ısımanın olduğu bölgede ark, üst kısmında torç vardır. Arkın hemen altı ise yığmanın gerçekleştirildiği iş parçasıdır.



Şekil 4.27. Rezonans koşulunda yığma sürecinde oluşan saçıntı (solda) ve düşük ultrasonik enerjiye sahip yığma (sağda)

4.2.3. Mikroyapı

Ultrasonik enerji verilmeden yığılan numune ile, 50W ultrasonik güç desteği ile yığılan numuneler tel erozyon tezgahında yükseklik boyunca ortadan kesilerek bölünmüştür. 100 mm'lik numune 4 ayrı parça olarak bakalite alınarak farklı bölgelerden EBSD analizi yapılmıştır.

Şekil 4.28 ultrasonik titreşim uygulanarak ve uygulanmadan üretilmiş numunelere ait EBSD analizlerine dair IPF haritalarını göstermektedir. Bu sonuçlar, farklı yığma yüksekliklerinde elde edilen IPF haritaları şeklinde sunulmuştur. Şekilde ultrasonik titreşim uygulanmadan üretilmiş numunenin katman bazlı EBSD analizi sunulmaktadır. En alttan en üste doğru dört farklı katman yüksekliği temsil edilmektedir.

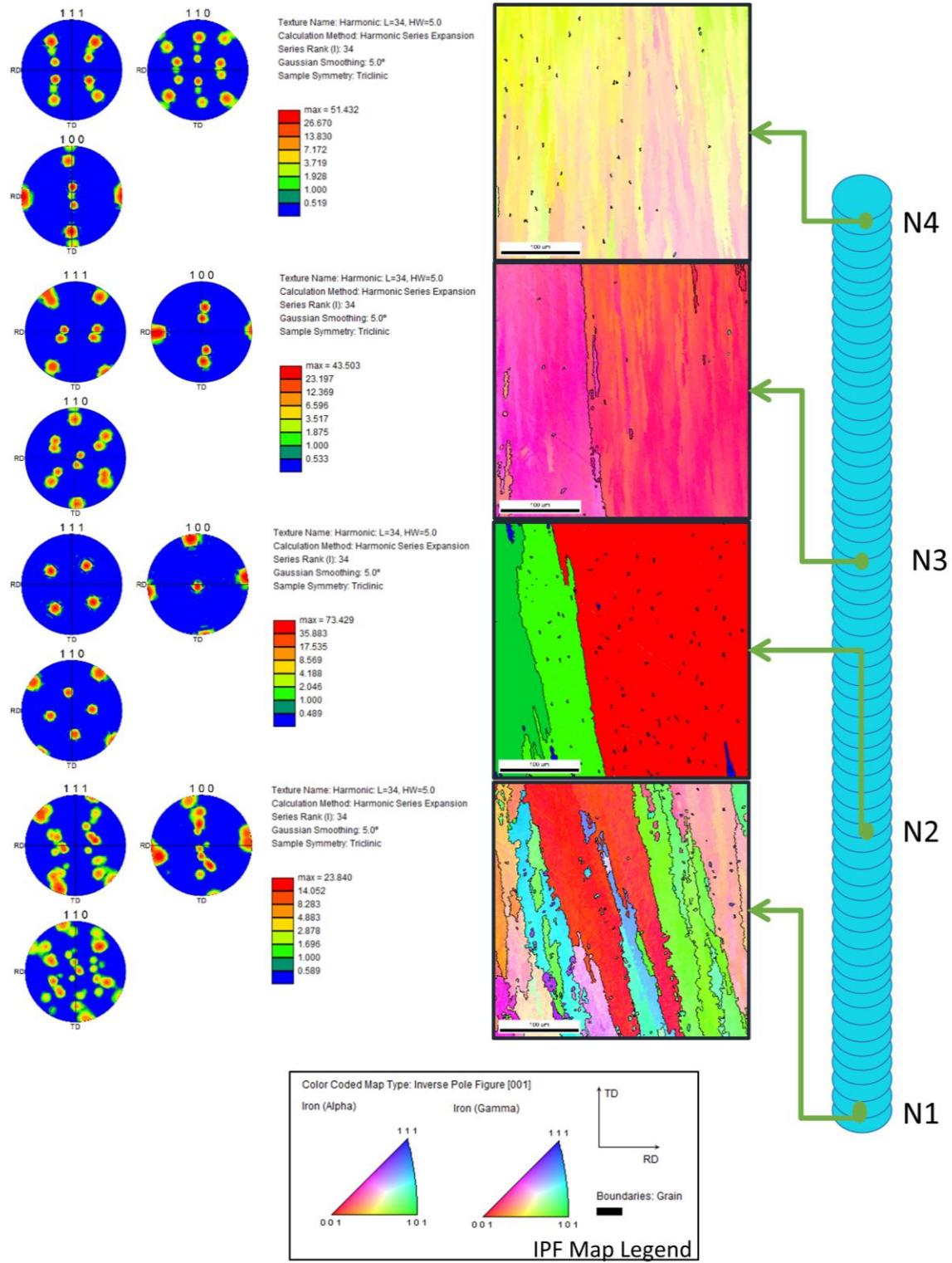
N1 noktasında, üst katmanlara kıyasla taneler daha incedir. Bununla birlikte epitaksiyel büyümenin daha az olduğu görülmektedir. N1 noktası yığmanın tabla ile bütünleştiği ilk noktaları kapsamaktadır. Bu noktada kütle transferi yapılırken tabla henüz soğuktur. Her ne

kadar ilk yığmadan sonra 150 °C sıcaklığı sabit tutulsa da tablada ısı birikmesi henüz olmadığından ve tabla soğuk olduğundan ısıl gradyan yüksektir. Bu durum soğuma hızını etkiler. Yüksek soğuma hızlarında ise taneler daha küçük olarak elde edilir. Alt tablaya yakınlık nedeniyle oluşan yüksek soğuma hızı, hızlı katılaşmaya neden olmakta ve büyüme için gerekli süreyi kısıtlamaktadır. Bu nedenle büyüme ve yönelimi bir miktar bastırılmıştır. N1'e ait kutup figürleri, diğer katmanlara kıyasla daha geniş bir yönelim dağılımı sunmakta ve kristalografik tekstürün daha çeşitli olduğunu göstermektedir. Her ne kadar $\langle 001 \rangle$ ve $\langle 101 \rangle$ yönleri boyunca bir miktar hizalanma gözlenirse de, belirgin bir yönelimin baskınlığı; tabandaki keskin termal gradyan nedeniyle oluşan heterojen ve hızlı çekirdeklenme dinamikleri sonucu azalmıştır.

N2 noktasında, sütunsu tane morfolojisi belirginleşmeye başlamıştır. IPF haritası, tanelerin artık tamamen dikey hizalanmadan sapmaya başladığını göstermektedir. Bu durum, termal gradyanın azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüksekliğe gelene kadar tablada ısı birikmiş ve ısıl gradyan azalmıştır. İlgili kutup figürü de bunu desteklemekte olup, taneler yığma yönüne doğru ısıl gradyanın yönüyle eş olarak oluşmaya başlamıştır ve $\langle 001 \rangle$ tekstürü baskındır.

N3 noktasında, tane yapısı yoğun bir tekstür gelişimi sergilemektedir. IPF haritasındaki yoğun kırmızı renk, $\langle 001 \rangle$ kristalografik yönelimi boyunca güçlü bir hizalanmaya işaret etmektedir. Taneler oldukça uzamış durumda olup, çoğu tane EBSD tarama alanını aşmıştır. Aşırı tane büyümesi elde edilmiştir. Bu, ilgili yığma yüksekliğinde soğuma hızının daha da azalmasının doğrudan bir sonucudur. Parça tabladan uzaklaştıkça termal gradyan düşmekte ve katılaşma hızı yavaşlamaktadır. Daha yavaş soğuma, bazı tanelerin baskın şekilde büyümesine olanak tanımaktadır. Ayrıca tane oluşum bölgesinin oluşmaması da epitaksiyel büyümeye doğrudan sebebiyet vermektedir. Bu durum, büyümeyi ve tekstür yoğunlaşmasını teşvik etmektedir. Buna karşılık gelen kutup figürleri de bu durumu doğrular nitelikte olup, özellikle $\langle 001 \rangle$ yönünde keskin ve yoğunlaşmış yönelim zirveleri göstermekte ve güçlü, anizotropik bir tekstürün geliştiğini doğrulamaktadır. Epitaksiyel büyüme ile oluşan sütunsu taneler, genellikle anizotropik özellikler sergilemekte olup, özellikle yığma yönüne dik doğrultuda artan termal ve kalıntı gerilimlere karşı daha duyarlı hale gelmektedir. Bu gerilimler, malzemenin hem eklemeli imalat süreci sırasında hem de servis yüklemeleri altında, özellikle yüksek gerilimli veya yorulmaya duyarlı uygulamalarda, çatlama eğilimini artırabilmektedir [44,45].

IPF haritası, önemli bir gözlemi daha ortaya koymaktadır: N4 noktasında tüm tarama alanının tek bir büyük tane tarafından işgal edildiği görülmektedir. Bu olağanüstü derecede iri tane, güçlü bir kristalografik hizalanma sergilemektedir. IPF haritasındaki yoğun kırmızı renk, $\langle 001 \rangle$ yöneliminin baskınlığını göstermektedir. EBSD tarama alanında yalnızca bir tane bulunması, tanelerin EBSD ile gözlemlenebilir sınırların ötesine geçtiğini ve olağanüstü boyutta büyüdüğünü göstermektedir. Bu nokta, tablaya olan uzaklığın maksimum olduğu ve ısı uzaklaştırmanın minimum seviyede gerçekleştiği bir konumdur; bu nedenle soğuma hızları önemli ölçüde düşmüştür. Düşük termal gradyan ve uzun süreli termal maruziyet, çekirdeklenme oranlarını azaltmakta ve mevcut tanelerin genişlemesini teşvik etmektedir. Aynı zamanda, kristalografik yönelimin alt katmanlardan seçici olarak alındığı da anlaşılmaktadır. Aşağı katmanlardan başlayan epitaksiyel büyüme, uygun termal koşullar altında yukarıya doğru ilerlemektedir. Daha verimli soğuma sayesinde daha ince taneler ve yüksek tekstür çeşitliliğinin gözlemlendiği alt bölgelerle kıyaslandığında, bu bölge aşırı tane irileşmesi ve epitaksiyel aşırı büyümenin uç bir örneğini temsil etmektedir. Kutup figürleri de bu yapısal tekdüzeliği yansıtmakta ve belirgin, yoğun yönelim dağılımı ile en üst katmanda güçlü, tek yönelimli bir tekstür bileşeninin baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.28. Ultrasonik destek olmadan üretilen numunenin farklı noktalarında elde edilen IPF haritaları

Şekil 4.29 50 W sabit ultrasonik güç altında DbD yöntemiyle üretilen numunenin EBSD tabanlı mikroyapı karakterizasyonunu göstermektedir. U1 noktasında, ultrasonik enerji henüz düşük seviyedeysen, IPF haritasında görülmekte olan taneler yönelimli olarak uzamış ve orta düzeyde tekstür oluşumu göstermektedir. Bu yapı, ultrasonik destek olmadan üretilen numuneyle benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik, tablaya yakınlık nedeniyle soğuma hızının yüksek olması ve ultrasonik enerjinin seviyesinin az olması ile açıklanabilir. Bu yükseklikte katılma davranışını belirleyen baskın etkenin soğuma hızı özellikle ısı gradyan olduğu açıkça görülmektedir. Tekstür oluşumu, ultrasonik destek verilmeden yığılması durumuyla karşılaştırıldığında anlamlı bir farklılık göstermese de, düşük seviyedeki titreşimin küçük iyileşmeler sağladığı görülmektedir. Örneğin tanelerde hafif bir incelme olduğu ve IPF haritasında renk dağılımının daha çok skalaya yaygınlaştığı gözlemlenebilmektedir. İlgili kutup figürleri, $\langle 001 \rangle$ ve $\langle 101 \rangle$ yönleri etrafında daha dağınık bir yönelim yoğunluğu ile zayıflamış bir tekstürü doğrulamaktadır.

U2-1 noktasında, enerji girdisi U1'in yaklaşık 4.6 katına elde edildiği görülmektedir. Yapı daha da incelmıştır. IPF haritası, U1'e görsel olarak benzemekle birlikte, bu noktanın ultrasonik desteği olmadan üretilen numunedeki karşılığı olan N2 noktasına kıyasla bariz bir iyileşme gösterdiği görülmektedir. Bu gelişme, eriyik havuz dinamiklerini anlamlı şekilde etkilemeye başlayan artan ultrasonik enerji girdisine atfedilebilir. Her iki numunenin termal geçmişi aynıdır. Elde edilen yapıdaki iyileşme ve dağınık yönelimler doğrudan ultrasonik titreşimin etkisidir. Bu durum, yalnızca termal etkilerin sağlayamayacağı mikroyapısal değişimlerin titreşim desteği ile mümkün olduğunu göstermektedir. Kutup figürlerindeki yönelim keskinliğindeki daha fazla zayıflama, ultrasonik enerjinin büyüyen dendritleri parçalayarak epitaksiyel büyümeyi bozduğunu göstermektedir. Dinamik titreşim aynı zamanda Marangoni akışını da artırarak çözünen elementleri ve ısıyı yeniden dağıtmakta ve daha homojen bir çekirdeklenme ortamı oluşturmaktadır.

U2-2 noktası, ultrasonik titreşimde rezonansa girilen bölge ile örtüşmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) analiz sonuçları, bu noktada enerji seviyesinin birinci katmana kıyasla yaklaşık 12 ila 400 kat daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Burada sonlu elemanlar analizinin 3ms olarak ele alınırken yığma işleminin 900 ms olarak ele alındığı hususu, sönümlenme etkisinin olmaması sebebiyle farkın hesaplanandan çok daha büyük olabileceği göz önüne alınmalıdır. Bir başka göz önüne alınması gereken husus, sonlu elemanlar analizinin bir karakteristik teyidi için kullanıldığıdır. Bu farkın mikroyapı

üzerinde belirgin bir bozulmaya yol açtığı hem yığma esnasında yaşanan saçılmadan anlaşılmış, hem de mikroyapı analizleri esnasında ortaya çıkmıştır. Kusurlar optik mikroskopta daha detaylı bir şekilde verilecek olup, elde edilen yüksek soğuma hızından dolayı IPF haritası, baskın bir büyüme yönü olmayan, küçük ve düzensiz tanelerden oluşan kaotik bir yapı sergilemektedir. Tane yapısı açısından bakıldığında küçük eş eksenli ve her birinin kristalografik oryantasyonu farklı yönlerde olan taneler istenen ve arzulanan bir katılma şeklidir. Kutup figürleri, yönelim yoğunluğunun geniş bir alana dağıldığını ve belirgin bir tepe oluşmadığını göstermekte, tekstür oluşumunun ciddi şekilde zayıfladığını ortaya koymaktadır. Bu durum, rezonans düzeyindeki ultrasonik enerjiye bağlı olarak ergiyik havuzun şiddetli biçimde bozulmasıyla ilişkilidir. Rezonans veya rezonansa yakın yüksekliklerde meydana gelen yüksek ultrasonik enerji sebebiyle aşırı derecede kavitasyon ve akustik akış etkileri, yönlü katılmaı engelleyerek rastgele ve eş eksenli çekirdeklenmeyi teşvik etmektedir.

Akustik akış ve kavitasyon etkileri altında tane sınırları sık ve karmaşık bir şekilde olgunlaşmıştır. Ergiyik havuzdaki dağınık akış karakteristiği nedeniyle, dendritlerden koparak ayrılan parçacıkların kristalografik yönelimi ile biriktirme yönü arasındaki açı zamanla değişmektedir. Taneler birleştğinde ve katılma tamamlandığında, her bir tanenin bu açısı farklı olacaktır. Bu durum yalnızca tane boyutunun küçülmesine değil, aynı zamanda çeşitli tane yönelim dağılımına ve yüksek açılı tane sınırlarının oluşmasına neden olmaktadır. Böylece, yapıda baskın yönelime dayalı anizotropi kırılmakta ve mekanik özellikler daha izotropik bir davranış sergilemektedir. Chen ve arkadaşları [38], ultrasonik destek (UA) ile tekstür oluşumunu başarıyla ortadan kaldırmış ve neredeyse rastgele kristalografik yönelime sahip taneler elde etmiştir. Aynı zamanda yüksek açılı tane sınırları da gözlemlemişlerdir. Yang ve arkadaşları [39] ise Inconel 718 malzemesini UA destekli ve desteksiz olarak üretmiş; ortalama tane boyutunun UA uygulanmayan örneklerde 743 μm , UA uygulanan örneklerde ise 68 μm olduğunu rapor etmişlerdir. Yeterli ultrasonik enerjinin olağan bir çıktısı olan tane küçülmesi çalışmamızda da elde edilmiştir.

Akustik akış, ergiyik havuz içindeki konvektif ısı transferini artırmakta [32] ve termal gradyanları azaltarak ergiyik havuzun sıcaklık dağılımını homojenleştirmektedir [28-30]. Bu termal homojenlik, eş eksenli tane yapısının elde edilmesi ve sütun şeklindeki tanelerin baskın yönelimle büyümesini engellemek açısından kritiktir. Isıl dağılımın homojenleşmesi katılmanın hemen önünde tane oluşumu bölgesi oluşturur. Böylece sütun yapıları tanelerden

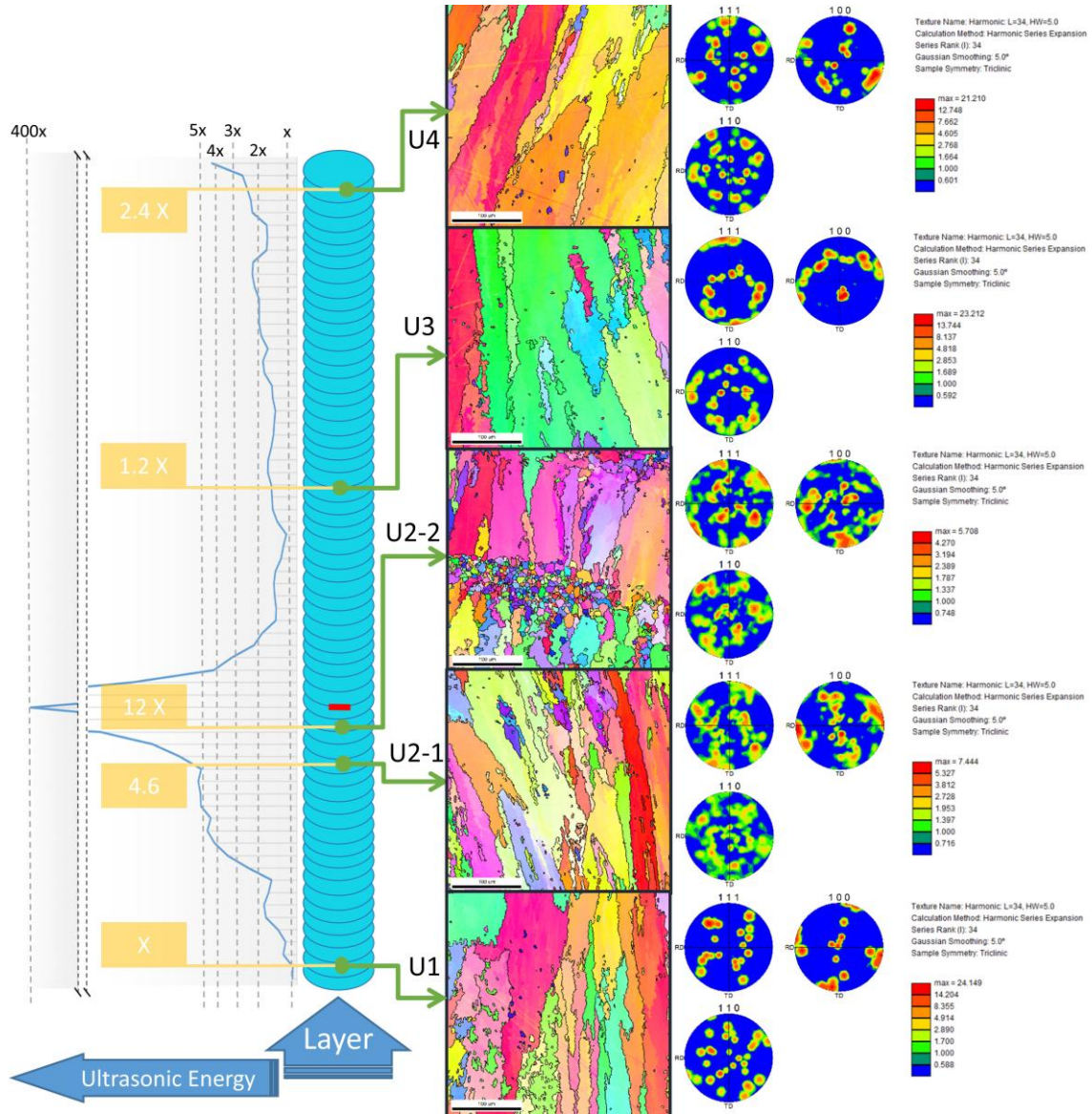
eş eksenli hale geçiş (CET, İng. Columnar to Equiaxed Transition) gerçekleşmektedir. Ayrıca mikro jet etkisi, genellikle dendritleri hedef alarak katılaşmakta olan bölgeye zarar vermekte; dendritten kopan parçalar tekrar ergiyik havuza karışarak çekirdeklenmeyi teşvik etmektedir. Bu etki, katılaşma hızını artırmakta ve CET mekanizmasını tetiklemektedir [38,39].

U3 noktasında, enerji ilk katmanda elde edilen ultrasonik enerjinin yaklaşık olarak 1,2 katına kadar düşmektedir. Bu noktada iri taneli mikroyapının tekrar oluşmaya başladığı görülmektedir. IPF haritası, sütunlaşma eğiliminde uzamış ve hafifçe dikey hizalanmaya geri dönen taneleri göstermektedir. Kutup figürleri ise $\langle 001 \rangle$ ve $\langle 101 \rangle$ yönlerinde tekrar tekstür yoğunlaşmasının başladığını ortaya koymaktadır. Bu durum, ultrasonik enerjinin azalmasıyla birlikte ergiyik havuzun daha az bozularak yönlü katılaşmanın yeniden kurulabildiğini göstermektedir. Ultrasonik destekli ve ultrasonik desteksiz numunelerin bu yüksekliklerdeki karşılık gelen noktaları karşılaştırıldığında, ultrasonik işlem görmüş katmanda daha ince taneli ve daha dağınık tekstüre sahip bir yapı görülmektedir. Bu durum, kutup figürlerinde daha geniş yayılımla kendini göstermektedir. Buna karşılık, ultrasonik desteksiz numuneye bakıldığında yığılma yönünde güçlü $\langle 001 \rangle$ tekstürü ve EBSD tarama sınırlarını aşan büyüklükte iri taneler ile karşılaşmaktadır. Her iki numunenin de termal geçmişi aynı olduğuna göre, gözlenen farklar yalnızca ultrasonik titreşimin epitaksiyel büyümeyi bozması ve yönlü büyümeyi engellemesiyle açıklanabilir.

U4 noktasında, enerji tekrar artarak yaklaşık 2,4 katına ulaşmaktadır. IPF haritası, yeniden belirginleşmiş tane iyileşmesi ve tane yöneliminde çok yönlülük eğilimlerini göstermektedir. Taneler düzensiz şekillerde olup, renk çeşitliliği belirgin yönelim sapmalarını işaret etmektedir. Kutup figürleri de yönelim yoğunluğunun dağınık olduğunu göstermekte, yani belirli bir kristal yönelimi baskın hale gelmemektedir. Ultrasonik desteksiz numunenin en üst bölgesi olan N4 de karşılaşılan tek bir iri taneye kıyasla, bu katmanda soğuma hızının azalmasıyla tekstür eğilimi tekrar ortaya çıkma eğiliminde olsa da, ultrasonik enerjinin etkisi sayesinde aşırı tane büyümesi bastırılmıştır. Enerjideki bu ikincil artış, iç akış gibi titreşim etkilerini yeniden devreye sokmakta ve büyümekte olan tanelerin parçalanmasını teşvik ederek yeni çekirdeklenme bölgelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Akustik akışın daha düşük termal gradyanlara rağmen ince tane yapısının korunmasına katkı sağlamaktadır. Bu enerji artışı, sistemin bir başka mod şekline yaklaşmasıyla açıklanmış, mikroyapı analizi bu artışı doğrulamıştır.

Buradan çıkan önemli bir sonuç, ultrasonik enerji kaynağına yakınlık yerine parçanın doğal frekansına olan yakınlığın ergiyik havuzda elde edilen ultrasonik enerji yoğunluğunu belirlemede daha önemli olduğudur. Yani, kütle ve geometrinin değişimi, sistemin doğal frekansını değiştirmekte ve bu da katmanlara özgü farklı enerji iletimine yol açmaktadır. Aynı güç girdisi kullanılmasına rağmen, bu dinamik değişkenlik sebebiyle önemli mikroyapısal farklılıklar oluşmaktadır.

Ayrıca, ultrasonik destek uygulanmayan numunede, yapı yüksekliği arttıkça tane boyutu belirgin şekilde artmakta ve tekstür güçlü bir şekilde $\langle 001 \rangle$ yönünde hizalanmaktadır; bu da epitaksiyel büyümeyi göstermektedir. Buna karşılık, ultrasonik destekli numunede ise özellikle rezonansın sağlandığı U2-2 noktasında, epitaksiyel büyüme kırılmakta ve tane boyutu küçülmektedir. Kutup figürleri, rezonansla ortaya çıkan ultrasonik enerjinin tane yönelimlerini rastgeleleştirdiğini doğrulamaktadır. Bu mikroyapısal evrim, daha önce elde edilen sayısal titreşim analizleriyle uyum göstermekte ve önerilen enerji-mikroyapı etkileşim mekanizmasının geçerliliğini desteklemektedir.



Şekil 4.29. 50 W ultrasonik destek ile üretilen numunenin farklı yüksekliklerde mikroyapısına dair IPF haritaları

Tanelerin büyüklükleri ve yapısı mekanik özellikleri doğrudan değiştiren önemli bir etkidir. Tanelerin küçültülmesi, eş eksenli hale getirilmesi ve tane oryantasyonlarının benzer yönelimlere sahip olmaması ultrasonik titreşimin kullanılmasında en önemli hedeflerdendir. Yapılan EBSD analizleri ile elde edilen sonuçlardan biriside tane büyüklüğü verisidir. Şekil 4.30’da U1-4 noktalarından yapılan analizlerde tane büyüklüklerinin çaplara göre dağılımı verilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında tane büyüklüğünün sağuma hızı ve ultrasonik enerji seviyesi ile doğrudan ilintili olduğu anlaşılmaktadır. U1 noktasına bakıldığında en yüksek tane çapının 121-140 arasında olduğu görülmekle beraber ortalama tane çapının 74 μm olduğu sonuçlardan elde edilmiştir. U1 noktası ultrasonik titreşimin düşük olduğu buna rağmen soğuma hızının çok yüksek olduğu bir bölgedir. Tane boyutunun

bu mertebelerde elde edilmesinde soğuma hızının yüksek olması etkin rol oynamıştır. N1 noktası ile ortalama tane boyutu kıyaslandığında $77\ \mu\text{m}$ olduğu görülmüştür. N1 noktası ile U1 noktası için termal geçmiş aynıdır. Sadece U1 noktasında düşük seviyede ultrasonik enerji etkinliği vardır. Bu durumdan ultrasonik enerjinin etkisi olduğu diğer veriler ile de birleştirildiğinde çıkartılabilir.

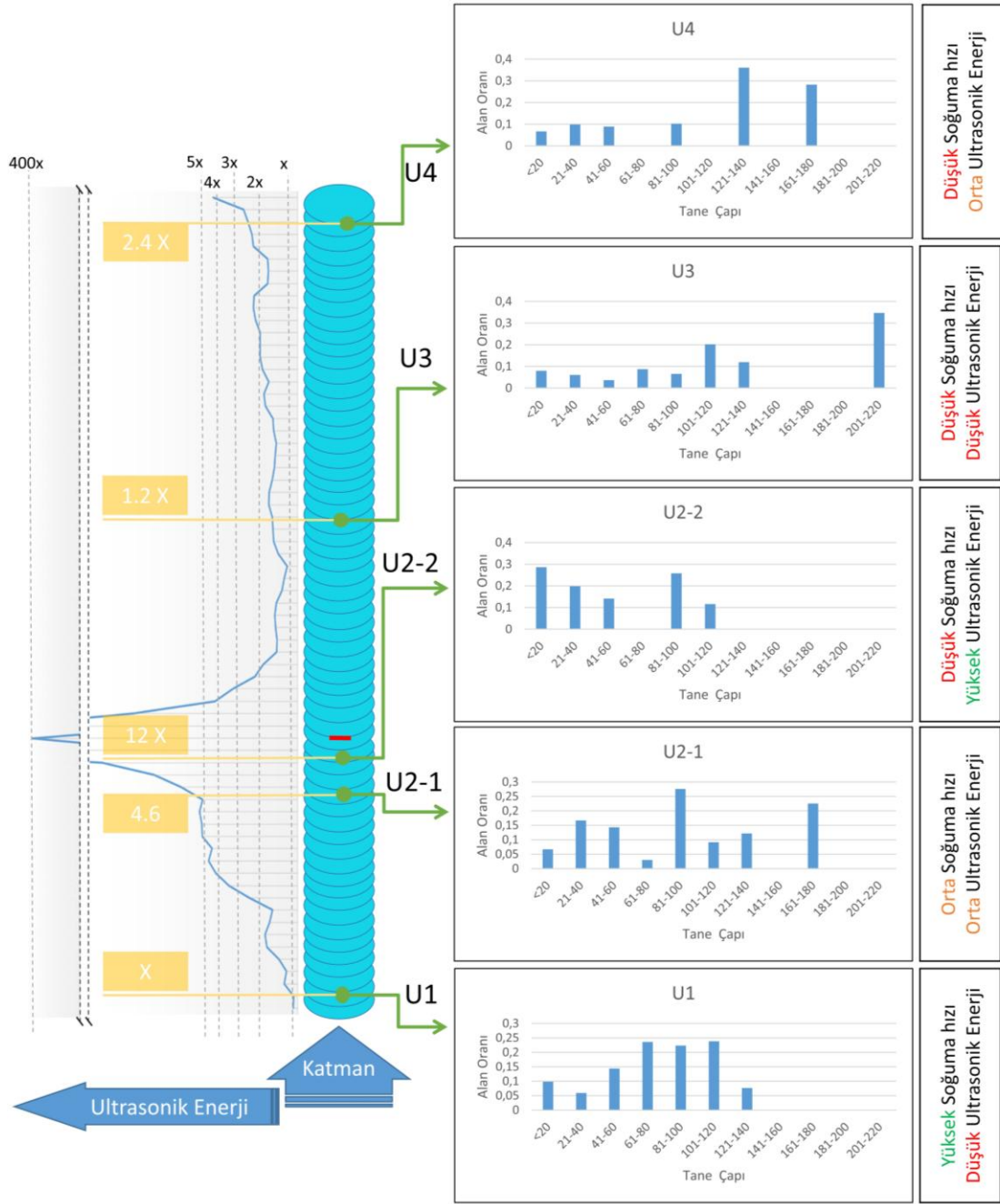
U2 noktasında tane boyutu ortalama değeri $89,5\ \mu\text{m}$ 'dir. Tane boyutunun daha kabalaştığı görülmüştür. Şekil 4.29'da U1 ve U2 noktaları tane boyutu açısından karşılaştırıldığında tane boyutlarında çok ciddi bir değişim yokmuş gibi görülmesine rağmen Şekil 4.28'de N2-1 noktası ile Şekil 4.29'da U2 karşılaştırıldığında değişim ve gerekçesi kendini göstermektedir. U2 ve N2-1 noktaları katılma dinamiklerinde termal davranış aynıdır. Bununla birlikte U2-1 noktasında ultrasonik enerji daha yüksektir. U1 ve N1 noktasında soğuma hızı katılma davranışını etkileyen baskın dinamik iken U2-1 ile N2 karşılaştırıldığında U2-1 noktasının katılma sırasında tane oluşumundaki baskın etkenin ultrasonik titreşim olduğu görülmektedir. U2-1 noktasında soğuma hızı U1'den düşük, U3'den yüksektir. Titreşim enerjisi ise U1'den yüksek, U3'den düşüktür. Kısacası bu noktada ultrasonik enerji artmış, soğuma hızı azalmıştır. Biraz daha kaba olsa da benzer bir tane dağılımı elde edilmiştir. U2-1 noktasında en yüksek tane boyutunun $160\ \mu\text{m}$ olduğu Şekil 4.30'da görülmektedir.

U2-2 noktası rezonans yahut yakınlarındaki mikroyapıyı temsil etmektedir. Bu noktada mikroyapıda yüksek bir tane iyileşmesi elde edilmesi ile birlikte süreksizlikler ve kusurlar elde edilmiştir. Bu noktada ortalama tane boyutu $53\ \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. tüm yapı göz önüne alındığında bu bölge tane iyileşmesi açısından en etkin bölge olduğu görülmektedir. Bununla birlikte en yüksek tane çapı $101-120\ \mu\text{m}$ olarak elde edildiği görülmektedir. Bu nokta U1 ile kıyaslandığında soğuma hızı daha düşüktür. N2 ile kıyaslandığında ise soğuma hızı aynı olmasına rağmen önemli derecede bir iyileşme elde edildiği açıkça görülmektedir.

N2, N3 ve N4 noktasında tane büyüklüklerinin çok büyük olması ve tarama alanına sığmayan tanelerin elde edilmesi sebebiyle tane boyutu verilerinin çıktıların yanlış yorumlanmasına sebebiyet verebileceği kaygısı ile tane boyutu açısından bu noktalar değerlendirmeye alınmamıştır.

U3 noktası katmanlar içerisinde hem ultrasonik enerjinin düşük olduğu hem de soğuma hızının düşük olduğu bir noktadır. Ultrasonik destekli olarak üretilen numunede EBSD analizi yapılan bölgeler içerisinde tanelerin en kaba elde edildiği bölgedir. Tane boyutu ortalaması 127 μm olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte en büyük tane boyutu 200 μm 'den daha büyüktür. N3 noktasında tanelerin tarama alanına sığmadığı göz önüne alındığında iyileşme olduğu görülürken, U2-2 noktası ile kıyaslandığında U2-2 noktasının en yüksek tanesinin boyutu U3 noktasının tane boyutu ortalamasından daha küçük olduğu görülmektedir.

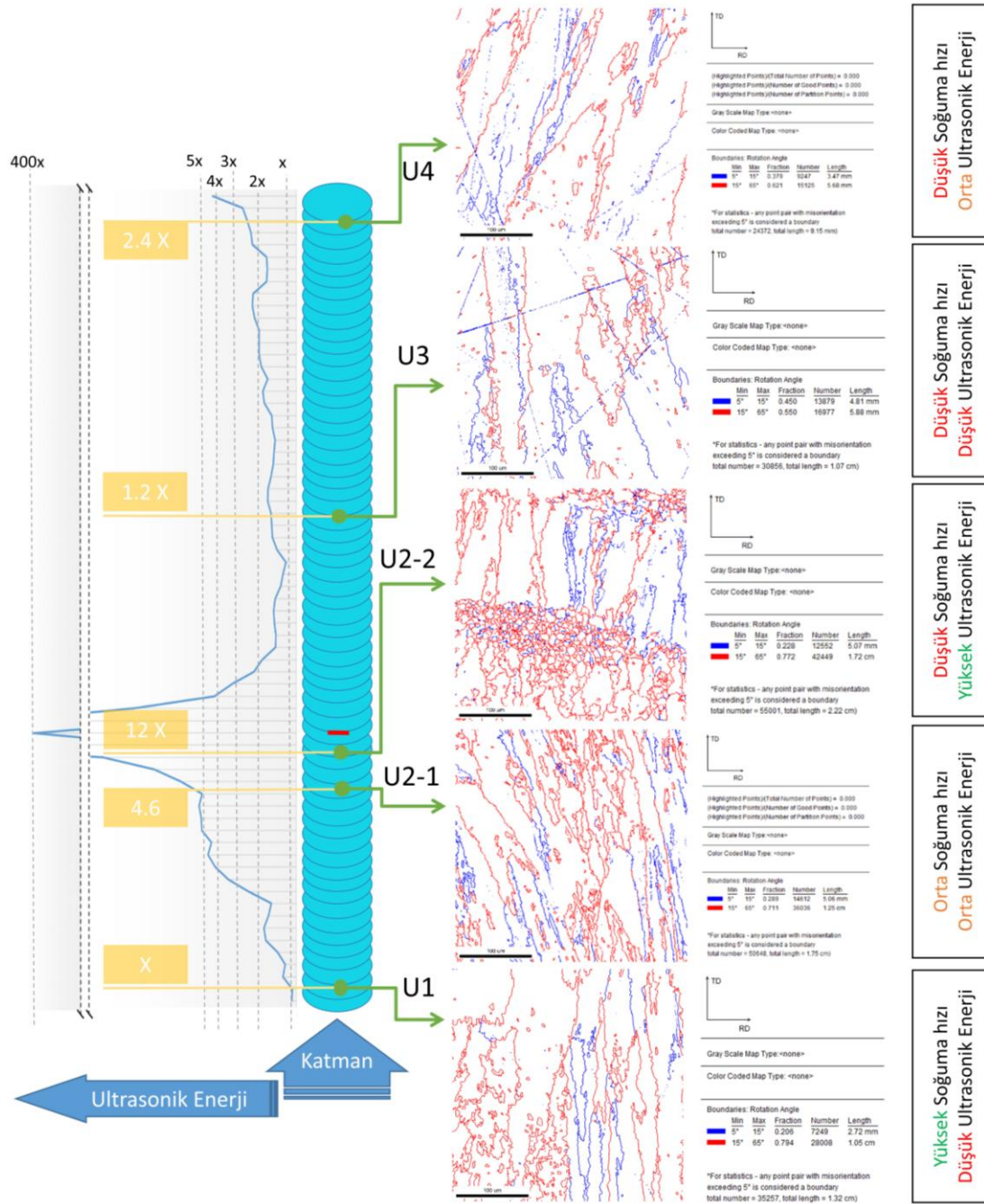
U4 noktasında soğuma hızı iyice düşmüştür. Öyle ki, N4 noktasında tarama alanında sadece tek bir tane görülmektedir. Buna rağmen U4 noktasında ortalama tane boyutu 113 μm olarak elde edilmiştir. U4 noktasının tane yapısı bakımından U3'den daha iyi bir tane yapısına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun sebebi, bu noktada parçanın doğal frekansı kütle birikimi sebebiyle düşerek, zorlanma frekansına yakın bir değere gelmiş, katmanda elde edilen ultrasonik titreşimin seviyesi artmıştır. soğuma hızının düşmüş olmasının etkisi ile daha kaba taneler elde edilecek iken, artan ultrasonik enerji sayesinde daha iyi bir tane yapısı elde edilmiştir.



Şekil 4.30. Farklı yükseklikler için soğuma hızı ve ultrasonik enerjiye bağlı olarak elde edilen tane büyüklükleri

Ergitmeli metal eklemeli imalat yöntemlerinde ısının girdiği ve uzaklaştığı bölgeler düşünüldüğünde ısı akı genellikle yığma doğrultusunda oluşur. Bu durum, iç yapıda katılaşmakta olan tanelerin sütunlu olabilmesinin yanı sıra, tanelerin kristalografik yönelimlerinin yığma doğrultusunda oluşmasına sebebiyet verir. Tanelerin aynı yöne dizilen atomlardan oluşması kayma düzlemlerinin paralelliği sebebiyle mekanik özellikleri düşürürken, üretilen parçanın mekanik özelliklerinde anizotropi meydana getirir. Mikroyapıda bu mekanizmayı kontrol eden kavram tane açıları olarak ele alınmaktadır.

Tanelerin birbirleri ile oluşturduğu açılar farklı yönlerde dağılmaları katılaşma da istenen bir başka durumdur. Ultrasonik titreşim, aşırı soğuma oluşturmaları, katılaşma arayüzünden kavitasyon sebebiyle parça kopararak çekirdeklenme arayüzü oluşturmaları ve akustik etki sayesinde akışı önemli ölçüde artırması sebebiyle katılaşma anındaki yönelime de etki etmektedir. Bu sebeple tane açılarının yüksek olması beklenmektedir. Bu durum detaylı bir şekilde literatürde açıklanmış olup, Şekil 4.31’de ultrasonik destekle üretilen numunede incelenen bölgelerde tane açıları verilmiştir. Yüksek soğuma hızı ve düşük ultrasonik enerjili U1 noktasına bakıldığında yüksek açılı tane sınırlarının oranının %79,4 olduğu görülmektedir. Bu durum U2-1’de %71,1 olarak elde edilmiştir. U2-2’ye bakıldığında soğuma hızının düşmesine rağmen %77,2’ye çıkmıştır. U3 noktasında hem soğuma hızı azalmış, hem de ultrasonik enerji yüksek değildir. Bu noktada tane açıları radikal bir düşüş göstermiş ve %55’e düşmüştür. U4 noktasına bakıldığında ise %62,4’e yükseldiği görülmektedir. Bu durum çalışmanın hipotezi olan kütle ve geometrinin titreşim karakteristiğini değiştirdiği düşüncesi ile doğrudan paraleldir. Yapılan sayısal analizlerde elde edilen titreşim karakteristiklerini destekleyen tane açısı verileri, titreşimin sabit olarak ele alınmaması gerektiği olgusunu desteklemektedir.



Şekil 4.31. 50 W ultrasonik destek ile üretilen numunenin farklı yüksekliklerinde elde edilen tane açısı değerleri

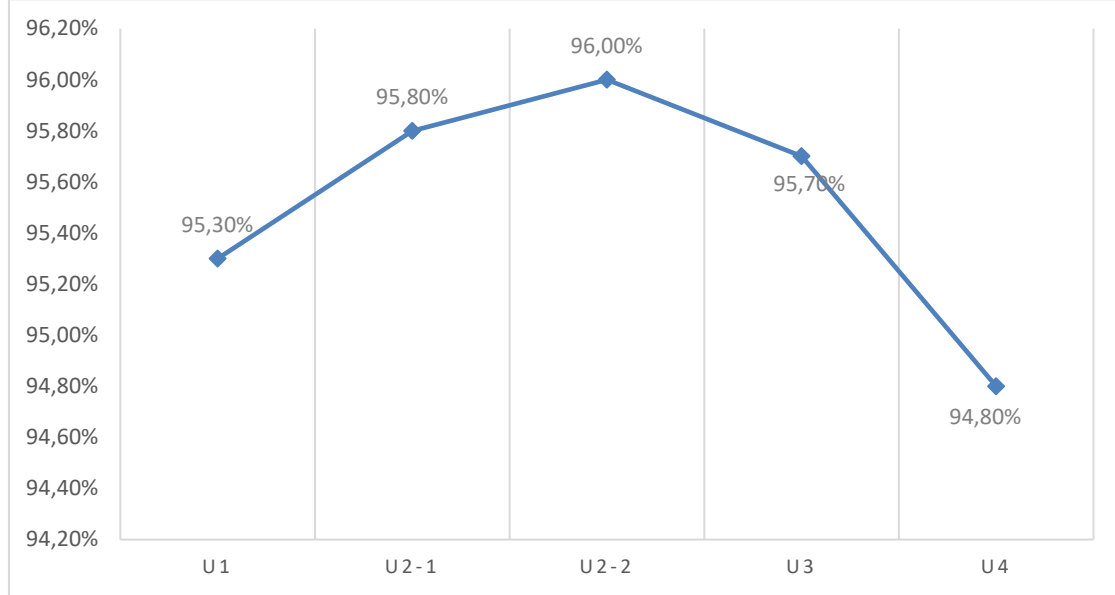
ER308LSi çeliği östenitik bir paslanmaz çeliktir. Bu çeliğin katılaşma davranışı incelendiğinde öncelikle delta ferrit oluşumu gerçekleşir. Soğuma devam ettikçe delta ferrit östenit fazına dönüşür. Oda sıcaklığında hakim faz östenit fazı olup, ferrit fazı kalıntı olarak iç yapıda kalmaktadır [80]. WAAM yöntemiyle yapılan üretimlerde, sürekli katman eklenmesi nedeniyle malzeme tekrarlı ısıtma ve soğuma döngülerine maruz kalır. Bu durum, klasik kaynak işlemlerine kıyasla daha kompleks bir faz evrimine yol açar. WAAM

yönteminde her yeni katman, alttaki katmanın üst kısmını belirli oranda yeniden ısıtarak hem yeniden ergime hem de yeniden faz dönüşümüne neden olur. Bu süreçte delta-ferrit fazı daha fazla çözünerek östenite dönüşebilir. Bu nedenle WAAM ile üretilmiş ER308 numunelerde mikroyapı, homojen olmayan miktarlarda östenit ve kalıntı ferrit fazlarından oluşur.

Katılma sırasında oluşan termal gradyan, faz oluşumu üzerinde yönlü büyümeye sebep olur. Yüksek termal gradyan, dendritik ve kolonlu yapıların oluşumunu teşvik ederek delta-ferrit fazının belirgin şekilde yönelmiş büyümesine neden olabilir. Bu durum östenit fazının sürekliliğini ve homojenliğini bozar. Buna karşılık, düşük termal gradyanlar daha izotropik bir katılma ortamı sunar ve çoklu yönlerde çekirdeklenmelerin gerçekleşmesine olanak tanır. Bu, östenit fazının daha homojen ve sürekli bir ağ oluşturmasını kolaylaştırır.

ER308 tipi östenitik paslanmaz çeliklerde, katılma sırasında östenit fazının oluşumu büyük ölçüde kimyasal bileşim ve termal geçmişe bağlıdır. Bu alışımda yüksek nikel içeriği östenit fazını stabilize ederken, krom ve silisyum gibi elementler delta-ferrit oluşumuna katkı sağlar. Soğuma hızı, bu iki faz arasındaki dengeyi belirleyen kritik bir etkidir. Yüksek soğuma hızlarında, sıvı metalin delta-ferrit olarak katılması ardından elementlerin yeterince segregasyona uğrayacak zamanı kalmaz, bu da ferrit fazının dönüşerek östenit fazına geçişini kolaylaştırır. Ayrıca, hızlı soğuma çekirdeklenme oranını artırarak ince taneli ve homojen bir östenitik yapı oluşumunu teşvik eder. Buna karşılık, yavaş soğuma durumlarında segregasyon daha belirgin hale gelir; özellikle krom ve silisyum gibi ferrit stabilizatörleri interdendritik bölgelerde birikir ve bu da delta-ferrit fazının kararlılığını artırarak östenit dönüşümünü sınırlar. Dolayısıyla ER308 alaşımında yüksek soğuma hızları, östenit fazının oranını artırıcı yönde etkili olup, istenilen mekanik özellikler ve korozyon direnci açısından avantaj sağlar. Ultrasonik titreşim, katılma esnasında çökeltmelerin önüne geçtiği için ve ısı dengeyi destekleyerek termal gradyanı düşürdüğü için içyapıda östenite dönüşümü destekler niteliktedir. Kısacası Termal gradyanın düşük, ultrasonik titreşimin yüksek, soğuma hızının yüksek olduğu bölgelerde östenit fazının desteklenmesi beklenmektedir. Şekil 4.32’de ferrit ve östenit oranlarının farklı yüksekliklerdeki oranları verilmektedir. Oranlara genel olarak bakıldığında %95-96 mertebelerinde östenit olduğu görülmektedir.

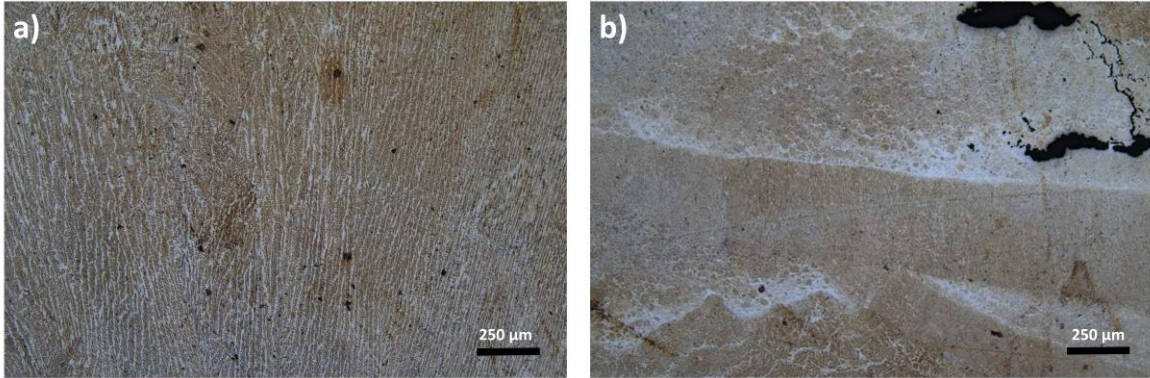
çıktığı görülürken, rezonansa yakın bölgelerde östenit oranının arttığı Şekil 4.32’de görülmektedir.



Şekil 4.33. 50W ultrasonik güç ile yığılan numunede EBSD analizi yapılan yüksekliklerde elde edilen östenit fazına dair oranlar

Titreşimin mikroyapıda östenit varlığını artırdığı literatür araştırmalarından anlaşılmak ile birlikte, mikroyapıda östenit ve ferritin yapısal durumu katılaşma formu açısından bizlere bilgi vermektedir. Burada U4 noktasının nazaran daha düşük östenit oranına sahip olması U1-3 noktalarında üst katmanların yığılması sırasında açığa çıkan termal fongü sayesinde alt katmanlarda ferritin östenite dönüşümü devam etmiş, fakat U4 noktasında üste katman yığılması olmadığından yığmadan sonra ki döngülerde östenit artışına sebebiyet verecek bir ortam oluşmamıştır. Bu sebeple alt katmanlara kıyaslandığında U4’te östenit oranının düşük çıkması anlaşılabilir durumdadır. Şekil 4.34’da iki ayrı noktanın mikroyapısı verilmektedir. Mikroyapıda görülen beyaz alanlar östeniti, siyah alanlar ise ferriti temsil etmektedir. Mikroyapı görselleri incelendiğinde düşük ultrasonik enerji altında katılaşan bölgede dendritik ferrit büyümelerinin ağırlıklı olduğu görülmektedir. WAAM ile yapılan çalışmalarda [11,82] soğuma rejiminde genellikle dendritik ferrit büyümelerinin görüldüğü bilinmektedir. Düşük seviye ultrasonik enerjinin mikroyapıdaki bu fenomeni etkilemediği optik görseller sonucunda gözlemlenmiştir. Burada ultrasonik titreşim enerjisi düşük olarak iletilmiştir. Dendritik yapılar kırılmamış, form alarak büyümeye devam etmiştir. Bununla birlikte Şekil 4.34’de yüksek ultrasonik enerjiye maruz bırakılan bölge b) şıkında verilmiştir. Verilen optik görsel rezonans bölgesinin mikroyapısına aittir. Burada östenit varlığının önemli

ölçüde artmıştır. Ferrit yapılarının dendritik olarak büyüyemediği, östenit yapıların şekilde daha çok alan kapladığı, östenit yapıların içerisinde ferritin çözündüğü görülmektedir. Yüksek ultrasonik enerji yoğunluğunun kavitasyon sayesinde mikro jetler oluşturarak dendritik yapıları kırdığı bilinmektedir. Bu bölgede daha çok eş eksenli faz yapıları görülmektedir. Ayrıca yüksek ultrasonik enerjinin ürettiği süreksizlik şeklin sağ üst köşesinde açıkça görülmektedir.

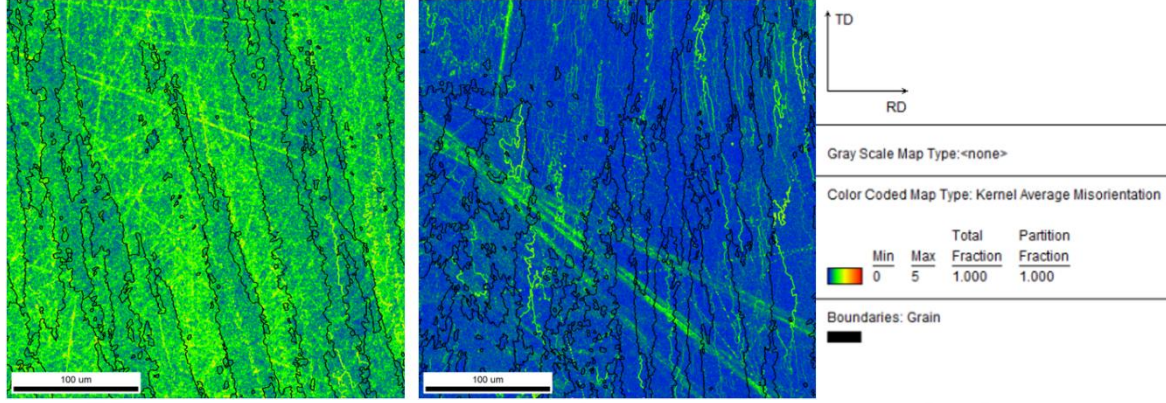


Şekil 4.34. Optik mikroskop görüntüleri; a) düşük ultrasonik enerji altında katılaştıran bölge ve b) yüksek ultrasonik enerji altında katılaştıran bölge

KAM (Kernel Average Misorientation) haritaları, atomların oluşturduğu kafeslerin yerel olarak yönelim sapmaları hakkında bilgi vermektedir. Genellikle geometrik olarak dislokasyonlar (GND'ler) ile ve dolaylı olarak kalıntı gerilim seviyelerinin nitel bir göstergesi olarak kullanılır. Şekil 4.35, ultrasonik destek olmadan (N1) ve ultrasonik destek ile (U1) üretilen numunelerin en alt bölgesine ait KAM haritalarını sunmaktadır. Ultrasonik destek uygulanmayan N1 numunesi yeşil-sarı renk geçişleri ile temsil edilirken, ultrasonik destekli U1 numunesi ise KAM haritasında ağırlıklı olarak mavi renklerle gösterilmektedir. Bu durum, ultrasonik destekli numunenin sahip olduğu atomların oluşturduğu kafeslerin daha düşük yönelim sapması değerlerine sahip olduğunu göstermektedir.

Yerel yönelim sapmalarındaki bu azalma, malzeme içindeki dislokasyon yoğunluğunun azaldığını ve dolayısıyla kalıntı gerilim seviyelerinin düştüğünü göstermektedir. Bu karşılaştırma, numunelerin en alt kısmında, yani termal gradyanların yüksek, soğuma hızlarının yüksek ve özellikle ultrasonik enerjinin düşük olduğu bölgelerde bile, katılaşma sırasında uygulanan ultrasonik desteğin kalıntı gerilim oluşumunu etkili bir şekilde azaltabildiğini ortaya koymaktadır. Ultrasonik ile desteklenmiş bölgede KAM değerlerindeki düşüş, ultrasonik titreşimin yalnızca tane incelmeye değil, aynı zamanda

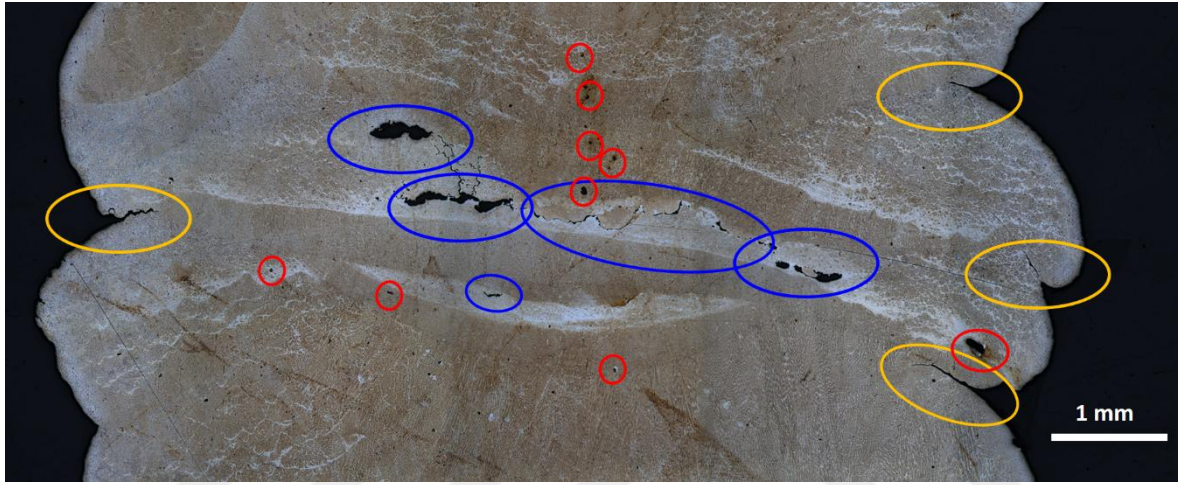
katılaşma süreci boyunca kalıntı gerilmelerin azaltılması yoluyla mekanik özelliklere pozitif katkı sağladığını metalurjik kanıtlarla göstermektedir.



Şekil 4.35. N1 (solda) ve U1 (sağda) noktalarına ait KAM haritaları

Rezonans yüksekliği civarındaki yapının kesitsel optik görüntüsü Şekil 4.36'de sunulmaktadır. Düşük ultrasonik enerji, mikroyapıda istenen iyileşmeleri sağlamazken, yüksek ultrasonik enerjinin yığma esnasında ergiyik havuzun sürekliliğini kaybettirdiğini yığma esnasında çekilen resimlerden görülmüştür. Bu bölge optik olarak incelenmiş, makro süreksizliklerin mikroyapıda oluşturduğu kusurlar ortaya konmuştur. Katılaşma sırasında ortaya çıkan kusurlar vurgulanmıştır. Gözenekler kırmızı, çatlaklar mavi ve delaminasyon kusurları sarı dairelerle gösterilmiştir. Bu kusurlar, daha önce tanımlanan rezonans durumu sırasında aşırı ultrasonik enerji girdisinin doğrudan sonuçlarıdır. Şekil 4.26'da 24. katmanda gözlemlenen çukur bölgesi, burada görülen kusurların yoğunlaşması ile örtüşmektedir. Bu merkez bölge, rezonans sırasında ergiyik havuzun maksimum kararsızlık yaşadığı konuma karşılık gelmektedir. Bu nedenle, mavi daire içine alınmış çatlaklar çoğunlukla bu merkez bölgede meydana gelmiştir. Kırmızıyla gösterilen gözenekler ise çatlak bölgelerinin çevresinde dağınık şekilde yer almaktadır. Bunun nedenleri arasında hapsolmuş gazlar veya malzemenin dağınık bir şekilde dışarı atılıp tekrar birleşmesi sırasında tam birleşmenin sağlanamaması yer almaktadır. Sarı ile gösterilen tabakalar arası ayrılma bölgeleri ise genellikle yığmanın dış sınırlarına yakın konumlanmış olup, titreşim sırasında ergiyik havuzun aşırı yayılması ama nüfuziyet elde edilememesi sebebi ile oluştuğu düşünülmektedir. Delaminasyon bölgeleri, üst katmanlar yığılırken alt katmanlarda kalacak mikroyapı kusurlarının sebeplerinden olup, çatlak başlangıcı için uygun yapılardır. Dolayısı ile parçanın fonksiyonel kullanımlarını kısıtlar. Özellikle yorulma kritik yapılar için önemli bir darboğaz oluşturur. Bu bölgeler, ergiyik malzemenin alt katmanla yeterince ısıtma

gerçekleştiremediği alanları temsil ediyor olabilir. Ayrıca bu kusurların yalnızca rezonansın gerçekleştiği katmanla sınırlı kalmadığına dikkat edilmelidir. Kusurlar, rezonans noktasının biraz alt katmanlarında belirmeye başlamakta ve biraz üst katmanlara kadar azalarak devam etmektedir. Ultrasonik enerjinin bozucu etkileri keskin bir şekilde lokalize değil; aksine daha geniş bir bölgeyi etkilemektedir. Bu durum, daha önce ifade edilen, enerji aktarımını belirleyen asıl faktörün enerji kaynağına olan mesafe değil, modal frekansa olan yakınlık olduğu yönündeki gözlemi desteklemektedir.



Şekil 4.36. 50W ultrasonik destekli numunede rezonans bölgesinde oluşan iç yapı kusurları; çatlak (mavi), porozite (kırmızı), delaminasyon (sarı)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ultrasonik titreşim desteği ile metal eklemeli imalatta mikroyapı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilme sürecinde kütle ve geometri değişiminin etkisi irdelenmiştir. Titreşimin üretilmesi, izlediği yol, sönümlenmesi konuları tartışılmıştır. bir numune ultrasonik titreşimsiz olarak üretilmiş, farklı ultrasonik güçte 3 ayrı numune de üretilmiştir. Ultrasonik titreşim desteği ile üretilen her bir numune sabit güç altında üretilmiştir. Ultrasonik titreşim desteği ile üretilen numunelerde güç sabit olmasına rağmen farklı katman yüksekliklerinde kütle ve geometrideki değişimin ortaya koyduğu titreşim davranışındaki değişiklikler sebebiyle değişken ultrasonik enerji seviyelerinde çıktılar elde edildiği saptanmıştır. Çalışmada tel ark eklemeli imalat (WAAM) sürecinde uygulanan ultrasonik titreşim desteğinin ergiyik havuz üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiş ve bu etkinin mikro yapıdaki değişken yansımaları sistematik deneylerle ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, eklemeli imalatta biriktirilen kütlenin ve değişen geometrinin, yığılmakta olan parçanın titreşim davranışını önemli ölçüde etkileyerek değişken mikroyapılara sebebiyet verdiğini ortaya koymuştur. Kontrol altında tutulmayan ve sabit olarak verilen ultrasonik enerjinin bazı yerlerde katastrofik kusurlar açığa çıkarabileceği, böylelikle belli bölgelerde elde edilen iyileşmelere rağmen, üretilen parçanın fonksiyonelliğini tamamen yitirebileceği tespit edilmiştir. Yapılan çalışma, eklemeli imalatın vazgeçilmez unsuru olan kütle ve geometri değişiminin dikkate alındığı, adaptif bir titreşim desteği metodunun gerekliliğini açıkça ortaya koyarken, çalışma kapsamında elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Ultrasonik titreşim desteğinin mikroyapıyı doğrudan etkileyen önemli bir yardımcı proses olduğu tespit edilmiştir.
- Katılma esnasında uygulanan ultrasonik enerji desteğinin düşük enerji seviyelerinde dahi kalıntı gerilmeleri giderdiği görülmüştür.
- Uygulanan ultrasonik enerjinin ergiyik havuzda akışı etkilediği katman yüksekliği, ergiyik havuzun çapı ve katılma formasyonları incelenerek tespit edilmiştir. ultrasonik enerji miktarı yükseldikçe ergiyik havuzun daha yayvan bir form aldığı görülmüştür.
- Ultrasonik enerjinin 308LSi malzemesinde östenit oluşumunu desteklediği tespit edilmiş, östenit ve ferrit yapısı incelendiğinde dendritik oluşumların uygun ultrasonik enerji seviyelerinde kırıldığı görülmüştür.

- Ultrasonik enerjinin tanelerin formasyonuna doğrudan müdahale ederek, uygun enerji seviyelerinde kolonlu yapıyı kırdığı ve eş eksenli tane oluşumunu desteklediği görülmüştür.
- Ultrasonik titreşim desteğinin, tane oryantasyonlarında epitaksiyal büyümenin önüne geçtiği, yüksek açılı tane oluşumunu destekleyerek anizotropiyi baskıladığı görülmüştür.
- Eklemeli imalat sırasında değişen kütle ve geometrinin sistemin titreşim davranışını değiştirdiği, yükselen katmanlar boyunca kullanılan ultrasonik güç ile ergiyik havuzda elde edilen ultrasonik enerji yoğunluğu arasında doğrusal bir ilişki olmadığı, bu ilişkinin denklem (4) ile açıklanabileceği ortaya konmuştur.
- Sistemin titreşim davranışını belirleyen en önemli faktörün zorlanma frekansı ile sistemin ilgili katmanda sahip olduğu doğal frekansın ilişkisi olduğu ortaya konmuştur.
- Sabit güç altında değişen titreşim davranışının üretilen parçanın özelliklerinde önemli ölçüde dalgalanmalara sebep olduğu, sistemin sönümleme kabiliyetinin yüksek olduğu yerlerde ergiyik havuza az miktarda enerji ulaştırabildiği ve bunun sonucunda arzulanan iyileştirilmenin elde edilemediği görülürken, sistemin sönümle kabiliyetinin yitirildiği doğal frekans koşullarında ergiyik havuzda elde edilen ultrasonik enerjinin çok yüksek olduğu, ergiyik havuzda sürekliliğin yitirilmesi ile birlikte mikroyapıda katastrofik kusurların oluştuğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte doğal frekanstan belirli bir uzaklıkta mikroyapıda arzulanan iyileştirilmeler elde edilirken, mikroyapı kusurları da görülmemiştir.
- Yapılan çalışmaların ışığında sabit ultrasonik güç kullanımının eklemeli imalat uygulamalarında uygun olmadığı, homojen bir iyileştirme elde edilmesi ve özellikle parçaların fonksiyonelliğini kaybettirecek kusurlardan uzak durmak için sistemin değişen kütlesi ve geometrisi ile birlikte değişen titreşim davranışı göz önünde bulundurularak, sistemin ilgili katmanda sahip olduğu doğal frekansa uyumlu bir şekilde titreştirileceği adaptif bir ultrasonik titreşim desteğinin eklemeli imalat uygulamaları için elzem olduğu açıkça ortaya konmuştur.

Bu çalışmada ultrasonik titreşimin yığılan iş parçasına potansiyel faydalarını ortaya koyulmuş, bununla birlikte literatüre özgün katkısı, eklemeli imalat süreçlerine adaptif ultrasonik kontrol yaklaşımını önermiştir. Sabit frekans ve sabit güç uygulamalarının değişken etkiler sunduğu gösterilmiş, proses optimizasyonunda titreşim karakteristiği analizinin zorunluluğu vurgulanmıştır. Böylece eklemeli imalat teknolojisinin daha kontrollü, daha tekrarlanabilir ve mekanik olarak daha güvenilir çıktılar sunması sağlanabilir

hale gelmiştir. Bu bağlamda, çalışmada yalnızca mikro yapı veya mekanik özellik iyileştirmesiyle sınırlı kalınmayıp, eklemeli imalatta uygulanan titreşim desteği süreçlerinin aktif kontrolü, entegre geri besleme mekanizmalarının gerekliliğine de işaret edilmiştir.





KAYNAKLAR

1. Wong, K.V., Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012, 208760.
2. Tan, L.J., Zhu, W., Zhou, K. (2020). Recent progress on polymer materials for additive manufacturing. *Advanced Functional Materials*, 30, 2003062.
3. Frazier, W.E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering ve Performance*, 23, 1917-1928.
4. Johnson, N., Vulimiri, P., To, A., Zhang, X., Brice, C., Kappes, B., ve Stebner, A. (2020). Invited review: Machine learning for materials developments in metals additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 36, 101641.
5. Sanjeeviprakash, K., Kannan, A.R., ve Shanmugam, N.S. (2023). Additive manufacturing of metal-based functionally graded materials: overview, recent advancements and challenges. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45, 241.
6. Oropeza, D., Hofmann, D.C., Williams, K., Firdosy, S., Bordeenithikasem, P., Sokoluk, M., Liese, M., Liu, J., ve Li, X. (2020). Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire. *Journal of Alloys and Compounds*, 834, 154987.
7. Khan, N., Riccio, A. (2024). A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions. *Progress in Aerospace Sciences*, 149, 101021.
8. Lamarche-Gagnon, M.-É., Molavi-Zarandi, M., Raymond, V., ve Ilinca, F. (2024). Additively manufactured conformal cooling channels through topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 67, 138.
9. Munusamy, S., Jerald, J. (2023). Effect of in-situ intrinsic heat treatment in metal additive manufacturing: a comprehensive review. *Metals and Materials International*, 29, 3423-3441.
10. Kok, Y., Tan, X.P., Wang, P., Nai, M., Loh, N.H., Liu, E., ve Tor, S.B. (2018). Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. *Materials & Design*, 139, 565-586.
11. Dong, B., Cai, X., Lin, S., Li, X., Fan, C., Yang, C., ve Sun, H. (2020). Wire arc additive manufacturing of Al-Zn-Mg-Cu alloy: Microstructures and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 36, 101447.
12. Soori, M., Arezoo, B., ve Dastres, R. (2024). Virtual manufacturing in industry 4.0: A review. *Data Science and Management*, 7, 47-63.
13. ISO/ASTM (2024). 52943-2:2024 Additive manufacturing for aerospace process characteristics and performance part 2: directed energy deposition using wire and arc.

14. Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R., Santos, T.G., ve Oliveira, J. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12, 1121.
15. Huang, L., Chen, X., Konovalov, S., Su, C., Fan, P., Wang, Y., Xiaoming, P., ve Panchenko, I. (2023). A review of challenges for wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76, 1123-1139.
16. Zhou, S., Wang, J., Yang, G., Wu, B., Xie, H., Wu, K., and An, D. (2022). Periodic microstructure of Al–Mg alloy fabricated by inter-layer hammering hybrid wire arc additive manufacturing: formation mechanism, microstructural and mechanical characterization. *Materials Science and Engineering: A* 860, 144314.
17. Hackenhaar, W., Mazzaferro, J.A., Montevecchi, F., ve Campatelli, G. (2020). An experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 52, 58-65.
18. Zeng, C., Huang, F., Xue, J., Jia, Y., ve Hu, J. (2024). Effect of Combined Direct Current Electric Field and Pulsed Magnetic Field on the Transient Melt Pool in Laser Additive Manufacturing Process. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 11, e1887-e1898.
19. Nie, Z., Wang, G., McGuffin-Cawley, J.D., Narayanan, B., Zhang, S., Schwam, D., Kottman, M., ve Rong, Y.K. (2016). Experimental study and modeling of H13 steel deposition using laser hot-wire additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 235, 171-186.
20. Xiong, J., Lei, Y., ve Li, R. (2017). Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 126, 43-52.
21. Sehrt, J.T., Kleszczynski, S., and Notthoff, C. (2017). Nanoparticle improved metal materials for additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2, 179-191.
22. Xu, W., Xu, H., Li, Q., Zhang, P., Yang, L., ve Wang, W. (2024). Stress-based continuous planar path planning for additive manufacturing. *Advances in Engineering Software*, 188, 103544.
23. Todaro, C., Easton, M., Qiu, D., Brandt, M., StJohn, D., ve Qian, M. (2021). Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 37, 101632.
24. Kou, S. (2003). *Welding metallurgy*. Amerika: A John Wiley & Sons Inc.
25. Messler Jr, R.W. (2008). *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*, Weinheim: John Wiley & Sons.
26. Richter, B., Hocker, S.J., Frankforter, E.L., Tayon, W.A., ve Glaessgen, E.H. (2024). Influence of Ultrasonic Excitation on the Melt Pool and Microstructure Characteristics of Ti-6Al-4V at Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Solidification Velocities. *Additive Manufacturing*, 104228.

27. Yuan, T., Kou, S., ve Luo, Z. (2016). Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool. *Acta Materialia*, 106, 144-154.
28. Zhang, Y., Guo, Y., Chen, Y., Cao, Y., Qi, H., ve Yang, S. (2019). Microstructure and mechanical properties of Al-12Si alloys fabricated by ultrasonic-assisted laser metal deposition. *Materials*, 13, 126.
29. Zhou, L., Chen, S., Ma, M., Chen, J., ve Wang, M. (2022). The dynamic recrystallization mechanism of ultrasonic power on non-contact ultrasonic-assisted direct laser deposited alloy steel. *Materials Science and Engineering: A*, 840, 142971.
30. Masaylo, D., Igoshin, S., Popovich, A., Orlov, A., Kim, A., ve Popovich, V. (2022). Microstructural and hardness behavior of H13 tool steel manufactured by ultrasound-assisted laser-directed energy deposition. *Metals*, 12, 450.
31. Zhang, D., Li, Y., Wang, H., ve Cong, W. (2020). Ultrasonic vibration-assisted laser directed energy deposition in-situ synthesis of NiTi alloys: Effects on microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 60, 328-339.
32. Puga, H., Barbosa, J., Teixeira, J., ve Prokic, M. (2014). A new approach to ultrasonic degassing to improve the mechanical properties of aluminum alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 3736-3744.
33. Todaro, C., Easton, M., Qiu, D., Zhang, D., Bermingham, M., Lui, E., Brandt, M., StJohn, D., ve Qian, M. (2020). Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound. *Nature communications*, 11, 142.
34. Franc, J.-P. (2007). The Rayleigh-Plesset equation: a simple and powerful tool to understand various aspects of cavitation. In *Fluid dynamics of cavitation and cavitating turbopumps*, (Springer), 1-41.
35. Zhou, D., Liu, D.-Y. (2004). Heat transfer characteristics of nanofluids in an acoustic cavitation field. *Heat Transfer Engineering*, 25, 54-61.
36. Wang, D., Wang, Y., Liu, W., Hua, C., Yu, C., ve Lu, H. (2021). Multiscale investigation of microstructure optimization in the arc additive manufacturing and arc welding by self-induced ultrasound. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 180, 121790.
37. Yasui, K. (2015). *Sonochemistry and the acoustic bubble*, Oxford: Elsevier, 41-83.
38. Chen, Y., Xu, M., Zhang, T., Xie, J., Wei, K., Wang, S., Yin, L., ve He, P. (2022). Grain refinement and mechanical properties improvement of Inconel 625 alloy fabricated by ultrasonic-assisted wire and arc additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 910, 164957.
39. Yang, Z., Zhu, L., Ning, J., Wang, S., Xue, P., Xu, P., Dun, Y., Xin, B., ve Zhang, G. (2022). Revealing the influence of ultrasound/heat treatment on microstructure evolution and tensile failure behavior in 3D-printing of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 305, 117574.

40. Abramov, V., Abramov, O., Bulgakov, V., ve Sommer, F. (1998). Solidification of aluminium alloys under ultrasonic irradiation using water-cooled resonator. *Materials Letters*, 37, 27-34.
41. Eskin, G. (2001). Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys. *Ultrasonics Sonochemistry*, 8, 319-325.
42. Wang, S., Guo, Z.P., Zhang, X.P., Zhang, A., ve Kang, J.W. (2019). On the mechanism of dendritic fragmentation by ultrasound induced cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 51, 160-165.
43. Basak, A., Das, S. (2016). Epitaxy and microstructure evolution in metal additive manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 46, 125-149.
44. Zhu, X., Zhu, Z., Liu, T., Liao, W., Du, Y., ve Wei, H. (2023). Crack-free and high-strength AA2024 alloy obtained by additive manufacturing with controlled columnar-equiaxed-transition. *Journal of Materials Science & Technology*, 156, 183-196.
45. Wang, X., He, X., Wang, T., ve Li, Y. (2020). The influence of the microtexture and orientation of columnar grains on the fatigue crack growth of directed energy deposited Ti-6.5 Al-2Zr-Mo-V alloys. *Additive Manufacturing*, 35, 101174.
46. Chen, Q., Lin, S., Yang, C., Fan, C., ve Ge, H. (2017). Grain fragmentation in ultrasonic-assisted TIG weld of pure aluminum. *Ultrasonics Sonochemistry*, 39, 403-413.
47. Cui, Y., Xu, C., ve Han, Q. (2007). Microstructure Improvement in Weld Metal Using Ultrasonic Vibrations. *Advanced Engineering Materials*, 9, 161-163.
48. Dong, H., Yang, L., Dong, C., ve Kou, S. (2012). Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 534, 424-435.
49. Tian, Y., Shen, J., Hu, S., Wang, Z., ve Gou, J. (2018). Effects of ultrasonic vibration in the CMT process on welded joints of Al alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 282-291.
50. Todaro, C., Easton, M., Qiu, D., Zhang, D., Bermingham, M., Lui, E., Brandt, M., StJohn, D., ve Qian, M. (2020). Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound. *Nature communications*, 11, 1-9.
51. Ning, F., Hu, Y., Liu, Z., Cong, W., Li, Y., ve Wang, X. (2017). Ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of Inconel 718 parts: a feasibility study. *Procedia Manufacturing*, 10, 771-778.
52. Zhu, L., Yang, Z., Xin, B., Wang, S., Meng, G., Ning, J., ve Xue, P. (2021). Microstructure and mechanical properties of parts formed by ultrasonic vibration-assisted laser cladding of Inconel 718. *Surface and Coatings Technology*, 410, 126964.
53. Zhang, C., Gao, M., ve Zeng, X. (2019). Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 271, 85-92.

54. Keshavarzkermani, A., Sadowski, M., ve Ladani, L. (2018). Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation. *Journal of Alloys and Compounds*, 736, 297-305.
55. Gokcen, N.A., Reddy, R.G. (2013). *Thermodynamics* (Springer Science & Business Media).
56. Handbook, A., Aggen, G., ve Washko, S. (1990). Wrought Stainless Steels. *Properties and Selection: Irons, Steels and High-performance Alloys* 1.
57. Li, Y., Luo, Y., Li, J., Song, D., Xu, B., ve Chen, X. (2021). Ferrite formation and its effect on deformation mechanism of wire arc additive manufactured 308 L stainless steel. *Journal of Nuclear Materials*, 550, 152933.
58. Lo, K.H., Shek, C.H., ve Lai, J. (2009). Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 65, 39-104.
59. Li, Y., Yu, D., Li, B., ve Chen, X. (2019). Martensitic transformation of an austenitic stainless steel under non-proportional cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, 124, 338-347.
60. Wu, W., Xue, J., Wang, L., Zhang, Z., Hu, Y., ve Dong, C. (2019). Forming process, microstructure, and mechanical properties of thin-walled 316L stainless steel using speed-cold-welding additive manufacturing. *Metals*, 9, 109.
61. Inoue, H., Koseki, T. (2017). Solidification mechanism of austenitic stainless steels solidified with primary ferrite. *Acta Materialia*, 124, 430-436.
62. Chen, X., Li, J., Cheng, X., He, B., Wang, H., ve Huang, Z. (2017). Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 703, 567-577.
63. Ge, J., Lin, J., Lei, Y., ve Fu, H. (2018). Location-related thermal history, microstructure, and mechanical properties of arc additively manufactured 2Cr13 steel using cold metal transfer welding. *Materials Science and Engineering: A*, 715, 144-153.
64. Hejripour, F., Binesh, F., Hebel, M., ve Aidun, D.K. (2019). Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 272, 58-71.
65. Lippold, J., Savage, W. (1980). Solidification of austenitic stainless steel weldments: Part 2—The effect of alloy composition on ferrite morphology. *Welding Journal*, 59, 48s-58s.
66. Wang, L., Xue, J., ve Wang, Q. (2019). Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 751, 183-190.
67. Cong, W., Ning, F. (2017). A fundamental investigation on ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of stainless steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 121, 61-69.

68. Gorunov, A. (2020). Additive manufacturing of Ti6Al4V parts using ultrasonic assisted direct energy deposition. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 545-556.
69. Wang, H., Hu, Y., Ning, F., ve Cong, W. (2020). Ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of Inconel 718 parts: Effects of ultrasonic frequency on microstructural and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 276, 116395.
70. Wang, S., Guo, Z., Zhang, X., Zhang, A., ve Kang, J. (2019). On the mechanism of dendritic fragmentation by ultrasound induced cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 51, 160-165.
71. Yuan, D., Shao, S., Guo, C., Jiang, F., ve Wang, J. (2021). Grain refining of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser and wire additive manufacturing assisted with ultrasonic vibration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105472.
72. Li, Y., Zhang, D., Wang, H., ve Cong, W. (2021). Fabrication of a TiC-Ti matrix composite coating using ultrasonic vibration-assisted laser directed energy deposition: the effects of ultrasonic vibration and TiC content. *Metals*, 11, 693.
73. Naseri, R., Koohkan, K., Ebrahimi, M., Djavanroodi, F., ve Ahmadian, H. (2017). Horn design for ultrasonic vibration-aided equal channel angular pressing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 1727-1734.
74. Choi, Y.-J., Park, K.-H., Hong, Y.-H., Kim, K.-T., Lee, S.-W., ve Choi, H.-Z. (2013). Effect of ultrasonic vibration in grinding; horn design and experiment. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14, 1873-1879.
75. Gang, J.-P. (1991). A Study on the Design of ultrasonic Vibration Cutting Tool horn. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 8, 55-63.
76. Afshari, M., Arezoo, B. (2021). Optimal design and experimental validation of ultrasonic wide blade horn. *Applied Acoustics*, 182, 108254.
77. Xiao, C.-f., Han, B. (2019). Research and design of ultra-long ultrasonic horn. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* 100, 1015-1022.
78. Yazdian, A., Karafi, M.R. (2022). An analytical approach to design horns and boosters of ultrasonic welding machines. *SN Applied Sciences*, 4, 166.
79. Newland, D.E. (2013). *Mechanical vibration analysis and computation*, Newyork: Courier Corporation.
80. Chamim, M., Darmadi, D.B., Purnowidodo, A., Widodo, T.D., ve Ismail, Z. (2024). Influence of the welding thermal cycle on δ -ferrite evolution in the first layer of austenitic stainless steel (ASS) 308L produced by WAAM-GTAW. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64, 105489.
81. Setia, P., Venkateswaran, T., Tharian, K.T., Jain, J., Singh, S.S., ve Shekhar, S. (2022). Influence of Si content on the microstructure and mechanical properties of silicon stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 829, 142141.

82. Yilmaz, O., Uglu, A.A. (2017). Microstructure characterization of SS308LSi components manufactured by GTAW-based additive manufacturing: shaped metal deposition using pulsed current arc. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 13-25.







Gazili olmak ayrıcalıktır