



**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLEN MEKANİK
ELEMANLARIN STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Eren KOÇAK

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

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.

Eren KOÇAK

04/06/2021

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLEN MEKANİK ELEMANLARIN STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Eren KOÇAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Katmanlı İmalat Yöntemi'nin (KİY) uygulamaları ve KİY üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, KİY'nin geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha esnek tasarım imkanı sağlamasından dolayı her geçen gün artmaktadır. KİY'nin bu özelliği, tasarım mühendislerinin karmaşık geometriye sahip ve hafif bileşenler tasarlamasına olanak tanıdığından, yakıt tüketiminin azalmasını, yük taşıma kapasitesinin artmasını ve daha uzun uçuş / nakliye menzili elde edilmesini sağlamaktadır. Bahsi geçen avantajları sebebiyle KİY, uzay ve havacılık ile otomotiv sanayileri için oldukça cazip olmaktadır. Yukarıda belirtilen avantajlarına rağmen, KİY'nin bazı dezavantajları da vardır. KİY kullanılarak üretilen mekanik parçalar, parçanın dinamik ve statik özelliklerinin değişmesine sebep olan artık gerilmelere, kendine özgü mikro yapısal özelliklere ve olası dahili kusurlara sahip olabilmektedir. KİY'de, özelliklerine ve uygulama alanlarına göre farklı tipte metalik malzemeler kullanılabilir. 17-4 PH paslanmaz çelik, 315 °C'ye varan yüksek sıcaklıklarda, çok yüksek mukavemeti ve iyi korozyon direnci nedeniyle mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilen metalik malzemelerden biridir. Çalışma kapsamında, 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin, Seçici Lazer Eritme yöntemi ile argon gazı altında, dikey yönde çekme ve eğilmeli yorulma numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelere farklı tipte ısıtılma işlemi uygulanarak ısıtılma işleminin statik ve dinamik davranışa olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, numunelerin oda sıcaklığında, darbe tahrik tekniği kullanılarak modal testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, oda sıcaklığında statik çekme testleri ve eğilmeli yorulma testleri icra edilmiştir. Testler tamamlandıktan sonra her bir numunenin içyapısı optik mikroskop ile incelenmiş ve sertlik değerleri elde edilmiştir. Elde edilen mekanik özellikler literatür ve eğilmeli yorulma özellikleri ise geleneksel yöntemle üretilmiş numunelerin verileri ile karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 91422

Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat yöntemi, seçici lazer eritme, metal, ısıtılma işlemi, deneysel modal analiz, mekanik davranış, titreşim, eğilmeli yorulma

Sayfa Adedi : 105

Danışman : Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

AN INVESTIGATION OF STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOR OF MECHANICAL
COMPONENTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Eren KOÇAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

The applications of Additive Manufacturing (AM) and studies on AM are increasing day by day due to the more flexible design opportunity of the AM compared to traditional production methods. Since this feature of the AM allows design engineers to design components with complex geometry and lightweight, it provides a decrease in fuel consumption, an increase in load carrying capacity and a longer flight / transport range. Due to the mentioned advantages, AM is very attractive for aerospace, aviation and automotive industries. Despite the advantages mentioned above, the AM also has some disadvantages. Mechanical parts produced using AM may have residual stresses, unique microstructural properties and possible internal defects that cause the dynamic and static properties of the part to change. Different types of metallic materials can be used in AM according to their properties and application areas. 17-4 PH stainless steel is one of the most preferred metallic materials in engineering applications due to its very high strength and good corrosion resistance at high temperatures up to 315 ° C. Within the scope of the study, vertical tensile and bending fatigue samples were produced from 17-4 PH stainless steel material under argon atmosphere using Selective Laser Melting (SLM) method. Different types of heat treatment were applied to the samples and the effect of heat treatment on static and dynamic behavior was examined. In this context, modal tests of the samples were carried out at room temperature using the impact technique. Then, static tensile tests and bending fatigue tests were performed at room temperature. After the tests were completed, the internal structure of each sample were examined by optical microscope, and hardness values were obtained.

Science Code : 91422

Key Words : Additive manufacturig method, selective laser melting, metal, heat treatment, experimental modal analysis, mechanical behaviour, vibration bending fatigue

Page Number : 105

Supervisor : Assoc. Prof. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca kıymetli bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY'a, kıymetli tecrübelerinden yararlandığım ve karşılaştığım sıkıntıları aşmamda desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen yöneticim Bülent ACAR'a, yürütülen deneysel çalışmalarda yardımını esirgemeyen iş arkadaşlarım Caner GENÇOĞLU, Emre ÖZASLAN, Andaç ÖZSOY, Doğancan BAHAN ve Başar ALTINTAŞ'a, çalışmanın gerçekleşebilmesine olanak sağlayan Gazi Üniversitesi ve Roketsan A.Ş.'ye, bu süreçte destekleriyle beni hiç bir zaman yalnız bırakmayan ve hep yanımda olan sevgili eşim Pelin KILIÇ KOÇAK ile tez yazım sürecinde kucağıma aldığımız biricik oğlum Kuzey KOÇAK'a ve beni büyüten, yetiştiren değerli aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. TEORİK ALTYAPI	13
3.1. Eklemeli İmalat Teknolojileri.....	13
3.1.1. Seçici Lazer Eritme (SLM).....	14
3.2. Çökelim Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler.....	15
3.2.1. Yarı östenitik çökelim sertleşmeli paslanmaz çelikler	16
3.2.2. Martenzitik çökelim sertleşmeli paslanmaz çelikler	17
3.3. Çökelim Sertleştirme Isıl İşlemleri	17
3.3.1. Çözündürme ısıtma işlemi	18
3.3.2. Soğutma	18
3.3.3. Çökelim veya yaşlanma sertleşmesi.....	18
3.4. Tahribatsız Muayene ve İyiyapı İncelenmesi	19
3.5. Sertlik ve Ölçüm Yöntemleri.....	20
3.6. Yüzey Pürüzlülüğü	21
3.7. Çekme Testi	21

Sayfa

3.8. Deneysel Modal Analiz.....	21
3.9. Yorulma Testi	23
3.9.1. Yorulma ömrü tahmini	24
3.9.2. Yorulma çatlağı başlangıcı	25
3.9.3. Gerilme yoğunlaşması etkisi.....	27
3.9.4. Test numunesinin boyut etkisi	27
3.9.5. Yüzey pürüzlülüğü etkisi	28
3.9.6. Ortalama gerilmenin etkisi.....	28
3.9.7. Sinüs tarama testleri	29
3.9.8. Sinüs bekletme testleri	31
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
4.1. Malzeme.....	33
4.1.1. Paslanmaz çelik	33
4.2. Numune Geometrilere.....	33
4.2.1. Çekme testi numunesi	33
4.2.2. Yorulma testi numunesi	35
4.3. Isıl İşlemler	36
4.4. Testler.....	38
4.4.1. Çekme testleri	38
4.4.2. Modal testler	40
4.4.3. Radyografik test.....	41
4.4.4. Yüzey pürüzlülüğü testleri	41
4.4.5. Sinüs tarama testleri	41
4.4.6. Eğilmeli yorulma testleri.....	44

Sayfa

4.4.7. Sertlik testleri	48
4.4.8. İç yapı incelenmesi	48
4.4.9. Sıvı penetran testi	48
5. ÖLÇÜMLER VE TEST SONUÇLARI	49
5.1. Radyografik Test Sonuçları	49
5.1.1. Çekme testi numuneleri	49
5.1.2. Eğilmeli yorulma testi numuneleri	50
5.2. Çekme Testi Sonuçları	51
5.2.1. Üretim halli çekme numuneleri	51
5.2.2. Çekme numuneleri – HT1	53
5.2.3. Çekme numuneleri – HT2	56
5.2.4. Çekme numuneleri – HT3	58
5.3. Deneysel Modal Analiz Sonuçları	62
5.3.1. Eklemeli imalat üretimi, üretim halli çekme numuneleri sonuçları	62
5.3.2. Eklemeli imalat üretimi, HT1, çekme numuneleri sonuçları	64
5.3.3. Eklemeli imalat üretimi, HT2, çekme numuneleri sonuçları	65
5.3.4. Eklemeli imalat üretimi, HT3, çekme numuneleri sonuçları	67
5.3.5. Eklemeli imalat üretimi, yorulma numuneleri sonuçları	71
5.3.6. Geleneksel yöntem üretimi, yorulma numuneleri sonuçları	73
5.4. İç Yapı İncelenmesi	75
5.4.1. Çekme Numuneleri Optik Mikroskop Görüntüleri	75
5.5. Sinüs Tarama Testleri	77
5.5.1. Eklemeli imalat üretimi, yorulma numuneleri sonuçları	77
5.6. Eğilmeli Yorulma Testleri	78

Sayfa

5.6.1. Eklemeli imalat üretimi, yorulma numuneleri sonuçları	78
5.6.2. Geleneksel yöntem üretimi, yorulma numuneleri sonuçları	83
5.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	88
5.7.1. Eklemeli imalat üretimi, yorulma testleri numuneleri	88
5.8. Sıvı Penetran Testleri	89
5.8.1. Eklemeli imalat üretimi, yorulma testleri numuneleri	89
5.8.2. Geleneksel yöntem üretimi, yorulma testleri numuneleri	90
5.9. Sertlik Testleri	92
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR.....	99
ÖZGEÇMİŞ	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Isıl işlemler sıcaklık ve süre bilgileri	19
Çizelge 4.1. Çekme ve yorulma numunelerine uygulanan ısı işlemler	37
Çizelge 4.2. Numunelere uygulanan girdi ivme genlikleri	46
Çizelge 5.1. Üretim halli numuneler, çekme testi sonuçları	52
Çizelge 5.2. H900 (HT1), çekme testi sonuçları	54
Çizelge 5.3. H1025 (HT2), çekme testi sonuçları	57
Çizelge 5.4. H1150 (HT3), çekme testi sonuçları	59
Çizelge 5.5. Üretim halli çekme numuneleri, doğal frekans değerleri	63
Çizelge 5.6. H900 (HT1) çekme numuneleri, doğal frekans değerleri	65
Çizelge 5.7. H1025 (HT2) çekme numuneleri, doğal frekans değerleri	67
Çizelge 5.8. H1150 (HT3) çekme numunesi, doğal frekans değeri	69
Çizelge 5.9. Çekme numuneleri doğal frekans, analiz/test karşılaştırması	71
Çizelge 5.10. Sertlik testi sonuçları	92

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. EİT şematik gösterim	14
Şekil 3.2. SLM genel üretim şeması.....	14
Şekil 3.3. SLM şematik gösterim	15
Şekil 3.4. Çökelim sertleşmeli paslanmaz çeliklerin bileşimi	16
Şekil 3.5. Doğal frekans ve mod şekilleri	23
Şekil 3.6. Yorulma testleri, gerilme parametreleri	25
Şekil 3.7. Metallere ait tipik bir S-N grafiği	26
Şekil 3.8. S-N eğrisi, yorulma limiti	27
Şekil 3.9. Çelik şaft yorulma dayanımı değerleri	28
Şekil 3.10. Ortalama gerilmenin yorulma dayanımına etkisi	29
Şekil 3.11. Sinüs tarama testi, girdi ve cevap ivme-zaman grafikleri	30
Şekil 3.12. Sinüs tarama testi, birden fazla doğal frekans ivme-zaman cevabı.....	30
Şekil 3.13. Sinüs tarama testi, geçirgenlik fonksiyonu	31
Şekil 4.1. Küçültülmüş ölçekteki çekme testi numunesi.....	34
Şekil 4.2. EİT ile üretilmiş çekme testi numuneleri	34
Şekil 4.3. EİT ile üretilmiş yorulma testi numuneleri	35
Şekil 4.4. 17-4 PH çelik plaka	35
Şekil 4.5. 17-4 PH plakadan üretilmiş yorulma testi numuneleri.....	36
Şekil 4.6. Isıl işlem özellikleri	38
Şekil 4.7. Instron marka, 5980 serisi universal çekme cihazı	38
Şekil 4.8. Gerinim ölçer ve video ekstansometre	39
Şekil 4.9. Çekme testleri, test düzeneği	39
Şekil 4.10. Serbest-serbest sınır koşulunda modal test düzeneği, çekme numunesi	40

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Serbest-serbest sınır koşulunda modal test düzeneği, yorulma numunesi	41
Şekil 4.12. Sinüs tarama testleri, test düzeneği	42
Şekil 4.13. Sinüs tarama testleri, test düzeneği malzeme bilgileri	42
Şekil 4.14. Yorulma numunesi, gerinim ölçerler.....	43
Şekil 4.15. Yorulma numunesi, lazer deplasman ölçer ve kontrol ivmeölçeri	43
Şekil 4.16. Elektro-dinamik sarsıcı, Modal shop, model 2110E-HT	45
Şekil 4.17. Elektro-dinamik sarsıcı amfisi	45
Şekil 4.18. Siemens scadas mobil kontrolcü.....	46
Şekil 4.19. Yorulma testleri, eklemeli imalat numunesi	47
Şekil 4.20. Yorulma testleri, geleneksel yöntem numunesi	47
Şekil 5.1. Üretim halli numuneler, mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri	52
Şekil 5.2. Üretim halli numuneler, nihai çekme dayanımı karşılaştırma	52
Şekil 5.3. Üretim halli numuneler, literatür karşılaştırması	53
Şekil 5.4. Üretim halli numuneler, nihai çekme dayanımı, literatür karşılaştırması	53
Şekil 5.5. H900 (HT1), mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri	54
Şekil 5.6. H900 (HT1), nihai çekme dayanımı karşılaştırma	54
Şekil 5.7. H900 (HT1), literatür karşılaştırması	55
Şekil 5.8. H900 (HT1), nihai çekme dayanımı, literatür karşılaştırması	55
Şekil 5.9. H1025 (HT2), mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri	56
Şekil 5.10. H1025 (HT2), nihai çekme dayanımı karşılaştırma	57
Şekil 5.11. H1025 (HT2), literatür karşılaştırması	57
Şekil 5.12. H1025 (HT2), nihai çekme dayanımı, literatür karşılaştırması	58
Şekil 5.13. H1150 (HT3), mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri	59
Şekil 5.14. H1150 (HT3), nihai çekme dayanımı karşılaştırma	59

Şekil	Sayfa
Şekil 5.15. H1150 (HT3), literatür karşılaştırması	60
Şekil 5.16. H1150 (HT3), nihai çekme dayanımı, literatür karşılaştırması	60
Şekil 5.17. Tüm numuneler, mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri	61
Şekil 5.18. Tüm numuneler, nihai çekme dayanımı karşılaştırma	61
Şekil 5.19. Üretim halli çekme numunesi, tahrik ve ölçüm noktaları	62
Şekil 5.20. Karşıtlık teoremi, üretim halli 1 numaralı numune, FTF grafikleri.....	62
Şekil 5.21. Üretim halli çekme numuneleri, FTF grafikleri	63
Şekil 5.22. Karşıtlık teoremi, 1 numaralı numune, FTF grafikleri	64
Şekil 5.23. H900 (HT1) ısıt işlemleri uygulanmış numuneler, FTF grafikleri	65
Şekil 5.24. Karşıtlık teoremi, 1 numaralı numune, FTF grafikleri	66
Şekil 5.25. H1025 (HT2) ısıt işlemleri uygulanmış numuneler, FTF grafikleri	67
Şekil 5.26. Karşıtlık teoremi, 3 numaralı numune, FTF grafikleri	68
Şekil 5.27. H1150 (HT3), 3 numaralı numune, FTF grafiği	69
Şekil 5.28. Çekme testi numuneleri, doğal frekans karşılaştırma	70
Şekil 5.29. Çekme numuneleri mod şekli, analiz/test karşılaştırması	70
Şekil 5.30. Çekme numuneleri doğal frekans değerleri, analiz/test karşılaştırması	71
Şekil 5.31 Yorulma numuneleri, ısıt işlem öncesi FTF grafikleri	72
Şekil 5.32. Yorulma numuneleri, ısıt işlem sonrası FTF grafikleri.....	72
Şekil 5.33. Yorulma numuneleri, 1. eğilme modu doğal frekans değişimi.....	73
Şekil 5.34. Yorulma numuneleri, 2. eğilme modu doğal frekans değişimi.....	73
Şekil 5.35. Geleneksel yöntem yorulma numuneleri, FTF grafikleri.....	74
Şekil 5.36. Geleneksel yöntem yorulma numuneleri, doğal frekans değerleri.....	74
Şekil 5.37. Yorulma numuneleri, 1. eğilme modu doğal frekans değerleri	75
Şekil 5.38. Yorulma numuneleri, 2. eğilme modu doğal frekans değerleri	75

Şekil	Sayfa
Şekil 5.39. Girdi ivme değerlerine göre yüzey gerilmesi-zaman grafikleri.....	77
Şekil 5.40. Girdi ivme değerlerine göre yüzey gerilmeleri değişimi	77
Şekil 5.41. Yüzey gerilmesi/uç deplasman değişimi.....	78
Şekil 5.42. 12 numaralı numune, yorulma testi öncesi ve sonrası FTF grafikleri	79
Şekil 5.43. 1 numaralı numune, yorulma testi öncesi ve sonrası FTF grafikleri	79
Şekil 5.44. Yorulma testleri, numunelerin frekans değişimleri	80
Şekil 5.45. Yorulma testleri, %1 frekans düşüşü çevrim sayısı eldesi	81
Şekil 5.46. Yorulma testleri, numune gerilme değerleri	81
Şekil 5.47. Yorulma testleri, %1 frekans düşüşü, S-N eğrisi.....	82
Şekil 5.48. Yorulma testleri, %1 frekans düşüşü, literatür (eksenel) karşılaştırması	82
Şekil 5.49. Eklemeli imalat numuneleri, yorulma testleri sıcaklık değişimi	83
Şekil 5.50. 14 numaralı numune, yorulma testi öncesi ve sonrası FTF grafikleri	84
Şekil 5.51. 4 numaralı numune, yorulma testi öncesi ve sonrası FTF grafikleri	84
Şekil 5.52. Numunelerin frekans değişimleri, geleneksel yöntem	85
Şekil 5.53. Yorulma testleri, numune (geleneksel yöntem) gerilme değerleri	86
Şekil 5.54. Yorulma, %1 frekans düşüşü, S-N eğrisi, geleneksel yöntem.....	86
Şekil 5.55. Yorulma, %1 frekans düşüşü, S-N eğrisi karşılaştırma	87
Şekil 5.56. Yorulma testleri sıcaklık değişimi, geleneksem yöntem.....	88
Şekil 5.57. Eklemeli imalat numunesi, R_a yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	88

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. EİT üretimi çekme numuneleri, radyografik test görüntüsü	49
Resim 5.2. EİT üretimi yorulma numuneleri, radyografik test görüntüsü	50
Resim 5.3. Yorulma numuneleri (geleneksel yöntem), radyografik test görüntüsü	50
Resim 5.4. 6 numaralı yorulma numunesi (geleneksel yöntem), yüzey çatlağı	51
Resim 5.5. Üretim halli numuneler, optik mikroskop görüntüleri	76
Resim 5.6. Isıl işlem uygulanmış numuneler, optik mikroskop görüntüleri	76
Resim 5.7. Eklemeli imalat numuneleri, sıvı penetran testi görüntüsü, üst yüzey	89
Resim 5.8. Eklemeli imalat numuneleri, sıvı penetran testi görüntüsü, alt yüzey	90
Resim 5.9. Geleneksel yöntem numuneleri, sıvı penetran testi görüntüsü, üst yüzey	91
Resim 5.10. Geleneksel yöntem numuneleri, sıvı penetran testi görüntüsü, alt yüzey ...	91

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

Hz	Hertz
K	Gerilme yoğunlaştırma faktörü
mm	Milimetre
MPa	Mega paskal
Ra	Yüzey pürüzlülük değeri
Rq	Yüzey pürüzlülük değeri
Rz	Yüzey pürüzlülük değeri
Sa	Gerilme genliği
Sm	Ortalama gerilme
Sr	Gerilme aralığı
µm	Mikrometre

Kısaltmalar

Açıklamalar

3B	3 Boyutlu
CAD	Computer Aided Design
DED	Direct Energy Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
EBAM	Electron Beam Additive Manufacture
EİT	Eklemeli İmalat Teknolojisi
FDM	Fused Deposition Modeling
FFT	Fast Fourier Transform
FTF	Frekans Tepki Fonksiyonu
FRF	Frequency Response Function
HT	Heat Treatment
KİY	Katmanlı İmalat Yöntemi

Kısaltmalar**Açıklamalar****KÖ**

Küçültülmüş Ölçekteki

LBM

Laser Beam Melting

LENS

Laser Engineered Net Shaping

NDT

Non-Destructive Testing

PBF

Powder Bed Fusion

SEA

Sonlu Elemanlar Analizleri

SEM

Scanning Electron Microscopy

SEBM

Selective Electron Beam Melting

SEY

Sonlu Elemanlar Yöntemi

SLM

Selective Laser Melting

TEM

Transmission Electron Microscopy

UTS

Ultimate Tensile Strength

1. GİRİŞ

Malzeme özellikleri, neredeyse bütün mühendislik uygulamalarında, kullanılan parçaların görevlerini sağlıklı bir şekilde yerine getirebilmesi için önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, ilgili parçanın veya sistemin ömür döngüsü boyunca maruz kalacağı statik ve dinamik yüklere göre performansının tasarım aşamasında bilinmesi gerekmektedir. Günümüzde, mühendislik uygulamalarında ilave fonksiyonlara sahip yüksek performanslı malzemelere olan ihtiyaç artış göstermektedir. Dahili soğutma kanalları, iç kafes yapıları gibi geleneksel yöntemlerle üretimi zor olan fonksiyonlara olan ihtiyaç, parçaların kompleks bir hal almasına ve dolayısıyla eklemeli imalat yöntemlerine olan ilginin artmasına sebep olmuştur [1]. Eklemeli imalat yöntemleri ile, doğrudan bilgisayar destekli tasarım verileri kullanılarak, katman katman, 3 boyutlu (3B) parçalar üretilebilmektedir [2].

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Seçici Lazer Eritme (İng. Selective Laser Melting - SLM), ham maddeyi toz formunda kullanan ve parçanın 3B modelden geometrisini oluşturan, katmanlı imalatla genellikle 3B baskı olarak bilinen bir süreçtir. SLM yöntemi ile geometri, katman katman oluşturulmaktadır. Yöntemde, metal tozun her katmanını eritmek ve parçanın geri kalanına yapıştırmak için yüksek yoğunluklu bir lazer kullanılmaktadır. Bu üretim süreci, seri üretim parçalarının üretiminde kullanılabildiğinden sıklıkla tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Son yirmi yıldır, erimiş biriktirme modelleme (İng. Fused Deposition Modeling - FDM), stereolitografi vb. gibi 3B imalat süreçleri olmasına rağmen, bu işlemler çoğunlukla işlevsel/seri üretim olmayan prototiplerin üretimiyle sınırlı kalmıştır. SLM seri üretim için kullanılabilecek işlevsel parçalar yapmak için kullanılabildiğinden ve geliştirme süresini önemli ölçüde kısalttığından, SLM'nin ortaya çıkışı Eklemeli İmalat Teknolojisi (EİT)'nde önemli bir gelişme olmuştur [3].

SLM yönteminde farklı tipte mühendislik malzemesi kullanılabilmektedir. 17-4 PH paslanmaz çelik de SLM tarafından kullanılabilen malzemelerden bir tanesidir. 17-4 PH paslanmaz çelik, 315 °C'ye varan yüksek sıcaklıklarda, çok yüksek mukavemeti ve iyi korozyon direnci nedeniyle mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilen metalik malzemelerinden biridir. SLM ile kompleks geometriye sahip parçaların üretimi hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, diğer EİT yöntemlerine benzer şekilde boşluk, ergime noksanlığı ve yüzey pürüzlülüğü gibi üretilen parçanın performansını olumsuz yönde

etkileyebilecek durumların varlığı, SLM yönteminin en önemli dezavantajlarından. Eklemeli imalatın doğası gereği oluşabilecek bu dezavantajların, kullanılacak parçanın statik ve dinamik özelliklerini nasıl etkileyeceğinin bilinmesi önem arz etmektedir. Literatürde, iç yapı, mekanik (akma mukavemeti, nihai çekme dayanımı, kopma uzaması, sertlik) ve dinamik (yorulma) özelliklerin elde edilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur. Gerçekleştirilen çalışmalarda, SLM ve diğer EİT yöntemleri ile üretilen numunelerin, iç yapı, mekanik ve genellikle eksenel ile burulmalı yorulma davranışlarını elde etmeye yönelik araştırmalar yapılmıştır.

Mühendislik uygulamalarında kullanılan parçalar ömür döngüleri boyunca özellikle dinamik olarak farklı tipte yüklere maruz kalmaktadırlar. Dinamik yüklemeler, eksenel ve burulma etkisi yaratacak şekilde olabildiği gibi eğilme türü yüklemelerde olabilmektedir. Özellikle, türbin kanatları, roket/füze gövdeleri ve kontrol yüzeyleri gibi kritik öneme sahip parçalar, ömür döngülerinin büyük bir bölümünde eğilme yüküne maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle, kritik öneme sahip bu tip parçaların eğilme yükü altındaki davranışlarının tasarım aşamasında bilinmesi, parçaların kullanıldıkları sistemin güvenliği ve güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Eğilme yükü altında testler, titreşim tabanlı olarak gerçekleştirilme olup, numune yüksek rezonans frekanslarında tahrik edilmektedir.

Çalışma kapsamında, SLM yöntemi ve 17-4 PH paslanmaz çelik malzeme kullanılmış olup, literatürde SLM üretimi 17-4 PH numunelerin doğal frekans ve mod şekli gibi modal parametrelerinin ve eğilme yükü altında yorulma davranışının elde edilmesine yönelik çalışmaların eksik olduğu görülmüştür. Bu nedenle, tez kapsamında, düşey yönde argon gazı altında üretilen numunelerin hem mekanik hem de eğilme yükü altında yorulma davranışları incelenmiştir. Tezin amacı, farklı ısıtma işlemlerin (çözündürme ısıtma işlemi + H900/H1025/H1150) iç yapı, sertlik, akma dayanımı, nihai çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik parametrelere etkisini, çözündürme ve H900 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin, geleneksel yöntemle üretilip benzer ısıtma işlemi uygulanmış numunelere göre eğilmeli yorulma davranışını elde etmektir. Bu kapsamda önce, ASTM-E8M standardındaki (ASTM Standard E8/E8M-13a, 2013) Küçültülmüş Ölçekteki (KÖ, İng. Sub-Size) çekme testi numuneleri üretilmiştir. Üretimden sonra, KÖ çekme numunelerine çözündürme ısıtma işlemi ortak olacak şekilde üç farklı yaşlandırma ısıtma işlemi (H900, H1025, H1150) uygulanmıştır. Üretim halli ve ısıtma işlemi uygulanmış tüm çekme numunelerinin, doğal frekans ve mod şekillerini elde etmek amacıyla, oda sıcaklığında, darbe tahrik tekniği

kullanılarak serbest-serbest sınır koşulunda modal testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile doğrulanmıştır. Modal testler tamamlandıktan sonra, numunelerde üretim kaynaklı makro düzeyde bir boşluk veya kusur olup olmadığını elde etmek için tahribatsız muayene tekniklerinden olan radyografik testler icra edilmiştir. Radyografik muayeneden sonra, Instron çekme testi cihazı kullanılarak, ASTM-E8M standardına göre [4], oda sıcaklığında statik çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numunelerinin iç yapıları optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Her bir bir numunenin sertlik değerleri de elde edilerek mekanik özellik karakterizasyon aşaması tamamlanmıştır.

Mekanik karakterizasyon aşaması tamamlandıktan sonra, eğilmeli yorulma testlerinde kullanılmak üzere, KÖ çekme numunelerine benzer üretim yönü ve parametreleri ile yorulma testi numuneleri üretilmiştir. Yorulma testi numunesinin geometrisine karar verilirken, üretim kaynaklı rastgele iç yapı kusurlarının olabileceği dikkate alınmış ve numuneler, gerilim konsantrasyonu oluşturmak için delikli olarak üretilmiştir. Üretim tamamlandıktan sonra, mekanik karakterizasyon aşamasına benzer şekilde radyografik test ve yine darbe tahrik tekniği kullanılarak serbest-serbest sınır koşulunda modal testler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numunelere çözündürme ve H900 ısıtma işlemi uygulanıp, ısıtma işleminin modal parametrelerde bir etkisinin olup olmadığını elde etmek amacı ile serbest-serbest sınır koşulundaki modal testler tekrarlanmıştır. Modal testler sonrası, elektro dinamik sarsıcı kullanılarak, eğilme yükü altında, konsol sınır koşulunda yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testlerinde kullanılacak numune ve fişstür geometrilerinin son haline karar verilirken farklı sönüm oranlarında ve girdi genliklerinde harmonik Sonlu Elemanlar Analizleri (SEA) gerçekleştirilmiştir. Yorulma testlerinde eğilme yükü sinüs bekleme tekniği kullanılarak numune rezonansında uygulanmıştır. Yorulma testlerine geçilmeden önce, konsol sınır koşulundaki numunenin doğal frekanslarını elde etmek amacıyla modal testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, numunelerin girdi genliğine bağlı gerilme davranışını elde etmek için, gerçekleştirilen modal testlerden elde edilen numune ilk elastik doğal frekansı kullanılarak frekans tarama genişliğine karar verilen, farklı genlikteki sinüs tarama testleri icra edilmiştir. Sinüs tarama testlerinden sonra eğilmeli yorulma testlerine geçilmiştir. Yorulma testleri süresince hem gerinim ölçer hem ısıtma çifti hem de lazer ile sırasıyla gerinim, sıcaklık ve deplasman ölçümleri alınmıştır. Yorulma testleri numunenin ilk elastik doğal frekansında gerçekleştirilmiş olup, test sürecinde doğal frekanstaki değişim modal testlerden elde edilen Frekans Tepki Fonksiyonu (FTF) grafikleri kullanılarak kontrol

edilmiş ve doğal frekanstaki değişime göre girdinin frekansı sürekli olarak güncellenmiştir. Yukarıda bahsi geçen tüm aşamalar hem EİT hem de geleneksel yöntem ile üretilmiş tüm numuneler için tekrarlanmıştır. Bu şekilde eğilmeli yorulma dayanımı karakterizasyon aşaması tamamlanmıştır. Deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra elde edilen veriler literatür verileri ile karşılaştırılmıştır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

EİT, dijital bir model (bilgisayar destekli tasarım, Ing. Computer Aided Design - CAD) tarafından yönlendirilen ince malzeme katmanlarını aşamalı olarak ekleyerek 3B parçalar oluşturmaktadır. Bu teknoloji, karmaşık veya özelleştirilmiş parçaların, pahalı üretim aletlerine veya döküm kalıplarına ihtiyaç duymadan doğrudan üretilmesini sağlamaktadır ve birçok geleneksel işleme/üretim adımına olan ihtiyacı azaltmaktadır. Karmaşık parçalar, geleneksel işleme/üretim yöntemlerinin (örn. Düz kesimler, yuvarlak delikler) veya şekillerin (örn. Levha, boru) sınırlamaları olmaksızın, ilk tasarım hallerine sadık bir şekilde tek adımda üretilmektedir. Ek olarak, EİT ile birden fazla bileşeni birleştirme ihtiyacı ortadan kaldırılarak veya azaltılarak parça sayısında önemli bir azalma sağlanabilmektedir. Ayrıca, parçalar talep üzerine üretilmekte, bu da yedek parça envanterini azaltmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, EİT, artık havacılık, tıp, enerji ve otomotiv uygulamaları için yüksek performanslı bileşenlerin tasarımı ve üretimi için yeni bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir [2]. Öte yandan, EİT ile üretilen parçalarda kusurlar olacaktır ve parçaların güvenli kullanımı için, kusurların boyutunu ve şeklini niteleyebilmek önemlidir. Mekanik özellikler gerekenden düşükse, bileşenlerin işlevi ve güvenliği riske girebilmektedir. [5]. Bu nedenle, EİT ile üretilen parçaların güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için üretim parametrelerine bağlı olarak karakterizasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir. EİT'nin doğası gereği ortaya çıkabilecek bu kusurlar, parçanın hem statik (monotonik çekme özelliği) hem de dinamik (yorulma) özelliklerini etkileyebilmektedir.

Yorulma özelliklerinin doğası gereği, işleme türünden bağımsız olarak deneysel verilerde çok fazla dağılım ortaya çıkmaktadır. EİT ile üretilen parçalarda bu dağılım, kusurların veya ortaya çıkan geometrik düzensizliklerin varlığı nedeniyle büyüyebilmektedir.

EİT ile üretilen parçaların yorulma özellikleri ile ilgili genellikle yüzeyle ilgili kusurlar, iç kusurlar ve üretim sonrası ısı işlemlerin yorulma ömrü üzerindeki etkileri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir [2].

Yüzey pürüzlülüğü, gerilim konsantrasyonlarına neden olduğundan parçanın yorulma performansını olumsuz etkilemektedir ve şu anda EİT'nin en önemli dezavantajlarından biridir [2]. Greitemeier [3], iki farklı EİT yöntemi Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Ing. Direct

Metal Laser Sintering – DMLS) ve Elektron Işını Eritme (İng. Electron Beam Melting - EBM) ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların eksenel yorulma performanslarına yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemiştir. Greitemeier [3], elde ettiği sonuçlara göre yüksek tekrarlı eksenel yorulma performansının, yüzey pürüzlülüğü arttıkça azaldığını belirtmiştir. Fatemi [5], Toz Yatak Kaynaştırma (İng. Powder Bed Fusion – PBF) ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların çok eksenli yorulma performansına yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmıştır. Fatemi [5], yüzey pürüzlülüğünün EİT ile üretilen parçaların çok eksenli yorulma dayanımlarını azalttığını belirtmiştir. Bagehorn [6], Lazer Işını Eritme (İng. Laser Beam Melting - LBM) yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların eksenel yorulma dayanımlarına mekanik yüzey işlemlerin etkisini araştırmıştır. Bagehorn [6], mekanik yüzey işleme yöntemleri ile azaltılan yüzey pürüzlülüğünün yüksek tekrarlı eksenel yorulma dayanımını artırdığı sonucuna ulaşmıştır. Sarkar [7] ise, SLM metodu ile üretilen 15-5 PH paslanmaz çelik numunelerin dönme-eğilme yorulma davranışının farklı yüzey işleme yöntemlerine göre değişimini incelemiştir. Sarkar [7] elde ettiği sonuçlara göre, yüzey işlemenin dönme-eğilme yorulma ömrünü iyileştirdiğini belirtmiştir. Sanaei [8], PBF yöntemi ile üretilmiş metal parçaların tek eksenli yorulma davranışlarını incelemiştir. Sanaei [8], ilgili parçaların yüzey pürüzlülüğü azaldıkça yorulma limitlerinin arttığı sonucuna ulaşmıştır. Liang [9], SLM ile üretilmiş 316L paslanmaz çelikten üretilen numunelerin eksenel yorulma davranışını incelemiştir ve yüksek yüzey pürüzlülüğünün yorulma dayanımını olumsuz yönde etkilediğini bildirmiştir. Bahsi geçen çalışmalarla birlikte, literatürde, yüzey pürüzlülüğünün EİT ile üretilen parçaların yorulma davranışlarına etkisi ile ilgili yeterli miktarda çalışma bulunmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalarda [10-14], yükleme tipinden bağımsız olarak farklı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen numunelerin, yorulma limitlerinin yüzey pürüzlülüğünün artışı ile olumsuz etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğüne benzer şekilde iç kusurlar da EİT ile üretilen parçaların yorulma dayanımlarını önemli derecede etkilemektedir. Ergime noksanlığı (İng. Lock of fusion) ve boşluk (İng. porosity) en genel iç kusurlardandır [2]. Liu [15], farklı oryantasyonlarda SLM metodu ile üretilmiş Ti-6Al4V numunelerdeki iç yapı kusurlarının eksenel yorulma dayanımına etkisini incelemiştir. Liu [15], optik mikroskop ve SEM ile yapılan inceleme sonucunda yorulma çatlaklarının iç yapı kusurlarından başladığını ve iç yapı kusurlarının her iki üretim yönü içinde yorulma ömrünü olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Hrabec [16], EBM yöntemi ile düşey yönde üretilen Titanium alaşımı (Ti-6Al-4V) parçalardaki iç kusurların eksenel yorulma dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Hrabec [16], iç yapı

kusurlarının yorulma çatlaklarının başlamasına neden olduğunu ve iç yapı kusurlarının azaltılması durumunda yorulma ömrünün artacağını bildirmiştir. Meneghetti [17], yatay ve düşey pozisyonlarda EBM ile üretilen yüksek dayanımlı çelik (İng. Maraging steel) numunelerdeki iç kusurların eksenel yorulma ömrü üzerindeki etkisini incelemiştir. Meneghetti [17], eksenel yorulma kaynaklı çatlakların, iç yapıdaki kusurlardan başladığını ve EİT ile üretilmiş numunelerin eksenel yorulma ömürlerinin geleneksel yöntemle üretilen numune ömürlerinden daha düşük olduğunu belirtmiştir. Smith [18], yatay ve düşey pozisyonlarda Doğrudan Enerji Biriktirme (İng. Direct Energy Deposition – DED) ile üretilen 304L östenitik paslanmaz çelik numunelerin yorulma davranışlarına iç yapı kusurlarının etkisini incelemiştir. Smith [18] elde ettiği sonuçlara dayanarak, yorulma çatlaklarının iç yapı kusurlarından başladığını ve kusurların olmadığı durumlarda, EİT ile üretilen numunelerin yorulma dayanımlarının geleneksel yöntemle üretilen parçalar ile benzer olduğunu açıklamıştır. Tang [19], SLM ile üretilmiş AlSi10Mg numunelerin eksenel yorulma davranışları üzerine iç kusurların etkisini incelemiştir. Tang [19], önceki çalışmalara benzer şekilde yorulma çatlaklarının iç kusurlardan başladığını ve eksenel yorulma ömrünü etkilediğini açıklamıştır.

Üretim sonrası ısıtılma işleminin EİT üretimi parçaların yorulma performansını artırmaya olan etkisini incelemek için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Zhang [20], SLM ile üretilmiş AlSi10Mg numunelerin eksenel yorulma dayanımlarına farklı ısıtılma işlemlerinin etkisini araştırmıştır. Zhang [20] elde ettiği sonuçlara göre, en iyi yorulma dayanımını üretim haliyle (İng. As-built) olan numunelerin gösterdiğini, yumuşatma tavlama (İng. Solution heat treatment/annealing) olarak uygulanan ısıtılma işleminin eksenel yorulma dayanımını düşürdüğünü belirtmiştir. Ek olarak, eksenel yorulma dayanımının, akma dayanımı ile ilişkili olduğunu, yüksek akma dayanımının olduğu durumda daha yüksek eksenel yorulma dayanımı elde edildiğini bildirmiştir. Sarkar [21], SLM ile farklı oryantasyonlarda üretilen 15-5 PH paslanmaz çelik numunelerinin dönme-eğilme yorulma dayanımına farklı ısıtılma işlemlerinin etkisini elde etmeye çalışmıştır. Sarkar [21], düşey yönde üretilen parçaların hem üretim halli hem de ısıtılma işlemi uygulanmış durumları için yatay olarak üretilen numunelere göre daha düşük yorulma dayanımı gösterdiğini elde etmiştir. Ek olarak, her iki üretim oryantasyonu için de üretim halli numunelere göre, H900 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerin daha kötü, H1150 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerin ise daha iyi yorulma performansı gösterdiklerini belirtmiştir. Meid [22], Seçici Elektron Işını Eritme (İng. Selective Electron Beam Melting – SEBM) ile üretilen nikel temelli super alaşım parçaların, yüksek sıcaklık

düşük tekrarlı yorulma davranışına farklı ısı işlemlerin etkisini incelemiştir. Meid [22] elde ettiği sonuçlara göre, ısı işlem görmüş parçaların, üretim halli parçalara göre daha yüksek yorulma dayanımlarının olduğunu açıklamıştır. Seki [23], SLM ile farklı oryantasyonlarda üretilen CoACrAMo alaşımı numunelerin eksenel yorulma dayanımlarına ısı işlemin etkisi üzerine çalışmıştır. Seki [23], ısı işlem uygulanan parçaların üretim yönünden bağımsız olarak üretim halli parçalara göre daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğunu bildirmiştir. Blinn [24], gerilim giderici bir ısı işlemin, yatay ve düşey pozisyonlarda SLM ile üretilen östenitik paslanmaz çelik AISI 316L'nin yorulma özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Blinn [24], gerilim giderici ısı işlem ile, yatay olarak üretilmiş numunelerin yorulma dayanımında iyileşme elde edildiği ancak, dikey olarak üretilen numunelerde ise belirgin bir farkın olmadığı sonucuna ulaşmıştır.

Literatürde, EİT ile üretilen numunelerin yorulma davranışlarına ek olarak mekanik özelliklerinin ve iç yapısının da incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Zhao [25], Ti – 6Al – 4V alaşımlarının mikro yapısı, gerilme özellikleri ve yorulma özellikleri açısından EBM ve SLM yöntemlerini karşılaştırmıştır. Parça boyutunu, oryantasyonun kusur üzerindeki etkisini, mikro yapıyı ve bunların çekme ile yorulma özelliklerine etkisini açıklamıştır. Zhao [25] elde ettiği sonuçlara göre, her iki yöntem ile, düşey pozisyonda üretilen parçaların, yatay pozisyonda üretilen parçalara göre daha yüksek nihai ve akma dayanımı ile sünekliğe sahip olduğunu, üretilen parçaların geleneksel yöntem ile üretilen parçalara göre daha düşük yorulma dayanımına sahip olduğunu belirtmiştir. Todai [26], EBM ile üretilen Ti-48Al-2Cr-2Nb alaşımının mikro yapı ve çekme deformasyon özelliklerini incelemiştir. Todai [26], EBM ile üretilen Ti-48Al-2Cr-2Nb alaşımının akma dayanımı ve gerilme uzamasının, üretim yönü ile yükleme yönü arasındaki θ açısına bağlı olarak büyük ölçüde değiştiğini elde etmiştir. Zhou [27], SEBM ile üretilen nikelce zenginleştirilmiş NiTi alaşımının mikro yapısını, faz dönüşümünü ve mekanik özelliklerini incelenmiştir. Zhou [27] çalışma sonucunda elde ettiği bulgulara göre, SEBM ile üretilen NiTi alaşımının, oda sıcaklığında tekrarlı basma testlerinde, mükemmel ve kararlı süper esneklik gösterdiğini, çekme performansının da SLM ve Lazerle Tasarlanmış Ağ Şekillendirme (İng. Laser Engineered Net Shaping – LENS) NiTi alaşımlarına kıyasla daha üstün olduğunu belirtmiştir. Yi [28] çalışmasında, SLM ile üretilen numunelerdeki, erimiş havuzların morfolojisinin, gözenek kusurlarının, mekanik özelliklerin ve deformasyonların çizgi lazer enerji yoğunluğu ile ilişkisi üzerine bulgular elde etmiştir. Yi [28], mekanik özelliklerin, lazer enerji yoğunluğunun belli bir değerine kadar artış gösterdiğini açıklamıştır. Wen [29],

SLM ile üretilen yüksek yoğunluklu tungstenin, yoğunlaştırılmasını, mikro yapısını, mekanik ve termal performansını araştırmıştır. Wen [29], üretim parametrelerinin optimize edilmesi ile yüksek bağıl yoğunluk (%98.7) ve basma dayanımı (1523 MPa) elde edildiğini, tarama hızının artırılması ile de iç yapının iri kolun tipi tanelerden, düzgün ince tanelere değiştiğini ifade etmiştir. Bai [30], SLM ile yüksek dayanımlı çelik (Ing. Maraging steel) malzemeden üretilmiş parçaların, mikro yapı ve mekanik özelliklerine farklı ısı işlemlerin etkisini incelemiştir. Bai [30] elde ettiği sonuçlara göre, farklı özellikteki ısı işlemlerin mikro yapı oluşumunda, sertlik, tokluk ve çekme dayanımı üzerinde önemli etkilerinin olduğunu belirtmiştir. Zhang [31], ısı işlemlerin SLM ile üretilen Cu-Cr alaşımının mikro yapısı, mekanik özellikleri, iletkenliği ve korozyon performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır ve farklı ısı işlemler kullanılarak farklı mukavemet, iletkenlik ve korozyon direnci elde edilebileceğini ifade etmiştir. Zhang [32], çözelti ve yaşlandırma işlemlerinin tel beslemeli Elektron Işını Eklemeli İmalat (İng. Electron Beam Additive Manufacture – EBAM) ile üretilmiş Ti-5Al2Sn-2Zr-4Mo-4Cr titanyum alaşımının mikro yapısı ve gerilme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Zhang [32] çalışma sonucunda, EBAM Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr'nin mikro yapısı ve mekanik özellikleri arasındaki nicel bir ilişki olduğunu ifade etmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmaların birçoğunda EİT ile üretilen parçaların eksenel ve çok eksenli yorulma davranışları incelenmiştir. Ancak, George [33], eğilmeli yorulma testi metodunun, malzemelerin yorulma karakterizasyonlarında ciddi bir zaman kazancı sağladığını, ilgili parçanın davranışı hakkında birkaç saat içinde bilgi edinilebildiğini belirtmiştir. Ek olarak, titreşim tabanlı bu yöntemin, uygun numune tasarımı ile, tamamen ters eğilme altında yüksek frekanslarda hem tek eksenli hem de çift eksenli gerilme durumu oluşturulabildiği göstermiştir. George [33] ayrıca, bu yöntemin, parçanın rezonans frekansında gerçekleştirilmesinden dolayı, test numunesindeki yorulma çatlağının varlığını başlangıç aşamasındayken belirleyebilme avantajının olduğunu ve bu yöntem ile türbin kanatları gibi yüksek tekrarlı yorulmaya maruz kalan parçaların, geniş bir gerilme bandında yorulma özelliklerinin belirlenebileceğini açıklamıştır. Tafti [34] ise, konik kesitli plakalara, yüksek tekrarlı yorulma dayanımlarını elde etmek için sinus bekleme tekniği ile titreşime dayalı bir test yöntemi uygulamıştır. Tafti [34], uygulanan yüksek tekrarlı yorulma testi yöntemi ile, yüksek frekanslarda eğilme modu için gerekli gerilmelerin oluşturulabildiğini açıklamıştır. Gerçekleştirilen testlerin ayrıca yeni parça tasarımlarında hem test süresini hem de genel deneysel maliyetleri azalttığını ifade etmiştir. Gianni Nicoletto [35] ise, DMLS metodu ile

üretilmiş Ti6Al4V numunelerin düzlem eğilme yüklemesi altında yüksek tekrarlı yorulma davranışını incelemiştir. Nicoletto [35], elde edilen test sonuçlarını literatürdeki verilerle karşılaştırdığında, kullanılan numune geometrisi ve test yönteminin verimli ve güvenilir olduğunu belirtmiştir. Önerilen test yönteminin, özellikle PBF alaşımlarının ve işlem parametrelerinin geliştirme çalışmaları için kullanılabileceğini, böylece malzeme ve işlem süresinden kazanç sağlanabileceğini ifade etmiştir. Nicoletto [36] başka bir çalışmada da, ısıtıl işlem görmüş farklı açılarda DMSL ve EBM yöntemleri ile üretilen, Ti6Al4V alaşımlarının düzgün yorulma davranışını elde etmiştir. Nicoletto [36], üretim halleriyle DMLS Ti6Al4V'nin yorulma dayanımının ve yüzey kalitesinin, EBM Ti6Al4V'den önemli ölçüde daha iyi olduğunu, yeni tekrarlı düzlemsel eğilmeli yorulma testi metodolojisinin, üretim halli PBF metallerinin davranışı hakkında orijinal bilgiler sağladığını ifade etmiştir.

Literatürde, havacılık, tıp gibi alanlarda yoğunlukla kullanılan titanyum alaşımları, 316L paslanmaz çelik gibi malzemelere ek olarak, çalışma kapsamında kullanılan EİT ile üretilmiş 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin iç yapı, mekanik ve yorulma özelliklerine ilişkin çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Thompson [37], SLM ile üretilmiş 17-4 PH numunelerin mekanik ve iç yapı özelliklerine üretim yönünün (yatay ve düşey) ve ısıtıl işlemin etkisini araştırmıştır. Thompson [37], SLM üretimi parçaların (üretim halli ve ısıtıl işlemlili) akma ve nihai çekme dayanımlarının, H900 ısıtıl işlemlili geleneksel yöntem ile üretilmiş parçalara göre üretim yönünden bağımsız olarak kayda değer bir şekilde düşük olduğunu belirtmiştir. Ek olarak hem yatay hem düşey pozisyonda üretilen üretim halli numunelerin kopma uzamalarının literatürdeki diğer çalışmalara göre düşük olduğunu ifade etmiştir. Bu duruma, erimemiş tozlar ile boşluk gibi iç kusurların sebep olabileceğini açıklamıştır. Thompson [37], ayrıca, yatay yönde üretilen numunelerin nihai çekme dayanımlarının hem üretim halli hem de ısıtıl işlem uygulanmış durumda düşey yönde üretilen numunelerin nihai çekme dayanımlarından daha yüksek olduğunu ve uygulanan ısıtıl işlemin hem yatay hem de düşey yönde üretilen numunelerin akma ve nihai çekme dayanımlarını artırdığını belirtmiştir. Yadollahi [38], SLM üretimi 17-4 PH paslanmaz çelik numunelerin eksenel yorulma dayanımına üretim sonrası uygulanan ısıtıl işlemin etkisini incelemiştir. Yadollahi [38], uygulanan ısıtıl işlemin düşük tekrar yorulma dayanımını artırıcı, yüksek tekrar yorulma dayanımını ise azaltıcı yönde etki ettiğini belirtmiştir. Isıtıl işlem uygulanmış numunelerin yüksek tekrarlı yorulma dayanımının, üretim halli numunelerin dayanımından daha düşük olduğunu ifade etmiştir. Mahmoudi [39], SLM ile üretilen 17-4 PH numunelerin mekanik ve içyapı özelliklerine üretim yönünün, ısıtıl işlemin, termal geçmişin ve üretim

parametrelerinin etkisini incelemiştir. Mahmoudi [39], üretim yönünün mekanik özellikleri ve içyapıyı etkilediğini, düşey yönde üretilen numunelerin daha düşük dayanıma sahip olduğunu belirtmiştir. Bu sonuca, dikey olarak oluşturulmuş numunelerin katmanlar arası zayıf ara yüzeylerinin, çekme yükü altında kesme bandı birleşmesi ve boşluk büyümesini kolaylaştıran çatlaklara paralel olmasının sebep olduğunu ifade etmiştir. Ek olarak ısıtılma işleminin, akma, nihai çekme ve basma dayanımları ile sertliği artırdığını, ısıtılma işlem görmüş numunelerin, üretim halli numunelere göre daha düşük süneklik gösterdiğini açıklamıştır.

Mahmoudi [39], iç kusurların az olduğu bir yapı elde edebilmek için her bir malzemeye göre üretim parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Hu [40], SLM üretimi 17-4 PH numunelerin yoğunluk, iç yapı ve sertlik özelliklerine üretim parametrelerinin, mekanik özelliklere de ısıtılma işleminin etkisini araştırmıştır. Hu [40], tarama hızı ve katman kalınlığının, yoğunluk ve boşluk karakteristiği, tarama hızı, katman kalınlığı ve tarama boşluğunun sertlik üzerine etkilerinin olduğunu bildirmiştir. Hu [40] ayrıca, ısıtılma işlem uygulanmış numunelerin, ısıtılma işlem uygulanmamış numunelere göre akma mukavemetinin kayda değer oranda daha yüksek, sünekliğinin ise daha düşük olduğunu ifade etmiştir.

Carneiro [41], SLM ile dikey yönde üretilen numunelerin eksenel yorulma performansını geleneksel yöntemle üretilmiş numunelerin eksenel yorulma davranışı ile karşılaştırmıştır. Carneiro [41] elde ettiği sonuçlara göre, SLM ile üretilen numunelerin eksenel yorulma ömürlerinin, geleneksel yöntemle üretilmiş numunelerin eksenel yorulma ömründen yaklaşık %50 daha düşük olduğunu belirtmiştir. Eksenel yorulma ömrünün daha düşük olmasının iç kusurlar ve boşluklardan kaynaklandığını ifade etmiştir. Ek olarak Carneiro [41]), düşük gerinim genliklerinde kopmanın baskın bir çatlaktan, yüksek gerinim genliklerinde ise yüzeyde birden fazla noktadan başlayarak gerçekleştiğini açıklamıştır. Nezhadfar [42], L-PBF ile üretilmiş 17-4 PH numunelerin içyapı ve mekanik özelliklerine ısıtılma işleminin, eksenel yorulma davranışına da yüzey pürüzlülüğü ve ısıtılma işleminin etkileşimli etkisini araştırmıştır. Nezhadfar [42], H900 tipi ısıtılma işleminin çekme dayanımını ciddi oranda artırdığını, H1025 ve H1150 tipi ısıtılma işlemleri ile ise H900'a oranla daha az bir artış elde edildiğini ifade etmiştir. Nezhadfar [42], ısıtılma işlemleri öncesinde çözündürme ısıtılma işlemi uygulanmasının eksenel yorulma dayanımını hem düşük tekrar hem de yüksek tekrar bölgesinde ayrıca artırdığını, çözündürme ısıtılma işleminin yüzeyi işlenmiş numunelere uygulanmasının da eksenel yorulma performansını artırıcı yönde etki ettiğini belirtmiştir. Romano [43], LB-PBF ile üretilmiş çözündürme ısıtılma işlemi ve H1025 ısıtılma işlemi uygulanmış

17-4 PH numunelerin eksenel yorulma davranışlarına yüzey işleminin etkisi üzerine çalışmıştır. Romano [43], yüzey işleme ile birlikte numunelerin eksenel yorulma dayanımlarında ciddi bir artış elde edildiğini, üretim halli numunelerin düşük eksenel yorulma dayanımına sahip olmasına yüzey çatlaklarının sebep olduğunu belirtmiştir. Ek olarak, yüzey işleme uygulanmış numunelerde çatlak başlangıçlarının, yüzeyin altında bulunan boşluklardan (20-30 mikron büyüklüğünde) başladığını açıklamıştır. Romano [43], çözündürme ve H1025 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin daha yüksek eksenel yorulma dayanımına sahip olduğunu ifade etmiştir.



3. TEORİK ALTYAPI

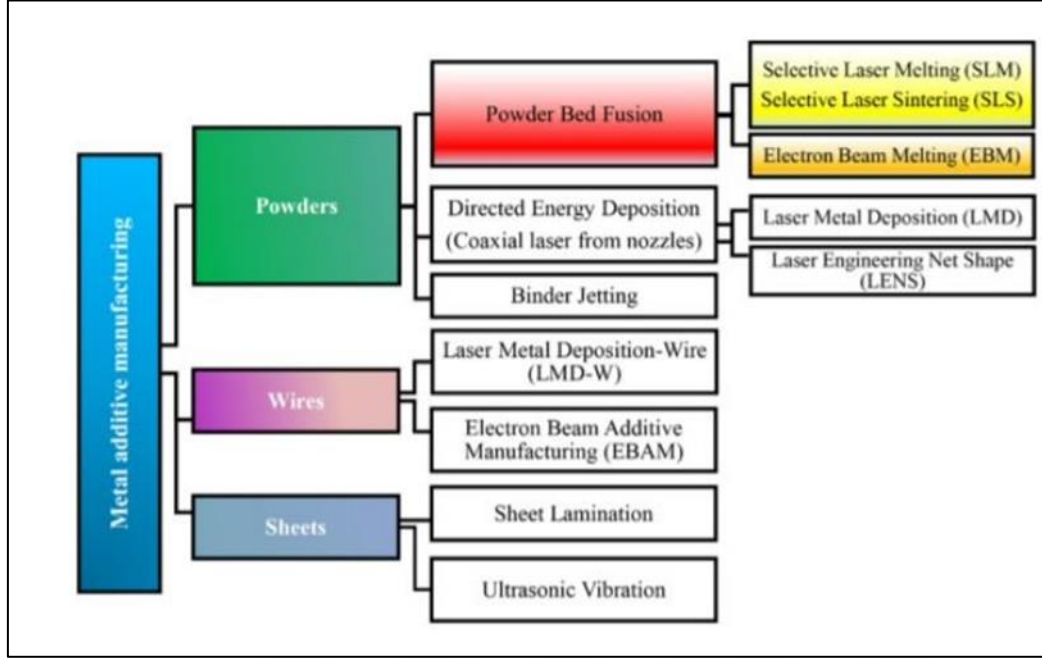
3.1. Eklemeli İmalat Teknolojileri

EİT, bir CAD tarafından yönlendirilen ince malzeme katmanlarını aşamalı olarak ekleyerek 3B parçalar oluşturmaktadır. Bu teknoloji, karmaşık veya özelleştirilmiş parçaların, pahalı üretim aletlerine veya döküm kalıplarına ihtiyaç duymadan doğrudan üretilmesini sağlamaktadır ve birçok geleneksel işleme/üretim adımına olan ihtiyacı azaltmaktadır. Karmaşık parçalar, geleneksel işleme/üretim yöntemlerinin (örn. Düz kesimler, yuvarlak delikler) veya şekillerin (örn. Levha, boru) sınırlamaları olmaksızın, ilk tasarım hallerine sadık bir şekilde tek adımda üretilebilmektedir. Ek olarak, EİT ile birden fazla bileşeni birleştirme ihtiyacı ortadan kaldırılarak veya azaltılarak parça sayısında önemli bir azalma sağlanabilmektedir. Ayrıca, parçalar talep üzerine üretilebilmekte, bu da yedek parça envanterini azaltmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, EİT, artık havacılık, tıp, enerji ve otomotiv uygulamaları için yüksek performanslı bileşenlerin tasarımı ve üretimi için yeni bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir [2]. Öte yandan, EİT ile üretilen parçalarda kusurlar olacaktır ve parçaların güvenli kullanımı için, kusurların boyutunu ve şeklini niteleyebilmek önemlidir. Mekanik özellikler gerekenden düşükse, bileşenlerin işlevi ve güvenliği riske girebilmektedir [44]. Bu nedenle, EİT ile üretilen parçaların güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için üretim parametrelerine bağlı olarak karakterizasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

EİT, esas olarak hammaddenin doğası ve malzeme katmanları arasındaki bağlanma mekanizmasına göre sınıflandırılabilir. Metallerin EİT'sinde, bir toz besleme stoğu veya daha nadiren bir tel, bir lazer veya elektron ışınının enerjisi ile tamamen eritilir ve katmanlar halinde katı bir parçaya dönüştürülür.

Metallerin EİT'si için en popüler işlemler Lazer Işını Eritme (Ing. Laser Beam Melting - LBM), Elektron Işını Eritme (Ing. Electron Beam Melting - EBM) ve Lazer Metal Biriktirme (Ing. Laser Metal Deposition - LMD)'dir. LBM işlemi aynı zamanda Seçici Lazer Eritme (Ing. Selective Laser Melting – SLM), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Ing. Direct Metal Laser Sintering - DMLS), Lazer Metal Füzyonu (Ing. Laser Metal Fusion - LMF) veya endüstriyel 3B baskı olarak da bilinir. Eklemeli İmalat Yöntemleri'ne (EİY) ait şematik

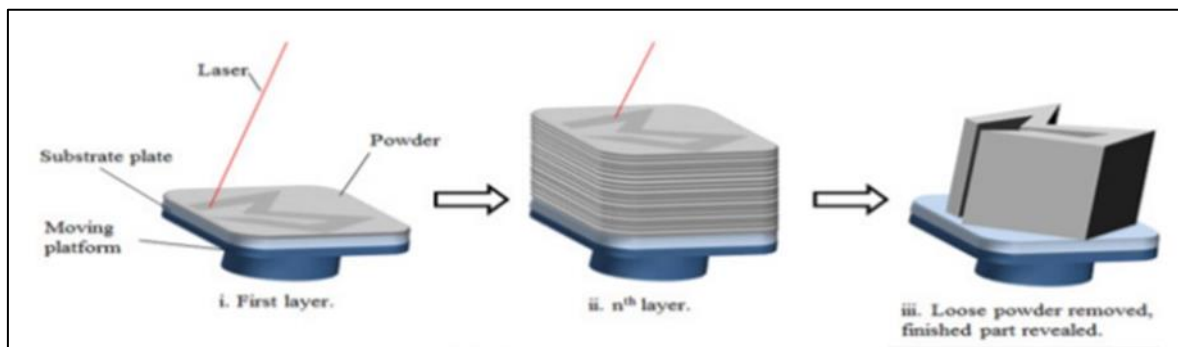
gösterim Şekil 3.1’de verilmiştir [45]. Bu çalışmada, mekanik özellikleri değerlendirilen parçalar SLM ile üretilmiştir.



Şekil 3.1. EİT şematik gösterim

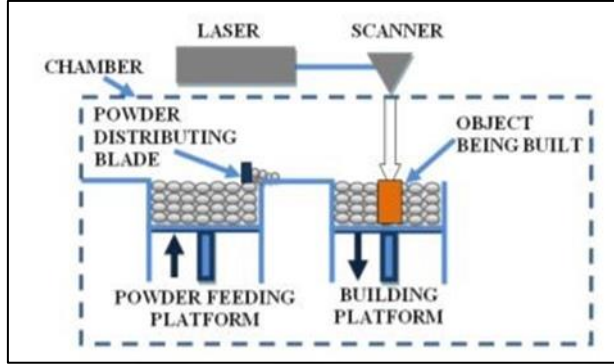
3.1.1. Seçici Lazer Eritme (SLM)

SLM, EİT’de en yaygın olarak kullanılan toz yatağı füzyon proseslerinden biridir. Adından da anlaşılacağı gibi SLM, metal tozlarını eriten ve kaynaştıran bir lazer ışını kullanmaktadır. İnce bir toz tabakası, bir alt tabaka plakası üzerine veya önceden yerleştirilmiş tabaka üzerine bırakılır ve lazer ışını, CAD verilerinin belirttiği gibi toz partiküllerini seçici bir şekilde eritir ve birleştirir [45]. SLM’ye ait şematik gösterim Şekil 3.2’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.2. SLM genel üretim şeması

SLM ile üretimde, hatasız bir parça üretebilmek için, lazer gücü, lazer tarama hızı, tarama mesafesi, kapak örtüşmeleri, tarama stili gibi çeşitli parametrelerin dikkatlice ayarlanması gerekir (Şekil 3.3). Üretime olan etkilerinin yanı sıra, bu parametrelerdeki herhangi bir hata, malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir [45].



Şekil 3.3. SLM şematik gösterim

3.2. Çökelim Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Özel paslanmaz çelik ailesinde en son geliştirilen çeliklerden biri olan çökelim sertleşmeli paslanmaz çelikler (İng. precipitation hardenable - PH) hala geliştirilmeye açık bir durumdadır. Çözelti ile tavllanmış halde biraz yumuşak ve sünektirler, ancak nispeten düşük bir çökelme sertleştirme sıcaklığına, 1000°F (540°C) maruz kaldıklarında, mukavemetleri iki katından fazla artar ve çok sert hale gelirler. Genellikle metalürjik yapıları martenzitiktir, ancak bazı özel yüksek nikel içeriğine sahip olanlar östenitiktir. Yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaları, alüminyum, bakır, titanyum veya molibden bileşikler olan mikroskobik altı çökeltilerin oluşumundan kaynaklanmaktadır. Oluşan bu mikroskobik altı çökeltiler, yapıya uygulanan zorlamalara karşı direnç sağlamaktadır. Bu çökeltiler o kadar küçüktür ki, ancak özel elektron mikroskopları ile son derece yüksek büyütmelemlerde gözlemlenebilmektedirler.

Çökelim sertleşmeli paslanmaz çelikler, yüksek mukavemet ve korozyon direncinin gerekli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu sebeple ağırlıklı olarak, havacılık ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır ancak, son zamanlarda enstrümantasyon ve akışkan kontrolünde kullanılmaya başlanmıştır [46].

Çökelim sertleşmeli paslanmaz çeliklerin, yarı östenitik ve martenzitik olmak üzere iki ana tipi bulunmaktadır. Yarı östenitik çökelim sertleşmeli paslanmaz çelikler çözeltiyle tavllanmış durumda östenitiktir. Ancak, üretim işlemleri tamamlandıktan sonra, östeniti martenzite dönüştüren bir östenit şartlandırma ısı işlemi ve ardından çökeltme sertleştirme ısı işlemi ile martenzite dönüştürülebilmektedirler. Martenzitik tipler ise, çözeltiyle tavllanmış durumda zaten martenzitiktir ve üretimden sonra çökelme sertleştirme gerektirmektedirler.

PH çeliklerinin bileşimlerine ait görsel Şekil 3.4'de [47] verilmiştir.

Alloy	Composition, wt%								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Other
Martensitic type									
PH13-8 Mo	0.05	0.10	0.10	12.25-13.25	7.5-8.5	2.0-2.5	0.01	0.008	0.90-1.35 Al; 0.01 N
15-5PH	0.07	1.00	1.00	14.0-15.5	3.5-5.5	...	0.04	0.03	2.5-4.5 Cu; 0.15-0.45 Nb
17-4PH	0.07	1.00	1.00	15.0-17.5	3.0-5.0	...	0.04	0.03	3.0-5.0 Cu; 0.15-0.45 Nb
Custom 450	0.05	1.00	1.00	14.0-16.0	5.0-7.0	0.5-1.0	0.03	0.03	1.25-1.75 Cu; 8 x %C min Nb
Custom 455	0.05	0.50	0.50	11.0-12.5	7.5-9.5	0.50	0.04	0.03	1.5-2.5 Cu; 0.8-1.4 Ti; 0.1-0.5 Nb
Semiaustenitic type									
PH15-7 Mo	0.09	1.00	1.00	14.0-16.0	6.50-7.75	2.0-3.0	0.04	0.04	0.75-1.50 Al
17-7PH	0.09	1.00	1.00	16.0-18.0	6.50-7.75	...	0.04	0.04	0.75-1.50 Al
AM-350	0.07-0.11	0.50-1.25	0.50	16.0-17.0	4.0-5.0	2.50-3.25	0.04	0.03	0.07-0.13 N
AM-355	0.10-0.15	0.50-1.25	0.50	15.0-16.0	4.0-5.0	2.50-3.25	0.04	0.03	0.07-0.13 N
Austenitic type									
A-286	0.08	2.00	1.00	13.5-16.0	24.0-27.0	1.0-1.5	0.025	0.025	1.90-2.35 Ti; 0.35 max Al; 0.10-0.50 V; 0.0030-0.0100 B
Source: Ref 1									

Şekil 3.4. Çökelim sertleşmeli paslanmaz çeliklerin bileşimi

3.2.1. Yarı östenitik çökelim sertleşmeli paslanmaz çelikler

Yarı östenitik PH çeliklerinin en önemlilerinden bir tanesi 17-7 PH'di. 17-7 PH alaşımı, östenitik tip 301 paslanmaz ile yaklaşık olarak aynı krom ve nikel içeriklerine sahiptir, ancak aynı zamanda çökelme sertleştirme için ağırlıkça %1.2 Al içerir. Yumuşak durumda üretildikten sonra, östenitin martenzite dönüşebilmesi için koşullandırılmaktadır.

Yarı östenitik alaşımların şartlandırma işlemi, karbonu katı çözültiden ayırmak ve krom karbür (Cr₂₃C₆) olarak çökeltmek için yeterince yüksek bir sıcaklığa ısıtma adımı içerir. Östenit matrisinden karbon ve bir miktar krom uzaklaştırıldığında, östenit kararsız hale gelir ve martenzit oluşma sıcaklığına (M_s) soğutulduğunda, östenit martenzite

dönüşmektedir. Koşullandırma daha yüksek sıcaklıkta (955 °C) yapılırsa çökelen karbür miktarı azalmaktadır.

Son aşama ise 480-650 °C aralığında gerçekleştirilen çökelim sertleştirmesidir. Çökelim sertleşmesi sırasında, martenzit içindeki alüminyum, NiAl ve Ni₃Al'in intermetalik çökeltilerini üretmek için nikelin bir kısmı ile birleşmektedir [47].

3.2.2. Martenzitik çökelim sertleşmeli paslanmaz çelikler

Çökelim sertleşmeli paslanmaz çelikler, iyi mekanik özellikler ve yeterli korozyon direncinin dengeli kombinasyonu nedeniyle kimyasal ve enerji santralleri ile savunma sanayi alanlarında yapısal malzemeler olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. 17-4 PH paslanmaz çelik, ağırlıkça yaklaşık %3 Cu içeren ve martenzit matrisinde bakırın çökertilmesiyle güçlendirilen martenzitik bir paslanmaz çeliktir. Çözelti ısıtılmasından sonra, bu alaşım genellikle yaklaşık 580 °C'de tavlama ile çökelti olarak sertleştirilmektedir.

17-4 PH paslanmaz çelikteki çökeltim işlemi, servis öncesi tavlama işlemi sırasında meydana gelen bakır çökeltilerinin oluşumu ile başlamaktadır. Bu bakır çökeltileri, 400°C civarındaki sıcaklıklarda uzun süreli yaşlandırmanın ardından tutarsız FCC-Cu parçacıklarına dönüşmektedir [47].

3.3. Çökelim Sertleştirme Isıl İşlemleri

Aynı miktarda partikül için daha ince dağılım, daha güçlü malzeme davranışı sağlamaktadır. Bu tür bir dağılım, yüksek sıcaklıkta tek fazlı olan, ancak soğutma işlemi ile matriste bulunan başka bir fazı çökeltecek olan bir alaşım ile elde edilebilmektedir. Malzeme matrisinde oluşturulacak çökeltide istenen dağılımını elde etmek için ısıtılma işlemi uygulanmaktadır. Isıl işlem sonrası elde edilen yapıda sertleşme meydana gelirse, işleme çökelim sertleştirme veya yaşlanma sertleştirme ısıtılma işlemi denmektedir.

Çökelim sertleştirme ile güçlendirme mekanizması, çözünmüş aynı fazlı atom kümelerinin oluşumunu içermektedir (yani, çözünen atomlar bir küme halinde toplanmıştır, ancak yine de çözücü fazı ile aynı kristal yapıya sahiptir). Çözücü ve çözünen atomlar arasındaki boyut farklılığı bulunmaktadır. Bu boyut farklılıkları sayesinde, yapı içerisinde bulunan dislokasyonların ilerlemesi engellenmekte ve yapının güçlenip sertleşmesi sağlanmaktadır.

Bununla birlikte, çökeltiler yarı bağdaşık, tutarsız veya gerilme davranışını azaltmada yetersizse, uygulanan bir kesme kuvveti altında yapı içerisindeki dislokasyon, partiküllerin yarım daire şeklini almasına sebep olabilmekte ve dislokasyonların hareketi engellenememektedir. Bu durumda da elde edilecek mukavemet değeri düşmektedir (çökelti partikülleri yapı içerisindeki dislokasyonların hareketini engelleyerek veya geciktirerek mukavemet artışı sağlamaktadır [47]).

3.3.1. Çözündürme ısı işlemi

Çözündürme ısı işlemi, herhangi bir çökeltinin ve alaşım elementinin çözünmesine veya aşırı doymuş bir çözeltide çözünmesini sağlayan, nispeten yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen bir işlem den oluşmaktadır. Tipik çözündürme ısı işlemi çoğu paslanmaz çelik için 980 °C ile 1065 °C arasında yapılmaktadır. Bu işlem, sıcak haddeleme işlemi sırasında yapılabilmekte ve bazen "Değirmen Tavlama (İng. mill anneak)" veya "Koşul A (İng. condition A)" olarak adlandırılmaktadır.

3.3.2. Soğutma

Alaşım lar çözelti haline getirildikten sonra, metal yaklaşık oda sıcaklığına kadar soğutulmaktadır. Soğutma işlemi, hava, yağ veya suda yapılabilir, ancak aşırı doymuş katı bir çözelti elde etmek için yeterince hızlı gerçekleştirilmelidir. Bu işlem sırasındaki soğutma hızı, çeliğin nihai performansı için kritik olabilmektedir. Yüksek bir sıcaklıktan yavaş bir soğutma hızı, daha düşük bir sıcaklıktan daha hızlı bir soğutma hızından daha kaba bir tane boyutu elde etmeye sebep olabilmektedir. Bu sebeple, yeterli bir soğutma hızı ile ince bir tane boyutu elde edilerek malzemelerin mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir [47].

3.3.3. Çökelim veya yaşlanma sertleşmesi

Soğutulduktan sonra martenzitik fazın yapısı alaşım elementleri tarafından aşırı doyurulmuş haldedir. PH paslanmaz çelikler için son ısıtma adımı, 450 ila 620 °C arasındaki bir sıcaklık aralığında malzemenin yeniden ısıtılmasını içermektedir. Bu işlem, çökelme reaksiyonu ve intermetalik bileşiklerin oluşumu sonucunda hem nihai hem de akma mukavemetini artırmaktadır. İstenen mekanik özelliklere göre çökeltilerin boyutu ve dağılımı, çökelim sertleşmesinin sıcaklığı ve süresi değiştirilerek kontrol edilebilmektedir.

En yüksek mukavemet, nispeten düşük sıcaklıkta uzun süreli gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi ile homojen dağılmış küçük boyutlu çökeltilerle elde edilmektedir. Daha yüksek yaşlandırma sıcaklığı daha büyük ve daha az çökeltiye neden olmaktadır. Ayrıca, daha yüksek yaşlandırma sıcaklığı, PH paslanmaz çeliğin sertlik ve mukavemetinde azalmaya neden olan östenit fazının yeniden oluşmasına neden olabilmektedir [48].

H 900, H 925, H 1025, H 1075, H 1100, H 1150, H 1150-M olmak üzere yedi (7) standart yaşlandırma ısı işlemi bulunmaktadır [49].

AMS5604 revizyon J’de verilen standart çökeltim sertleştirme/yaşlandırma ısı işlemlerine ait sıcaklık ve süre bilgileri Çizelge 3.1’de paylaşılmıştır [50].

Çizelge 3.1. Isıl işlemler sıcaklık ve süre bilgileri

Yaşlandırma Isıl İşlemi	Yaşlandırma Sıcaklığı	Yaşlandırma Süresi
H900	900 °F $\pm$ 10 °F (482 °C $\pm$ 6 °C)	1 saat $\pm$ 5 dakika
H925	925 °F $\pm$ 10 °F (496 °C $\pm$ 6 °C)	4 saat $\pm$ 15 dakika
H1025	1025 °F $\pm$ 10 °F (552 °C $\pm$ 6 °C)	4 saat $\pm$ 15 dakika
H1075	1075 °F $\pm$ 10 °F (579 °C $\pm$ 6 °C)	4 saat $\pm$ 15 dakika
H1100	1100 °F $\pm$ 10 °F (593 °C $\pm$ 6 °C)	4 saat $\pm$ 15 dakika
H1150	1150 °F $\pm$ 10 °F (621 °C $\pm$ 6 °C)	4 saat $\pm$ 15 dakika

3.4. Tahribatsız Muayene ve İçyapı İncelenmesi

Tahribatsız muayene (İng. Non-Destructive Testing - NDT), malzemelerdeki veya parçalardaki süreksizliklerin veya özelliklerdeki farklılıkların, malzeme veya parçaların kullanılabilirliğinin bozulmadan incelenmesi, test edilmesi veya değerlendirilmesi sürecidir. Başka bir deyişle, muayene veya test tamamlandığında parça hala kullanılabilir. Tahrip edici testler ile ise genellikle darbe direnci, süneklik, akma ve nihai gerilme mukavemeti, kırılma tokluğu ve yorulma mukavemeti gibi malzemelerin fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Ancak, malzemedeki süreksizlikler ve farklılıklar NDT tarafından daha etkili bir şekilde bulunmaktadır.

Günümüzde modern tahribatsız testler, ürün bütünlüğünü ve güvenilirliğini sağlamak, üretim süreçlerini kontrol etmek, üretim maliyetlerini düşürmek ve tek tip bir kalite seviyesini korumak için imalat, üretim ve hizmet içi denetimlerde kullanılmaktadır.

Test metodu isimleri genellikle penetran ortam tipine veya bu testi gerçekleştirmek için kullanılan ekipmana göre belirlenmektedir. Mevcut NDT yöntemleri şunlardır: Akustik Emisyon Testi, Elektromanyetik Test, Lazer Test, Sızıntı Testi, Manyetik Akı Sızıntısı, Sıvı Penetran Testi, Manyetik Parçacık Testi, Nötron Radyografik Test, Radyografik Test, Termal / Kızılötesi Test, Ultrasonik Test, Titreşim Analizi ve Göz Muayenesi [51].

İç yapı incelenmesinde ise, mikro yapılar, malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemektedir. Örneğin, malzemelerin mukavemeti ve sertliği, faz sayısı ve tane boyutları, elektriksel ve manyetik özellikler ile kimyasal davranış (korozyon), tane boyutu ve malzemede bulunan kusurlar (boşluklar, dislokasyonlar, tane sınırları vb.) tarafından belirlenmektedir.

Malzemeye ait mikro yapının tam olarak belirlenebilmesi için, tanelerin ve ikinci faz partiküllerinin ve bunların bileşimlerinin boyut, şekil ve dağılım olarak tanımlanması gerekmektedir. Mikro yapısal bilgiler, doğrudan görüntülenebilir, fotoğrafik yöntemler kullanılarak kaydedilebilir, dijital olarak depolanabilir veya bir analiz sistemine giriş için bir kamerası ile alınabilmektedir.

3.5. Sertlik ve Ölçüm Yöntemleri

Sertlik, malzemenin, mekanik olarak (batma, sürtünme, çizme ve kesme) üzerinde oluşturulan izin veya aşınmanın neden olduğu yerel plastik deformasyona karşı direncidir. Malzeme sertlik değerleri farklı ölçüm yöntemleri ile elde edilebilmektedir. İlgili yöntemler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Brinell sertlik testi,
- Vickers sertlik testi,
- Rockwell sertlik testi.

3.6. Yüzey Pürüzlülüğü

Katı bir yüzey, katıların doğasına, yüzey hazırlama yöntemine ve yüzey ile çevre arasındaki etkileşime bağlı olarak karmaşık bir yapıya ve özelliklere sahiptir. Katı yüzeylerin özellikleri, gerçek temas alanını, sürtünmeyi, aşınmayı ve yağlamayı etkilediğinden dolayı çok önemlidir. Tribolojik fonksiyonlara ek olarak, yüzey özellikleri, optik, elektriksel, termal ve yorulma performansı, boyama ve görünüm gibi diğer uygulamalarda da önemlidir.

3.7. Çekme Testi

Çekme testi, en temel ve yaygın mekanik test türlerinden biridir. Çekme testi ile bir malzemeye çekme kuvveti uygulanmaktadır ve numunenin gerilmeye olan tepkisi ölçülmektedir. Çekme testleri ile bir malzemenin ne kadar güçlü olduğu ve ne kadar uzayabileceği belirlenmektedir. Çekme testleri genellikle elektromekanik veya evrensel test cihazları kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Çekme testinden, nihai çekme dayanımı, elastisite modülü, akma dayanımı ve gerinim davranışı gibi bir malzemeye ait çok önemli bilgiler elde edilebilmektedir.

3.8. Deneysel Modal Analiz

Yapısal dinamiklerin deneysel çalışması, pratikte karşılaşılan birçok titreşim fenomenini anlama ve kontrol etmede büyük katkı sağlamaktadır. Yapısal titreşim sorunları, günümüzde birçok mühendislik ürünü için büyük bir tehlike ve tasarım sınırlaması oluşturmaya devam etmektedir. Türbin kanatlarından asma köprülere kadar yapısal bütünlüğün büyük önem taşıdığı birçok mühendislik uygulamasında, sağlıklı bir tasarım için dinamik özelliklerin tam ve kesin olarak bilinmesi gerekmektedir.

Yapı üzerindeki titreşim problemleri sadece yapısal bütünlük ile alakalı değildir. Titreşim kaynaklı aşırı hareket ve gürültü gibi rahatsızlık yaratan, tasarım performansını etkileyen durumlarda doğrudan yapısal titreşimin konusu içerisine girmektedir.

Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere, herhangi bir mühendislik ürününün tasarımı aşamasında, ürünün, ömür döngüsü boyunca maruz kalacağı titreşim seviyelerinin ve ürünün

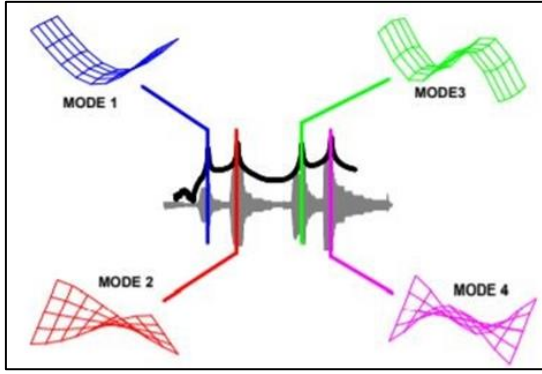
buna vereceği tepkinin tahmin edilmesi ve titreşimi kontrol edici ilgili tedbirlerin alınması, üründen beklenen performansı elde etme açısından önem arz etmektedir.

Yapısal titreşim farkındalığının ilk günlerinden beri, yapının ömür döngüsü boyunca maruz kaldığı titreşim seviyelerinin doğasını ve kapsamını belirlemek, topluca 'titreşim' olarak adlandırılan çeşitli dinamik fenomenlerin teorik modellerini ve tahminlerini doğrulamak ve sönümleme kapasitesi, sürtünme, yorulma dayanıklılığı gibi dinamik yükleme altında temel malzeme özelliklerinin ölçülmesi gibi ana amaçlar için çeşitli test yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur.

İhtiyaçlar doğrultusunda geliştirilen test yöntemlerinden birincisi, yapının çalışma koşulları altında maruz kaldığı titreşim kuvvetlerinin veya daha genel olarak tepkilerin ölçüldüğü durumdur. İkincisi ise, yapının, genellikle normal çalışma koşulları dışında, bilinen ve düşük seviyelerde uygulanan bir kuvvetle titreştirildiği ve yapı tepkilerinin ölçüldüğü test yöntemidir.

Düşük kuvvetler altında gerçekleştirilen testler, çalışma şartları altında gerçekleştirilen testlere göre daha kontrollü koşullar altında gerçekleştirildiğinden daha doğru ve ayrıntılı bilgiler vermektedir. Veri toplama ve analizinin önemli bir kısmını oluşturduğu bu tür testler günümüzde, “Modal Test” veya “Deneysel Modal Analiz” olarak adlandırılmaktadır [52].

Modal test veya deneysel modal analiz, elastik bir yapının dinamik özelliklerini (doğal frekansı, sönüm oranı, titreşim modları) deneysel olarak karakterize etme sürecidir. Yani, her bir titreşim modunun, yapı üzerindeki herhangi bir noktadan hemen hemen belirlenebilen bir doğal frekansı, sönümleme faktörü ve uzamsal olarak tanımlanabilen bir mod şekli vardır (Şekil 3.5) [53].



Şekil 3.5. Doğal frekans ve mod şekilleri

Özellikle, Frekans Tepki Fonksiyonları (FTF) ile bunların bireysel doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekli gibi modal parametreleri arasındaki ilişkilerin iyi bir şekilde kavranması önem arz etmektedir. FTF'lerin çeşitli biçimlerini ve eğilimlerini bilmek, ölçüm aşamasında sonuçların sağlıklı bir şekilde yorumlanmasını ve daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır [52].

3.9. Yorulma Testi

Yorulma, yeterli sayıda dalgalanmadan sonra çatlak veya kırılma ile sonuçlanabilecek, çevrimsel gerinim ve gerilmelere maruz kalan malzemelerde meydana gelen, ilerleyen, lokalize, kalıcı yapısal değişikliktir. Yorulma kırılmaları, çevrimsel gerilme, çekme gerilmesi ve plastik gerilmenin eşzamanlı etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu üçünden herhangi biri yoksa, yorulma çatlaması başlamaz ve yayılmaz. Çevrimsel gerilme çatlağı başlatır; çekme gerilmesi ise çatlak büyümesine (yayılma) neden olmaktadır.

Yorulma süreci üç ana aşamadan oluşmaktadır:

- Çatlak çekirdeklenmesine ve çatlak başlangıcına yol açan ilk yorulma hasarı,
- Bir parçanın çatlaksız kalan kesitinin uygulanan yüklere karşı çok zayıf hale gelene kadar çatlağın aşamalı döngüsel büyümesi (çatlak ilerlemesi),
- Parçanın aniden kırılması.

Yorulma çatlaması, normal olarak, malzemenin statik akma mukavemetinin çok altında olan döngüsel gerilme değerlerinde meydana gelmektedir. (Bununla birlikte, düşük çevrimli

yorulmada veya malzemenin kayda değer bir sertleşme hızına sahip olması durumunda, gerilmeler ayrıca statik akma dayanımının üzerinde olabilmektedir.)

Yorulma çatlakları, gerilmenin en yüksek olduğu bölgelerde başlayıp yayılmaktadır. Çoğu mühendislik malzemesi kusurlar içerdiğinden ve parçada, üzerindeki gerilmeyi artıran stres yoğunlaşma bölgeleri bulunduğundan, çoğu yorulma çatlakları yapısal kusurlardan başlayıp büyümektedir. Çevrimsel yükleme etkisi altında, kusur ucunda plastik bir bölge (veya deformasyon bölgesi) gelişip, yorulma çatlakları için bir başlangıç bölgesi haline gelmektedir ve çatlak, uygulanan gerilme altında, tam kırılma meydana gelene kadar malzeme boyunca yayılmaktadır. Mikroskobik ölçekte yorulma süreci incelendiğinde, akış gerilmesini aşan ters gerilmelerin etkisi altında, bir veya daha fazla çatlakların çekirdeklenmesi ve ardından kalıcı kayma bantlarında veya tane sınırlarında çatlakların gelişme süreci anlaşılabilmektedir.

3.9.1. Yorulma ömrü tahmini

Herhangi bir numunenin veya yapının yorulma ömrü, kırılma veya performans kaybı için gereken gerilme (uzama) döngüsü sayısıdır. Bu sayı, gerilme seviyesi, gerilme durumu, çevrimsel dalga formu, yorulma ortamı ve malzemenin metalürjik durumu dahil olmak üzere birçok değişkenin bir fonksiyonudur. Numunedeki veya test koşullarındaki küçük değişiklikler yorulma davranışını önemli ölçüde etkileyerek yorulma ömrünün analitik tahminini zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle tasarımcı, mekanik test numunelerinin laboratuvar değerlendirmesinden ziyade kullanımdaki benzer bileşenlerle ilgili sonuçları kullanma yoluna gidebilmektedir. Bununla birlikte, laboratuvar testleri, yorulma davranışını anlamak için çok önemlidir ve test numuneleriyle yapılan mevcut çalışmalar, tatmin edici tasarım kriterleri sağlamaya başlamıştır.

Laboratuvar yorulma testleri, çatlak başlangıcı veya çatlak ilerlemesi olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Çatlak başlatma testlerinde, numuneler veya parçalar, yorulma çatlaklarının başlaması ve ardından kırılmaya neden olacak kadar büyümesi için gereken sayıda gerilme döngüsüne tabi tutulmaktadır. Çatlak yayılma testlerinde ise, çevrimsel yükleme altında önceden var olan çatlakların, çatlak büyüme oranlarını belirlemek için kırılma mekaniği yöntemleri kullanılmaktadır.

3.9.2. Yorulma çatlağı başlangıcı

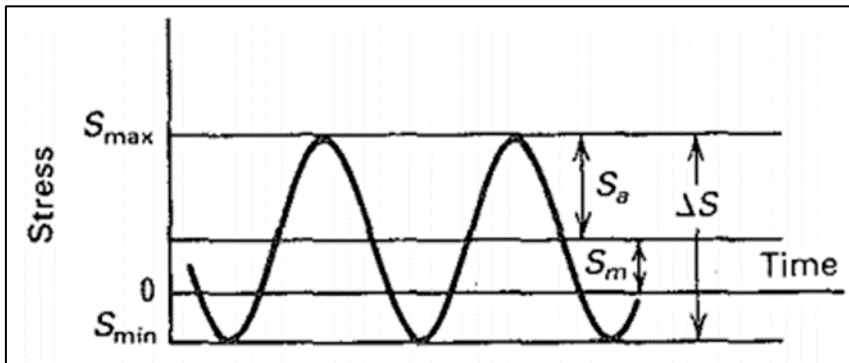
Çoğu laboratuvar yorulma testi ya eksenel yüklemeyle ya da eğilme yüklemeyle yapılmakta, malzeme üzerinde çekme ve basınç gerilmeleri oluşturulmaktadır.

Gerilme oranı (R), bir gerilim çevriminde belirtilen pozitif ve negatif iki gerilme değerinin cebirsel oranıdır. Gerilmeler tamamen tersine çevrilirse, gerilim oranı R , -1 olmaktadır; gerilmeler kısmen tersine çevrilirse, R , 1'den küçük bir negatif sayı olmaktadır. Gerilme, maksimum gerilim ile yüksüz durum arasında çevrilirse, gerilim oranı R sıfır olmaktadır. Gerilme iki çekme gerilmesi arasında çevrilirse, gerilme oranı R , 1'den küçük pozitif bir sayı olmaktadır. Gerilme oranının 1 olduğu durum, gerilmede herhangi bir değişiklik olmadığını göstermekte olup, bu durumda gerçekleştirilen test yorulma testi değil, sürekli yük altında sürünme testi olmaktadır.

Yorulma testlerinde uygulanan gerilmeler üç parametre ile tanımlanmaktadır:

- Ortalama gerilme (S_m),
- Gerilme aralığı (S_r),
- Gerilme genliği (S_a).

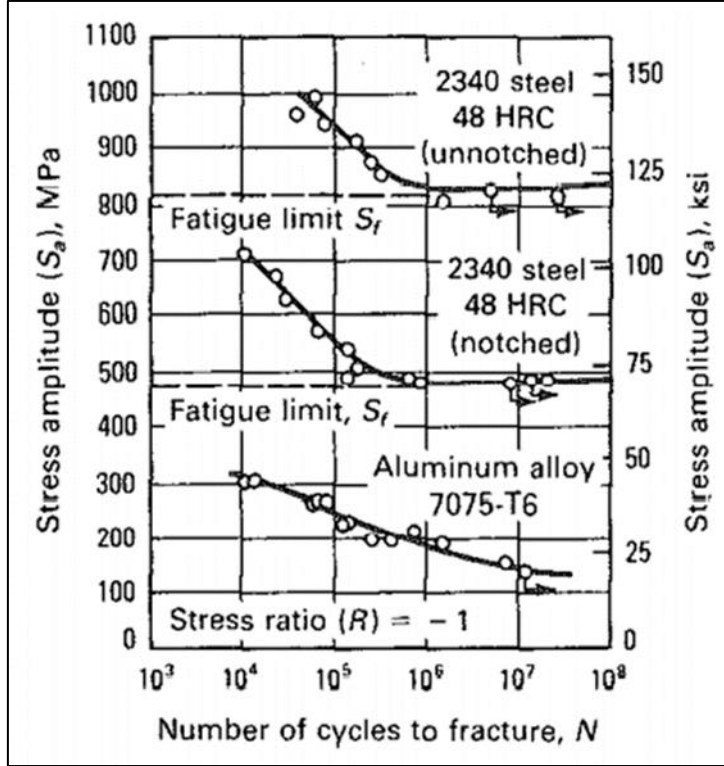
Gerilme parametrelerine ilişkin görsel Şekil 3.6'da verilmiştir [54].



Şekil 3.6. Yorulma testleri, gerilme parametreleri

Yorulma çatlağı başlatma testlerinin sonuçları, genellikle, maksimum gerilme, minimum gerilme veya gerilme genliği karşılık kırılmanın gerçekleştiği veya çatlağın tüm kesitte

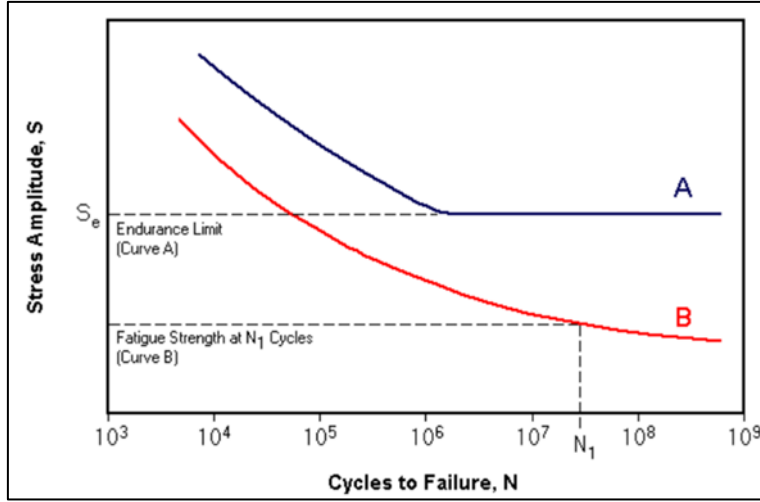
ilerlediği çevrim sayısı (N) olacak şekilde çizdirilmektedir. Çizdirilen grafikte N genellikle logaritmik, gerilme ise logaritmik veya lineer ölçekte olmaktadır. Çizdirilen bu grafikte literatürde S-N eğrisi olarak bilinmektedir. Metallere ait tipik bir S-N eğrisi Şekil 3.7’de verilmiştir [54].



Şekil 3.7. Metallere ait tipik bir S-N grafiği

Bir metalin kırılmadan önce dayanabileceği gerilme çevrimi sayısı, azalan gerilme seviyesi ile artmaktadır. Çelik (Şekil 3.7) ve titanyum gibi bazı mühendislik malzemeleri için, S-N eğrisi belirli bir gerilmede yatay hale gelmektedir. Yorulma limiti veya dayanıklılık limiti olarak bilinen bu sınırlayıcı gerilmenin altında malzeme, kırılma veya çatlama olmadan sonsuz sayıda çevrime dayanabilmektedir (Şekil 3.8).

Malzeme üzerinde oluşan gerilmeler, gerilme artırıcı olarak davranan çentikler, delikler veya çizikler gibi yapısal süreksizlikler sebebiyle süreksizlik bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Gerilme yoğunlaştırma faktörü, K , test esnasında süreksizlik bölgesindeki gerilmenin nominal gerilmeye oranı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.8. S-N eğrisi, yorulma limiti

3.9.3. Gerilme yoğunlaşması etkisi

Yorulma dayanımı, çentik veya delik gibi bir gerilmeyi artırıcı etki yaratan faktörün varlığı sebebiyle önemli ölçüde azalmaktadır. Gerilme yoğunlaşması ayrıca yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklilik gibi faktörlerin etkisi ile de artış göstermektedir.

Gerilme artırıcıların yorulma üzerindeki etkisi genellikle bir çentik (V-çentik, U-çentik) veya delik içeren numuneler test edilerek incelenmektedir. Tek eksenli yük altında bir numunede bir çentik veya delik bulunması üç etkiye yol açmaktadır: (1) Çentiğin kökünde bir gerilme artışı veya yoğunlaşmasının oluşması, (2) çentiğin kökünden numunenin merkezine veya kenarına doğru bir gerilme gradyanı oluşması ve (3) çentik kökünde üç eksenli bir gerilme durumunun meydana gelmesi.

3.9.4. Test numunesinin boyut etkisi

Küçük numuneler üzerinde yapılan laboratuvar testlerinin sonuçlarından büyük makine elemanlarının yorulma performansını doğrudan tahmin etmek mümkün olmamaktadır. Çoğu durumda, büyük parçaların yorulma mukavemeti, küçük numunelerinkinden daha düşük olmaktadır. Bu fenomenin kesin olarak belirlenmesi de oldukça zor bir durumdur.

Boyut büyüdükçe, kesit boyunca aynı metalürjik yapıya ve artık gerilme dağılımına sahip, numuneler hazırlamak son derece zordur.

Bir yorulma numunesinin boyutunun değiştirilmesi, genellikle iki faktörün varyasyonlarına neden olmaktadır. İlk olarak, çapın/en kesit alanının artırılması numunenin hacmini veya yüzey alanını arttırmaktadır. Yorulma çatlakları genellikle malzeme yüzeyinden başladığından yüzey miktarındaki değişiklik önem arz etmektedir. İkinci olarak, eğilme veya burulma ile yüklenen düz veya çentikli/delikli numuneler için en kesit alanındaki bir artış, genellikle en kesit boyunca gerilme gradyanını azaltır ve yüksek gerilime maruz kalan malzeme hacmini artırmaktadır.

Yorulmadaki boyut etkisine ilişkin deneysel veriler, tipik olarak, artan numune çapı/en kesiti ile yorulma dayanımının azaldığını göstermektedir. Çelik bir şaft ile farklı çaplarda gerçekleştirilen testlere ait eğilmeli yorulma dayanımları Şekil 3.9'da verilmiştir [54].

Specimen diameter		Fatigue limit	
mm	in.	MPa	ksi
7.6	0.30	248	36
38	1.50	200	29
152	6.00	144	21

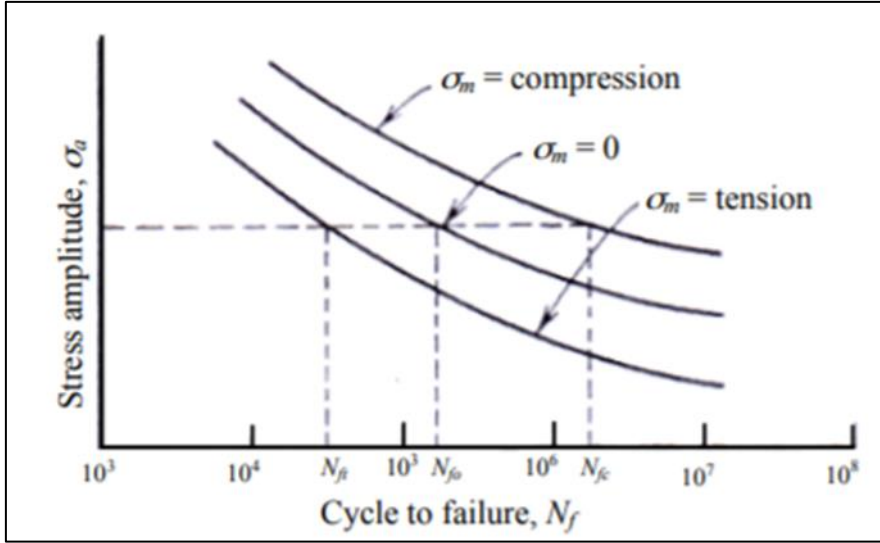
Şekil 3.9. Çelik şaft yorulma dayanımı değerleri

3.9.5. Yüzey pürüzlülüğü etkisi

Genel olarak yorulma ömrü, yüzey pürüzlülüğünün büyüklüğü azaldıkça artmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün azalması lokal gerilme artışlarının etkisini en aza indirmektedir. Bu nedenle yorulma testi numunelerinin yüzey hazırlığına özellikle dikkat edilmelidir.

3.9.6. Ortalama gerilmenin etkisi

Çeşitli ortalama gerilmelerde bir dizi yorulma testi gerçekleştirilerek, sonuçlar bir dizi S-N eğrisi olarak çizilebilmektedir. Sıfır ortalama gerilimde, izin verilen gerilme genliği, belirli sayıda çevrim için etkin yorulma sınırıdır. Ortalama gerilme arttıkça, izin verilen genlikler sürekli olarak azalmaktadır. Malzemenin nihai çekme mukavemetine eşit bir ortalama gerilmede, izin verilen gerilme genliği sıfır olmaktadır. Ortalama gerilmenin yorulma dayanımına etkisine ait görsel Şekil 3.10'da verilmiştir [55].



Şekil 3.10. Ortalama gerilmenin yorulma dayanımına etkisi

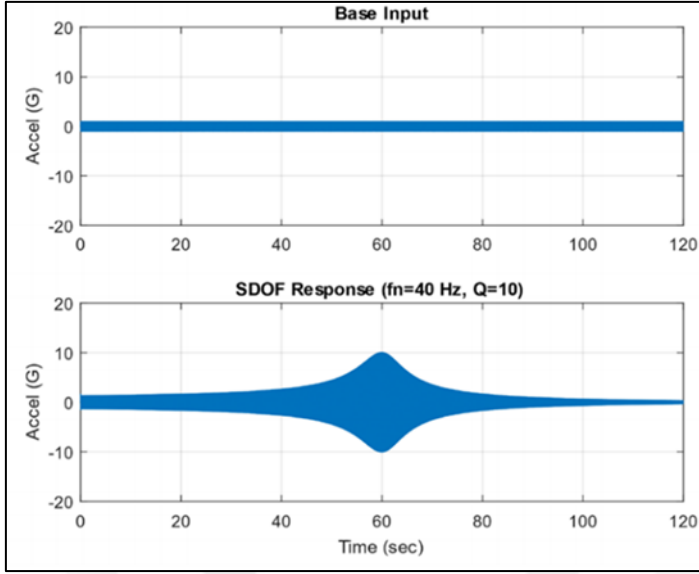
3.9.7. Sinüs tarama testleri

Yapılar ve makine parçaları, sarımsıcı masalara monte edilip, bağlantı noktalarından verilen girdi ile sinüs tarama uyarısına tabi tutulmaktadırlar. Sinüs tarama testinin özü, temel uyarma girdisinin herhangi bir zamanda tek bir frekanstan oluşmasıdır. Bununla birlikte, girdi frekansı zamanla değiştirilerek yapıya tanımlı bir frekans bandında uyarı verilmektedir.

Sinüs tarama testleri ile;

- Doğal frekanslar ve büyütme faktörleri veya sönüm oranları,
- Titreşim testleri öncesinde ve sonrasında herhangi bir parçanın gevşeyip/gevşemediği,
- Değişen girdi genlikleri ile rijitlik ve sönüm oranının lineer olarak kabul edilip/edilemeyeceği belirlenebilmektedir.

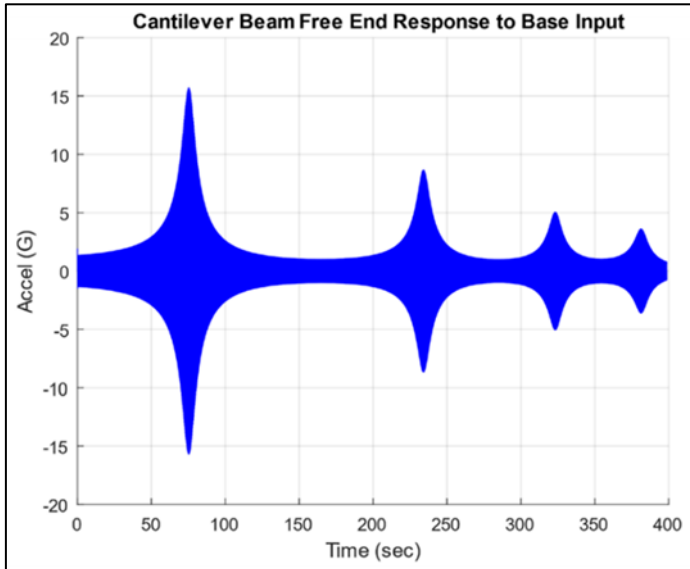
Sinüs tarama testleri gerçekleştirilen bir yapıya ait zamana bağlı girdi ve cevap grafikleri Şekil 3 29'da verilmiştir.



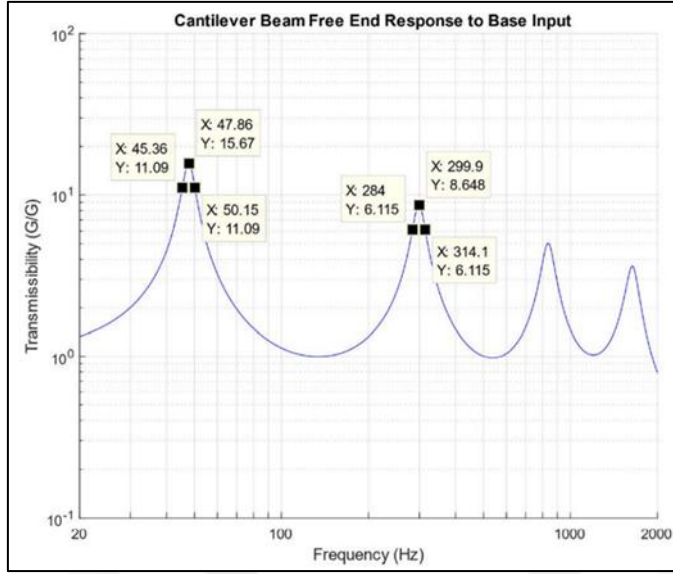
Şekil 3.11. Sinüs tarama testi, girdi ve cevap ivme-zaman grafikleri

Şekil 3.11’den anlaşılacağı üzere girdinin genliği sabit kalmasına rağmen, cevap belirli bir zaman aralığında artış göstermektedir. Yapı cevabının artış göstermesi, girdi frekansının, yapının tanımlanan frekans bandında bulunan doğal frekansı ile çakışmasından kaynaklanmaktadır.

Tanımlanan sinüs tarama frekans bandında, yapıya ait birden fazla doğal frekans olması durumunda ise Şekil 3.12’de verildiği gibi bir yapı cevabı elde edilmektedir. Ayrıca ilgili girdi ve cevaba ait geçirgenlik fonksiyonu da Şekil 3.13’de verilmiştir [56].



Şekil 3.12. Sinüs tarama testi, birden fazla doğal frekans ivme-zaman cevabı



Şekil 3.13. Sinüs tarama testi, geçirgenlik fonksiyonu

3.9.8. Sinüs bekletme testleri

Sinüs bekletme testleri, belirli bir ilgilenilen frekans üzerinde durarak, bir bileşen veya sistem için genellikle daha kötü bir durum elde etmek için kullanılmaktadır. Bu sebeple, sinüs bekletme testlerinde yapının ilgilenilen rezonans frekansı takip edilerek, daha erken kırılma veya çatlama meydana gelmesi amaçlanmaktadır.

Sinüs bekletme testlerinde, sabit bir frekansta uygulanan sinüzoidal bir sinyalle yapısal rezonansları uyarılmakta veya genlik veya faz kriterlerine göre belirli bir rezonans izlenebilmektedir. Bekleme frekansları, kendi kendine kontrol veya sinüs tarama testi ile belirlenmektedir.

Sinüs bekleme testlerinde test başlangıcında tanımlanan rezonans frekansı test numunesi üzerinde çatlak oluşumu ile zamanla azalmaktadır. Testin hangi frekansta tamamlanacağı test öncesinde gerçekleştirilen sinüs tarama testi frekans bandına göre belirlenebilmektedir.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada EİT ile üretilmiş 17-4 PH malzemeden üretilmiş numunelerin içyapı özellikleri ile akma mukavemeti, nihai çekme dayanımı, kopma uzaması ve sertlik gibi mekanik özellikleri, doğal frekans ve mod şekli gibi modal parametreleri ve eğilme yükü altındaki yorulma davranışını incelemeye yönelik bir dizi deneysel çalışma yürütülmüştür. Önceki kısımlarda belirtildiği üzere mühendislik uygulamalarında kullanılan parçalar ve sistemler ömür döngüleri boyunca hem statik hem de dinamik olarak farklı tipte yüklere maruz kalmaktadırlar. Bu sebeple, ilgili parçaların kullanımından önce analitik veya deneysel olarak ilgili yükler altında davranışlarının elde edilmesi gerekmektedir.

Çalışma kapsamında da üretilen parçaların statik ve dinamik yükler altında davranışları farklı test yöntemleri ile elde edilmiştir.

4.1. Malzeme

4.1.1. Paslanmaz çelik

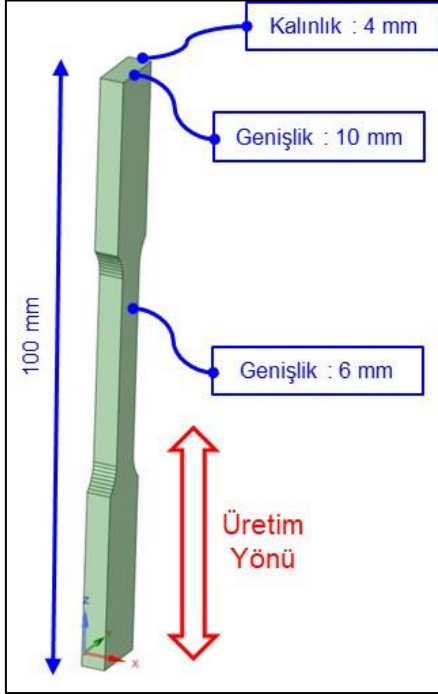
Çalışma kapsamında, 17-4 PH paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Mekanik testler ve yorulma testlerinde kullanılmak üzere belirlenen numuneler, SLM yöntemi ile argon gazı ortamında, düşey yönde üretilmiştir. Üretimler Renishaw AM 400 marka cihaz ile maksimum lazer gücünün 400 watt olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Numune üretimlerinde kullanılan metal tozunun parçacık büyüklüğü 17 – 48 mikron arasında değişmektedir.

4.2. Numune Geometrileri

4.2.1. Çekme testi numunesi

Çekme testi numuneleri dikdörtgen kesitli olup, ASTM-E8M standardında [46] verilen küçültülmüş ölçeğe uygun şekilde 4 mm kalınlık ve 100 mm boyunda üretilmiştir. Çalışma kapsamında toplam 12 adet çekme numunesi üretilmiştir. Üretilen numunelerden 3 tanesi

üretim halli olarak bırakılmış diğer 9 tanesine 3 farklı ısıtım işlem uygulanmıştır. Çekme numunelerine ilişkin görseller Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Küçültölmüş ölçekteki çekme testi numunesi



Şekil 4.2. EİT ile üretilmiş çekme testi numuneleri

4.2.2. Yorulma testi numunesi

Yorulma testi numuneleri dikdörtgen kesitli olup, 3 mm kalınlık ve 100 mm boyunda delikli olarak üretilmiştir. Çalışma kapsamında toplam 15 adet yorulma numunesi üretilmiştir. Üretilen numunelerin tamamına çözündürme ve H900 ısıt işlemleri uygulanmıştır. Ayrıca, geleneksel yöntemle üretilmiş 210x150x3 mm boyutlarındaki plakadan da karşılaştırma amaçlı 15 adet yorulma numunesi üretilmiştir. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş yorulma numunelerine, geleneksel yöntemle üretilmiş plakaya ve plakadan üretilmiş numunelere ilişkin görseller sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.3. EİT ile üretilmiş yorulma testi numuneleri



Şekil 4.4. 17-4 PH çelik plaka



Şekil 4.5. 17-4 PH plakadan üretilmiş yorulma testi numuneleri

Ek olarak, eğilmeli yorulma testi numunesinin geometrisine karar verilirken, üretim kaynaklı rastgele içyapı kusurlarının olabileceği dikkate alınmış ve numuneler, gerilim konsantrasyonu oluşturmak için delikli olarak üretilmiştir. Yine benzer sebepten dolayı, numunenin test fikstürüne bağlanabilmesi için ekstra bir delik açılmamış, numuneler test düzeneğine mengene yardımı ile sıkıştırılarak bağlanmıştır.

4.3. Isıl İşlemler

Çalışma kapsamında çekme testi numunelerine, çözündürme ısı işlemi ve H900, H1025 ve H1150 olmak üzere 3 farklı yaşlandırma ısı işlemi uygulanmıştır. Çözündürme ısı işlemi, yaşlandırma ısı işlemlerinin öncesinde ortak olarak uygulanmıştır.

Çözündürme ısı işleminde çekme testi numuneleri, 1150 °C’de iki buçuk saat tutulmuş ve havada soğumaya eş hız ile inert gaz altında oda sıcaklığına soğutulmuştur. H900 yaşlandırma ısı işleminde çekme testi numuneleri 480 °C’de bir saat tutulmuş ve havada soğumaya eş hız ile inert gaz altında oda sıcaklığına soğutulmuştur. H1025 yaşlandırma ısı işleminde çekme testi numuneleri 550 °C’de dört saat tutulmuş ve havada soğumaya eş hız ile inert gaz altında oda sıcaklığına soğutulmuştur. H1150 yaşlandırma ısı işleminde ise çekme testi numuneleri 620 °C’de dört saat tutulmuş ve havada soğumaya eş hız ile inert gaz altında oda sıcaklığına soğutulmuştur.

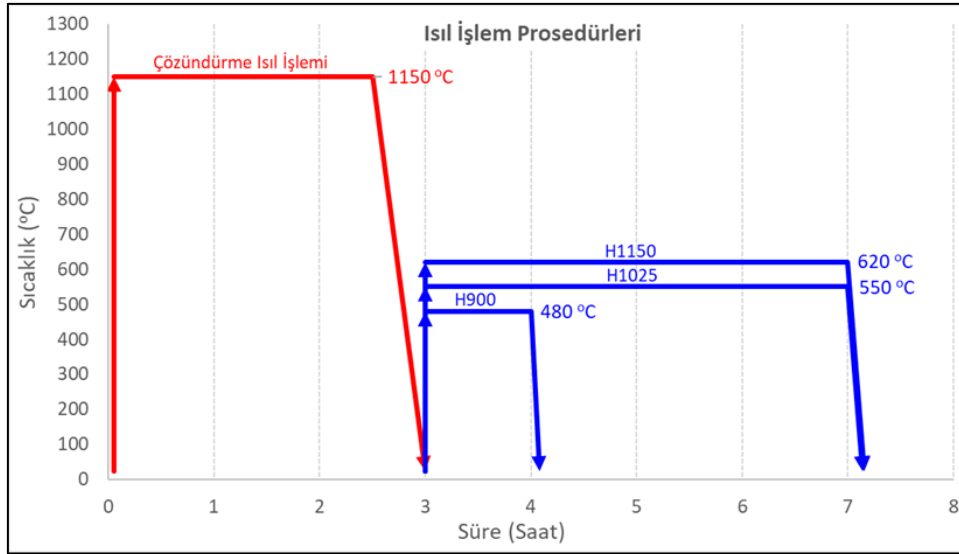
Yorulma testi numunelerine ise geleneksel yöntemle üretilen plakaya H900 ısı işlemi uygulanmış olmasından dolayı çözündürme ve H900 ısı işlemi uygulanmıştır.

Çekme ve yorulma numunelerine uygulanan ısıt işlemlere ilişkin bilgiler tablo halinde Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çekme ve yorulma numunelerine uygulanan ısıt işlemler

Numune Açıklaması	Üretim Halli	Çözündürme 1150 °C/2,5 saat	H900 480 °C/1 saat	H1025 550 °C/4 saat	H900 620 °C/4 saat
Çekme Numunesi-1	x				
Çekme Numunesi-2	x				
Çekme Numunesi-3	x				
Çekme Numunesi-4		x	x		
Çekme Numunesi-5		x	x		
Çekme Numunesi-6		x	x		
Çekme Numunesi-7		x		x	
Çekme Numunesi-8		x		x	
Çekme Numunesi-9		x		x	
Çekme Numunesi-10		x			x
Çekme Numunesi-11		x			x
Çekme Numunesi-12		x			x
Yorulma Numunesi-1		x	x		
Yorulma Numunesi-2		x	x		
Yorulma Numunesi-3		x	x		
Yorulma Numunesi-4		x	x		
Yorulma Numunesi-5		x	x		
Yorulma Numunesi-6		x	x		
Yorulma Numunesi-7		x	x		
Yorulma Numunesi-8		x	x		
Yorulma Numunesi-9		x	x		
Yorulma Numunesi-10		x	x		
Yorulma Numunesi-11		x	x		
Yorulma Numunesi-12		x	x		
Yorulma Numunesi-13		x	x		
Yorulma Numunesi-14		x	x		
Yorulma Numunesi-15		x	x		

Ek olarak çalışma kapsamında uygulanan ısıt işlemlerin özelliklerine ait şematik görsel Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Isıl işlem özellikleri

4.4. Testler

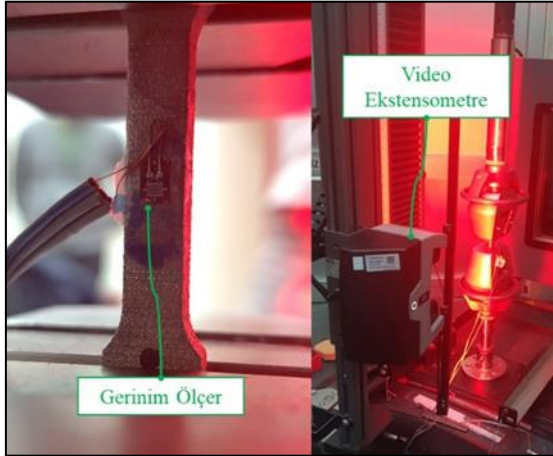
4.4.1. Çekme testleri

Çekme testleri, Instron marka, 5980 serisi, 100 kN kapasiteli üniversal test cihazı kullanılarak 2mm/dk. çekme hızında icra edilmiştir (Şekil 4.7).



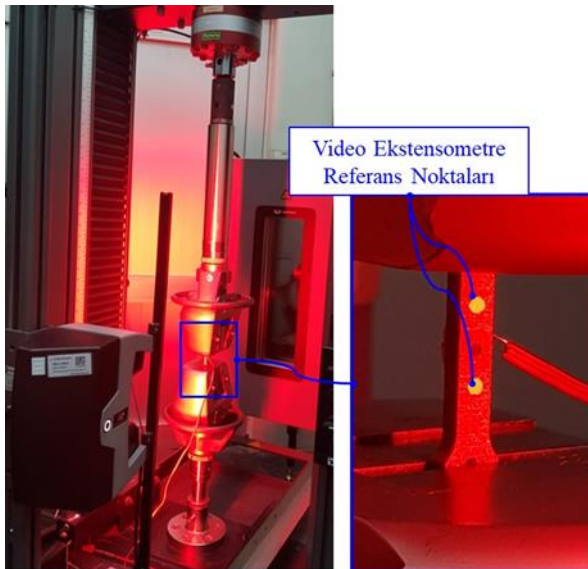
Şekil 4.7. Instron marka, 5980 serisi üniversal çekme cihazı

Testler esnasında 12 adet numuneye ait kuvvet – zaman grafiklerine ek olarak tek eksenli gerinim ölçer ve Instron AVE2 marka video ekstansometre ile gerinim verisi toplanmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Gerinim ölçer ve video ekstansometre

Toplanan veriler kullanılarak her bir numuneye ait mühendislik gerilme-gerinim grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerden elastisite modülü, nihai çekme dayanımı, akma mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Test düzeneğine ilişkin görsel Şekil 4 9’de verilmiştir.



Şekil 4.9. Çekme testleri, test düzeneği

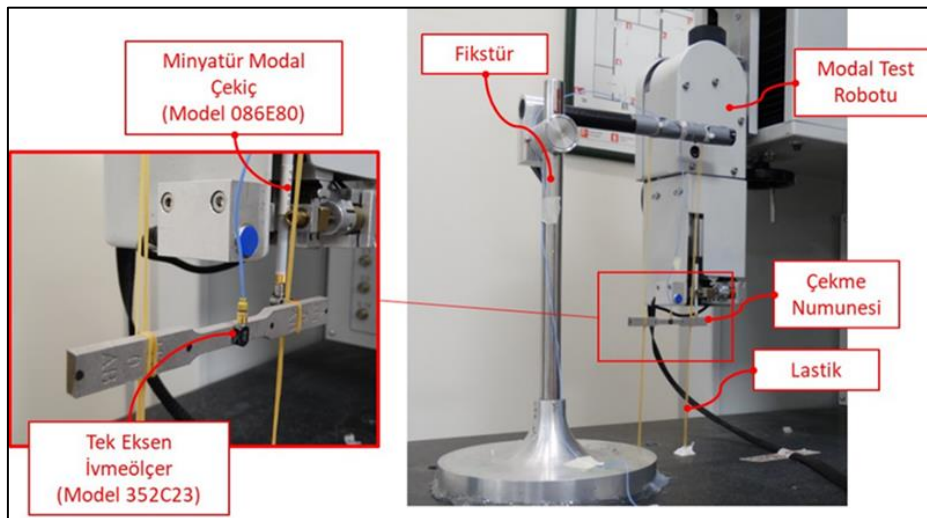
4.4.2. Modal testler

Çalışma kapsamında, kullanılan çekme ve yorulma testi numunelerinin tamamına ısıl işlemlerin etkisini incelemek, numunelerin modal parametrelerini (doğal frekans ve mod şekli) elde etmek ve çekme testlerinden elde edilen elastisite modülü değerlerini doğrulamak amacıyla serbest serbest sınır koşulunda ve oda sıcaklığında modal testler icra edilmiştir. Serbest-serbest koşulunda icra edilen testlerin tamamında darbe tahrik tekniği ve çekiç kullanılmıştır.

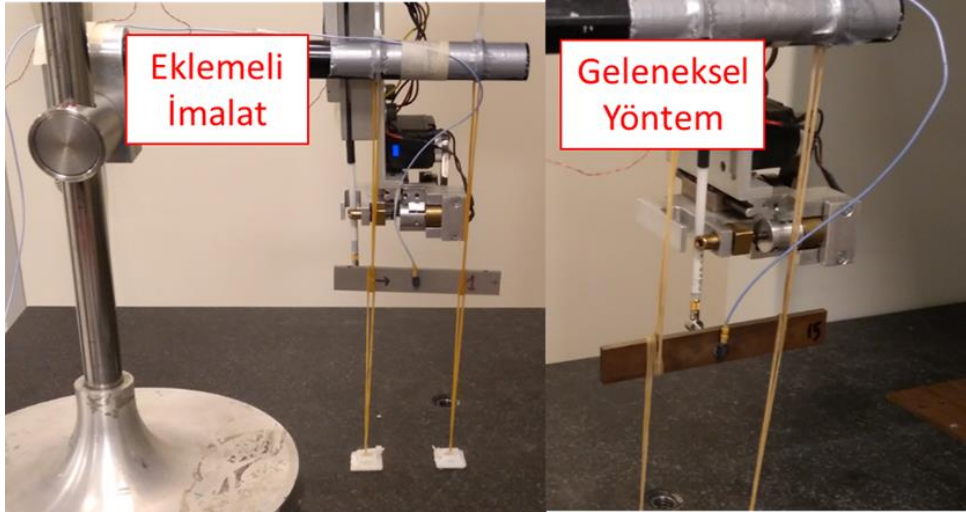
Darbe tahrik tekniği kullanılan modal testlerde, numuneye uygulanan kuvvetin konumu ve şiddeti düzgün FTF elde etmek açısından önemli olduğundan icra edilen bütün testlerde aynı noktadan aynı kuvvetin uygulandığından emin olunması için modal test robotu kullanılmıştır. Modal test robotunun 5 eksenli serbestliği bulunmaktadır.

Testlerde, kütle etkisini en aza indirmek için tek eksenli minyatür ivmeölçer (PCB marka, model 352C23) ve plastik uçlu (PCB marka, model 086E80) minyatür modal çekiç kullanılmıştır.

Modal testlerde dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta olan askı rijitliğine de ayrıca dikkat edilmiş ve askı modları, numunelerin ilk elastik modundan en az 10 kat daha düşük olacak şekilde ayarlanmıştır. Modal test düzeneğine ilişkin görsel çekme numunesi ve yorulma numuneleri için sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.10. Serbest-serbest sınır koşulunda modal test düzeneği, çekme numunesi



Şekil 4.11. Serbest-serbest sınır koşulunda modal test düzeneği, yorulma numunesi

4.4.3. Radyografik test

Çalışma kapsamında, hem çekme hem de yorulma numunelerinin testler öncesinde, üretim kaynaklı makro düzeyde kusurlarının olup olmadığını elde etmek amacıyla radyografik testleri gerçekleştirilmiştir.

4.4.4. Yüzey pürüzlülüğü testleri

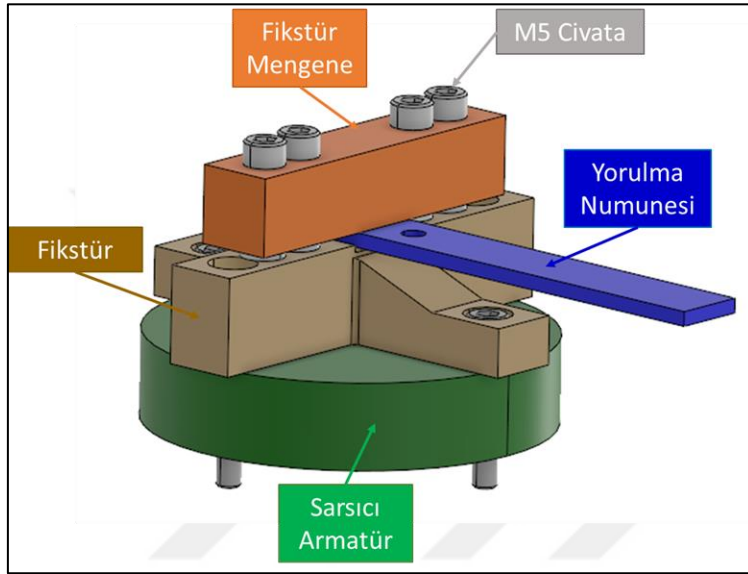
Çalışma kapsamında, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş eğilmeli yorulma numunelerinin delik etrafındaki yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ile eğilmeli yorulma testlerinden elde edilen sonuçlar arasında belirgin bir ilişkinin olup olmadığı incelenmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri R_a olarak paylaşılmıştır.

4.4.5. Sinüs tarama testleri

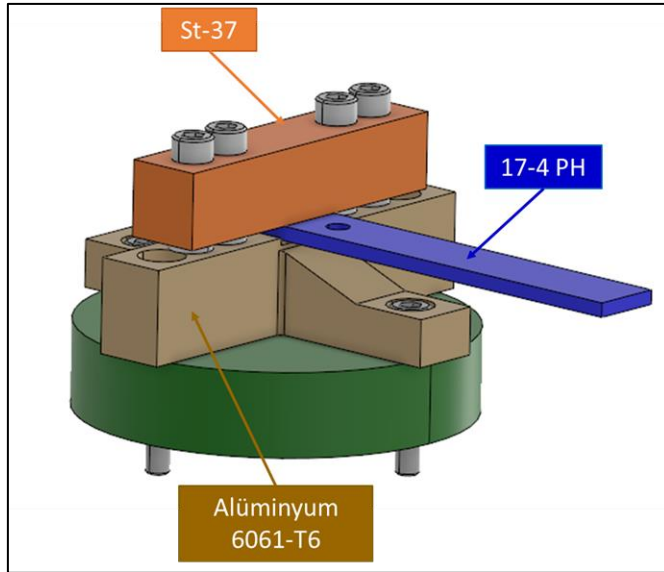
Çalışma kapsamında ilk olarak, yorulma numuneleri üzerinde (delik etrafında) oluşan gerilme seviyelerini belirlemek amacıyla 5 farklı ivme seviyesinde sinüs tarama testleri icra edilmiştir.

Daha önce de bahsedildiği üzere numuneleri test fikstürüne bağlamak için ekstra bir bağlantı deliği açılmamış, numuneler test fikstürüne mengene yardımıyla sıkıştırılarak sabitlenmiştir.

Numunenin sabitlenmesi için 4 adet M5 8x8 kalite çelik cıvatalar kullanılmıştır. Ayrıca, fikstür, sarsıcı girdi sinyali genlik limitlerini azaltmamak için alüminyum malzemeden üretilmiştir. Ancak, mengene kısmı, cıvata sıkma torkundan kaynaklı sehim miktarını en aza indirmek için çelik malzemeden üretilmiştir. Böylece mengene, numune ve fikstür arasında maksimum temas yüzeyi sağlanması amaçlanmıştır. Test düzeneğine ilişkin görsel ve malzeme bilgileri sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de verilmiştir.



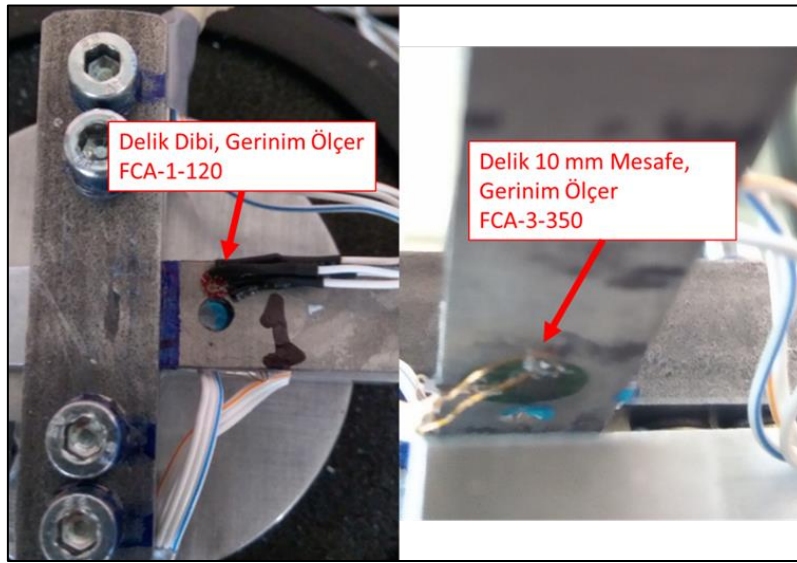
Şekil 4.12. Sinüs tarama testleri, test düzeneği



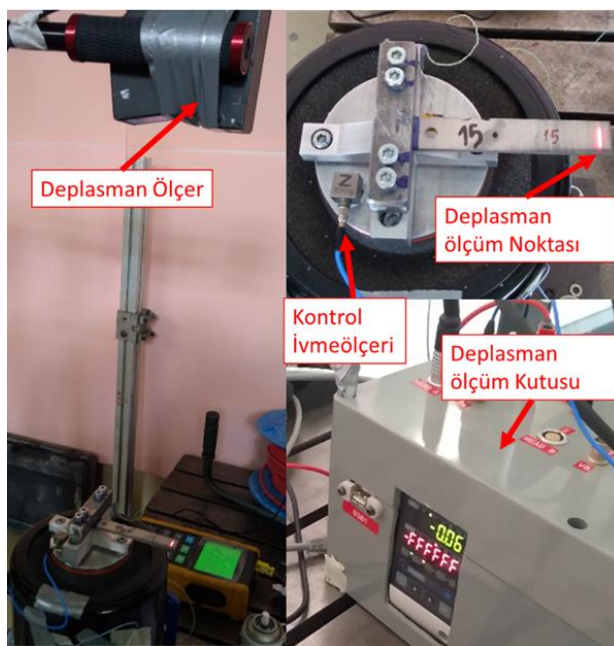
Şekil 4.13. Sinüs tarama testleri, test düzeneği malzeme bilgileri

Testler esnasında delik dibinden ve delik kenarına 10 mm mesafeden 2 eksenli 2 adet gerinim ölçer (FCA-1-120 ve FCA-3-350 tip) ile gerinim verisi, numune uç kısmından lazer deplasman ölçer (Keyence, LK-G507) ile deplasman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, kontrol ivmeölçeri olarak PCB marka ICP tip 3 eksenli ivmeölçer (356A32) kullanılmıştır.

Kullanılan sensörlere ilişkin görseller Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.14. Yorulma numunesi, gerinim ölçerler



Şekil 4.15. Yorulma numunesi, lazer deplasman ölçer ve kontrol ivmeölçeri

Sinüs tarama testleri ile girdi ivme seviyesine göre delik dibi gerilme değerleri elde edilmiştir. Sinüs tarama testleri ile ayrıca, her bir numunenin doğal frekans ve ilgili doğal frekanstaki uç deplasman cevapları elde edilmiştir. Elde edilen değerler sinüs bekletme testlerinde kullanılmıştır. Ek olarak sinüs bekletme testlerinden sonra her bir numunenin sinüs tarama testleri tekrar edilmiştir. Hem sinüs bekletme testleri öncesi hem de sonrasında yapılan testlerden FTF elde edilmiştir.

Testler esnasında kullanılan diğer ekipmanlara ait bilgiler eğilmeli yorulma testleri kısmında verilmiştir.

4.4.6. Eğilmeli yorulma testleri

Eğilmeli yorulma testleri, çözündürme ve H900 yaşlandırma ısı işlemi uygulanmış eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş 15 adet numune ile 5 farklı girdi genliğinde ve koşul-A ve H900 ısı işlemi uygulanmış geleneksel yöntemle imal edilmiş plakadan üretilmiş 6 adet numune kullanılarak 4 farklı girdi genliğinde, dolayısıyla gerilme değerinde gerçekleştirilmiştir.

Testler her bir numunenin ilk elastik doğal frekansında icra edilmiştir. Testler esnasında, her bir numunenin doğal frekans değerinin çevrim sayısına bağlı değişimi kaydedilmiştir. Doğal frekans değerinin düşmeye bağladığı nokta çatlak başlangıcı, düşmeye devam ettiği kısım çatlak ilerlemesi ve belirli bir frekans değerine yakınsadığı nokta ise çatlağın tüm yüzey boyunca yayıldığı durum olarak ele alınmıştır.

Eğilmeli yorulma testlerinde girdi ivmesi ve numune uç deplasman cevabına ek olarak her bir ivme genlik değerinde sıcaklık verisi toplanmıştır. Sıcaklık verisi kullanılarak, numune rezonans değerinde gerçekleştirilen eğilmeli yorulma testlerinde delik etrafındaki sıcaklık değişimi elde edilmiş, ilgili sıcaklık değerlerinin yorulma davranışını etkileyip etkilemeyeceği değerlendirilmiştir.

Eğilmeli yorulma testleri aşağıda verilen aşamalar gerçekleştirilerek icra edilmiştir:

- Farklı girdi genliklerinde, sinüs tarama testleri ve FTF'lerin eldesi,
- Sinüs tarama testlerinden elde edilen gerilme değerlerine göre eğilmeli yorulma testlerinde kullanılacak olan girdi genliklerine (5 farklı) karar verilmesi,

- Girdi genliklerine karar verildikten sonra her bir girdi genliğinde 3'er numune ile eğilmeli yorulma testlerinin icra edilmesi – eğilmeli yorulma testlerinde sinüs tarama testlerinde elde edilen FTF'ler kullanılarak anlık olarak numune uç kısmındaki deplasman değeri takip edilerek girdi frekansı değiştirilmektedir,
- Eğilmeli yorulma testlerinde, testler süresince ivme, deplasman ve sıcaklık verilerinin toplanması.
- Toplanan verilerin uygun yöntemler ile işlenmesi ve literatür verileri ile karşılaştırılması.

Testlerde gerinim ölçer, deplasman ölçer ve ivmeölçerlere ek olarak kullanılan sensör, cihaz ve ekipmanlara ilişkin bilgiler aşağıda verilmiştir:

- Sinüs tarama ve sinüs bekletme testlerini gerçekleştirebilmek için elektro-dinamik sarsıcı – Modal shop, model 2110E-HT (Şekil 4.16),



Şekil 4.16. Elektro-dinamik sarsıcı, Modal shop, model 2110E-HT

- Kontrolcü çıkış sinyalini yükseltmek ve sarsıcıyı çalıştırmak için Amfi – Modal shop, model 2050E09-FS (Şekil 4.17),



Şekil 4.17. Elektro-dinamik sarsıcı amfisi

- Elektro-dinamik sarsıcıyı istenilen genlik ve frekanslarda kapalı devre kontrol etmek ve titreşim, sıcaklık, deplasman ve gerinim verilerini toplamak için kontrolcü – Siemens Scadas Mobil (Şekil 4 18),



Şekil 4.18. Siemens scadas mobil kontrolcü

- Numune üzeri sıcaklık ölçümleri için ısı çifti,
- Sarsıcıyı kontrol etmek ve veri toplama da kullanılmak üzere 1 adet diz üstü bilgisayar.

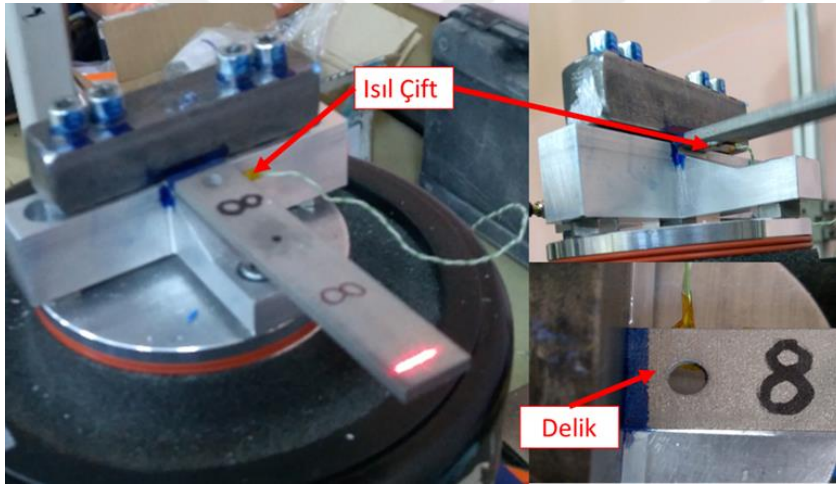
Testlerde kullanılan numunelere uygulanan girdi ivme genlikleri ve numune numaralarına ilişkin bilgiler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Numunelere uygulanan girdi ivme genlikleri

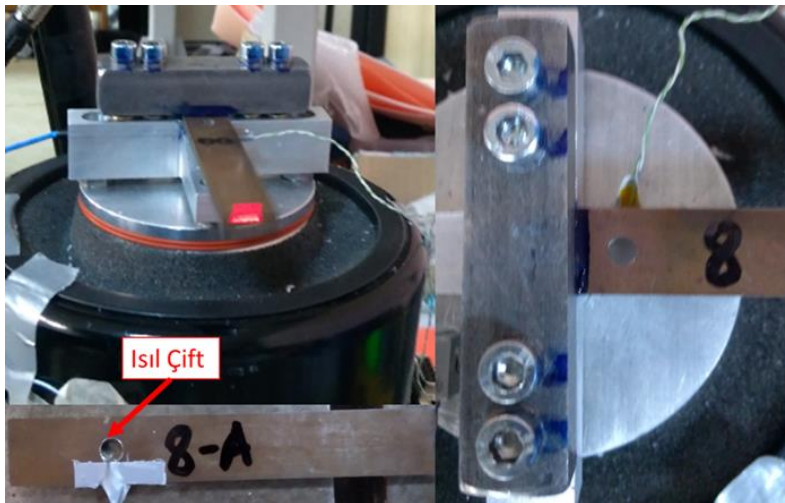
Eklemeli İmalat ile Üretim		Geleneksel Yöntem ile Üretim	
Numune Numarası	Girdi Genliği (G)	Numune Numarası	Girdi Genliği (G)
N01	1	N01	-
N02	2	N02	-
N03	2	N03	-
N04	2	N04	2
N05	2	N05	-
N06	2	N06	-
N07	3	N07	3
N08	3	N08	3
N09	3	N09	-
N10	4	N10	4
N11	4	N11	4
N12	4	N12	-
N13	5	N13	-
N14	5	N14	5
N15	5	N15	-

Testlerde kullanılmak üzere geleneksel yöntemle imal edilmiş plakadan toplam 15 adet numune üretilmiştir. Ancak, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş numune testlerine geçmeden önce hem test düzeneğini denemek hem de test parametrelerini uygun hale getirmek için geleneksel yöntemle üretilmiş numuneler ile deneme testleri icra edilmiştir. Gerçekleştirilen deneme testlerinde, numuneler farklı seviye ve çevrim sayılarında titreşime maruz bırakılmıştır. Bu durumda, bu numunelerin eğilmeli yorulma testleri sonuçlarında dağılım veya farklılık olabileceği göz önünde bulundurularak, ilgili numuneler eğilmeli yorulma testleri sonuçlarına dahil edilmemiştir.

Gerçekleştirilen eğilmeli yorulma testlerine ilişkin görseller Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.19. Yorulma testleri, eklemeli imalat numunesi



Şekil 4.20. Yorulma testleri, geleneksel yöntem numunesi

Gerçekleştirilen eğilmeli yorulma testlerinden elde edilen veriler kullanılarak hem eklemeli imalat ile hem de geleneksel yöntemle üretilmiş numunelere ait S-N eğrileri elde edilmiştir. S-N eğrileri her bir numunenin başlangıç doğal frekansının %1 düştüğü çevrim sayısı dikkate alınarak oluşturulmuştur.

4.4.7. Sertlik testleri

Çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş çekme numunelerinin sertlik değerleri Rockwell yöntemi ile elde edilmiştir. Sertlik değerleri ısıtıl işlemin tüm kesit boyunca uygulandığını belirleyebilmek için kalınlık boyunca elde edilmiştir.

4.4.8. İç yapı incelenmesi

Çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş çekme numunelerinin optik mikroskop görüntüleri elde edilmiştir.

4.4.9. Sıvı penetran testi

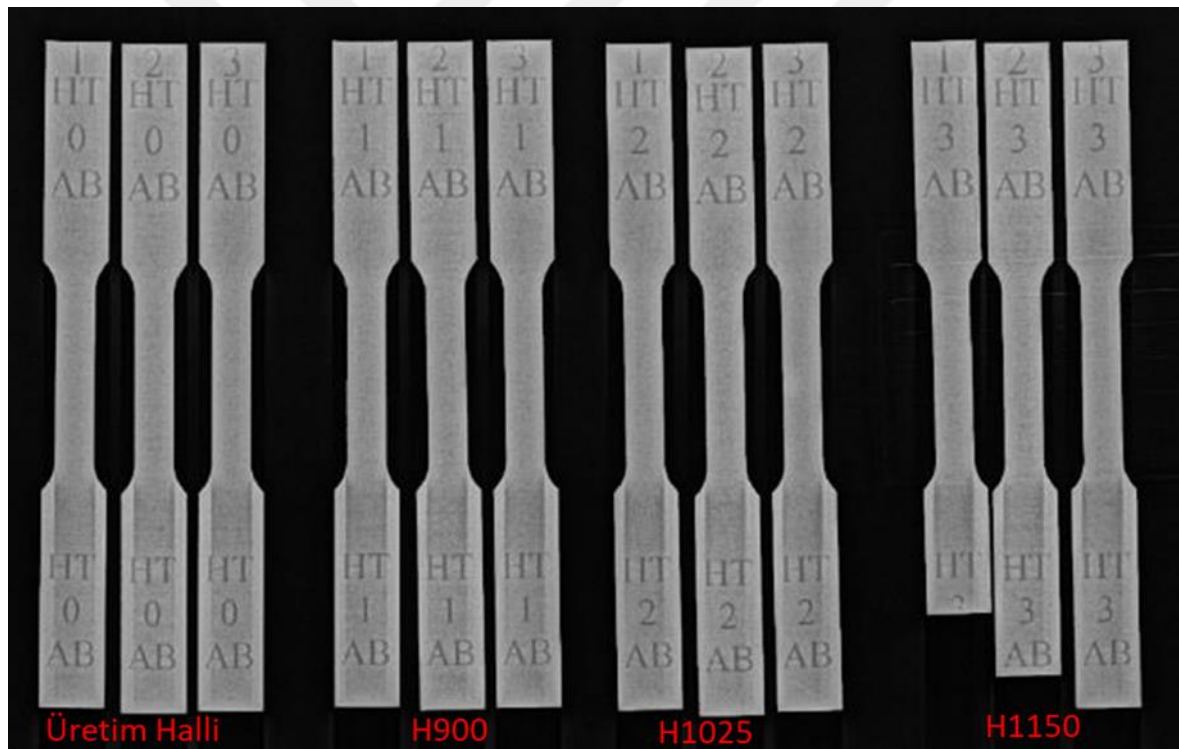
Çalışma kapsamında, yorulmalı eğilme testleri gerçekleştirilen tüm numunelerin sıvı penetran testleri gerçekleştirilmiştir. Sıvı penetran testleri ile, eğilmeli yorulma testlerinde doğal frekans değeri düşen ve değişmeyen numunelerde çatlak oluşup/oluşmadığı, çatlak oluştu ise delik dibinden başlayıp /başlamadığı elde edilmiştir.

5. ÖLÇÜMLER VE TEST SONUÇLARI

5.1. Radyografik Test Sonuçları

5.1.1. Çekme testi numuneleri

Çekme testleri gerçekleştirilen, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş 12 adet numunenin, çekme testleri öncesinde radyografik testleri gerçekleştirilmiştir. Radyografik testler ile numunelerde üretim kaynaklı makro düzeyde herhangi bir kusur olup/olmadığı incelenmiştir. Çekme numuneleri radyografik testlerine ilişkin görsel Resim 5.1’de verilmiştir.

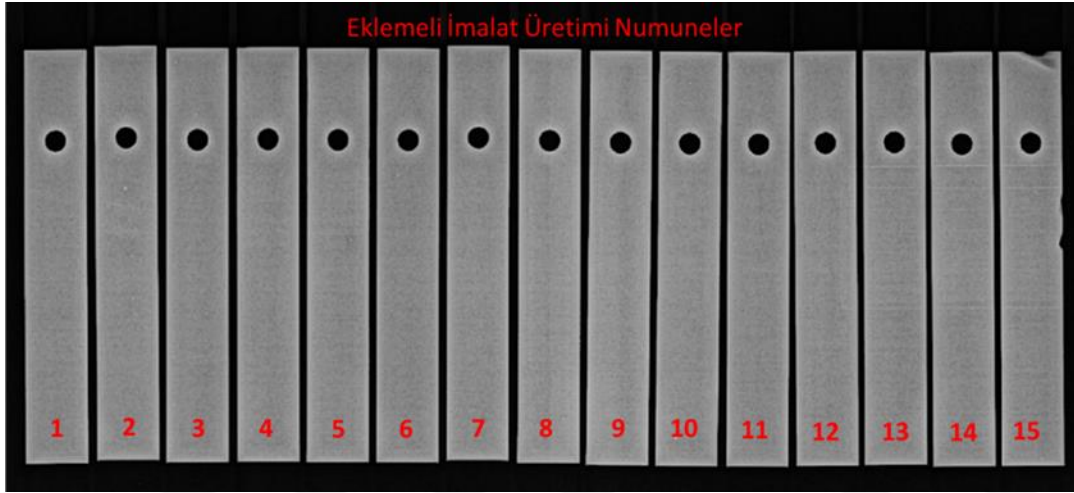


Resim 5.1. EİT üretimi çekme numuneleri, radyografik test görüntüsü

Resim 5.1’den de anlaşılacağı üzere çekme numunelerinde üretim kaynaklı makro düzeyde herhangi bir kusura rastlanmamıştır.

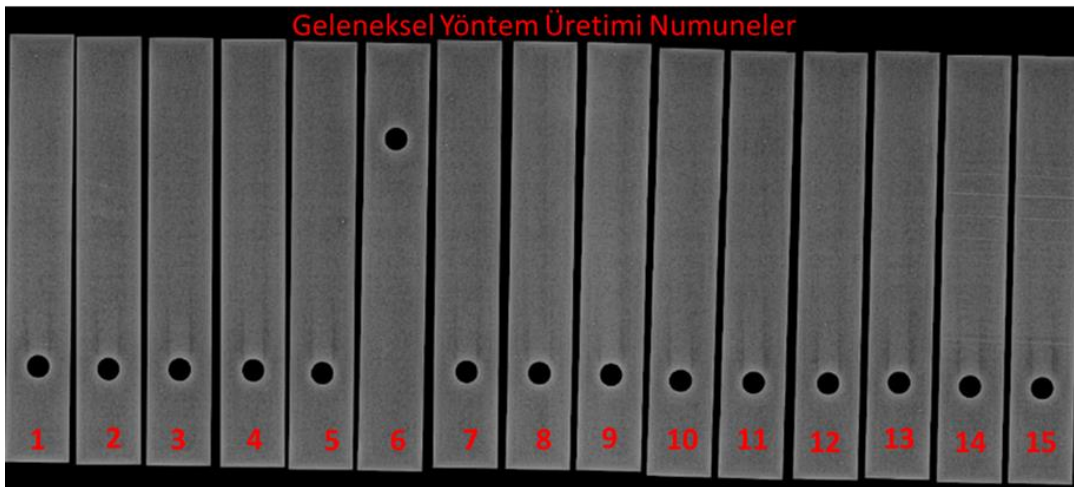
5.1.2. Eğilmeli yorulma testi numuneleri

Eğilmeli yorulma testlerinde kullanılan tüm numunelerin radyografik testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde hiç yorulma testine tabi tutulmamış eklemeli imalat üretimi numuneler ile deneme testlerinde kullanılmış ve kullanılmamış geleneksel yöntem üretimi numuneler kullanılmıştır. Test sonuçlarına ilişkin görseller Resim 5.2 ve Resim 5.3’de verilmiştir.



Resim 5.2. EİT üretimi yorulma numuneleri, radyografik test görüntüsü

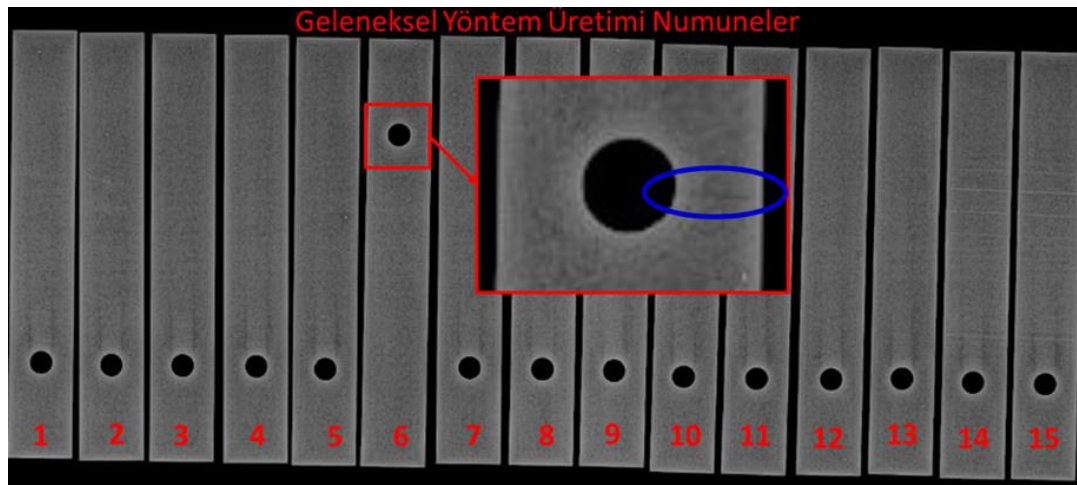
Resim 5.2’den anlaşılacağı üzere eklemeli imalat üretimi, eğilmeli yorulma numunelerinde üretim kaynaklı makro düzeyde herhangi bir kusura rastlanmamıştır.



Resim 5.3. Yorulma numuneleri (geleneksel yöntem), radyografik test görüntüsü

Resim 5.3’de verilen geleneksel yöntem üretimi, eğilmeli yorulma numunelerinden 4, 7, 8, 10, 11 ve 14 numaralı numuneler deneme testlerinde kullanılmamıştır. Beklendiği üzere de bu numunelerde üretim kaynaklı makro düzeyde herhangi bir kusura rastlanmamıştır.

Diğer numuneler ise deneme testlerinde kullanılmış olup, bu numunelerden 6 numaralı numunede delik kesiti boyunca ilerlemiş bir yüzey çatlakına rastlanmıştır. İlgili görsel yakınlştırılmış olarak Resim 5.4’de verilmiştir.



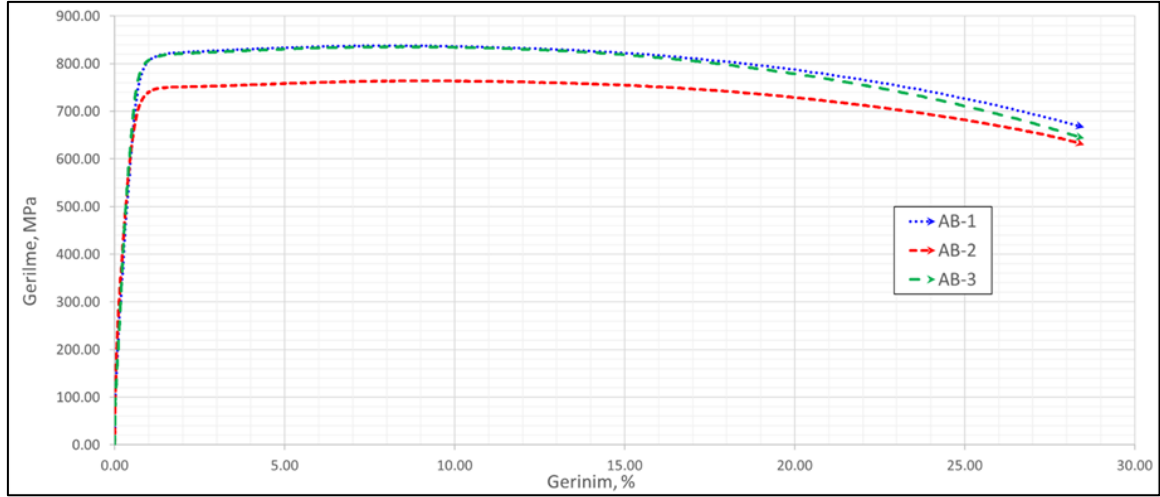
Resim 5.4. 6 numaralı yorulma numunesi (geleneksel yöntem), yüzey çatlakı

5.2. Çekme Testi Sonuçları

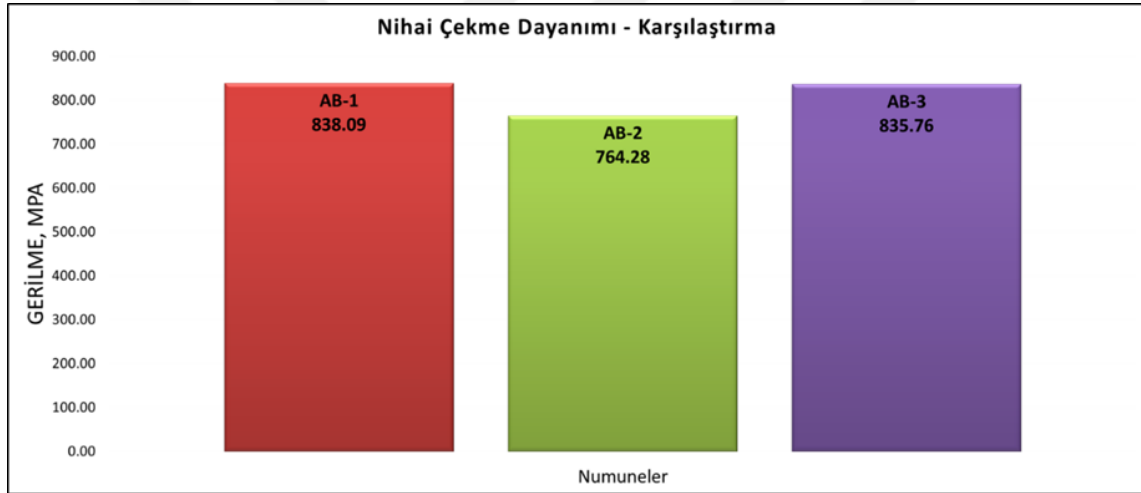
5.2.1. Üretim halli çekme numuneleri

Üretim halli 3 adet çekme numunesinin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. 3 adet numuneden 1 ve 3 numaralı çekme numunelerinin elastisite modülü, akma mukavemeti ve nihai çekme dayanımları birbirlerine yakın çıkarken, 2 numaralı çekme numunesinin elastisite modülü, akma mukavemeti ve nihai çekme dayanımı diğer iki numuneye göre daha düşük çıkmıştır.

Ek olarak 3 numunenin çekme uzamaları birbirlerine yakın elde edilmiş olup, ortalama kopma uzaması %28 seviyelerindedir. Her 3 numuneye ait mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.1’de, nihai çekme dayanımları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.2’de, ilgili sonuçlar ise tablo halinde Çizelge 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Üretim halli numuneler, mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri

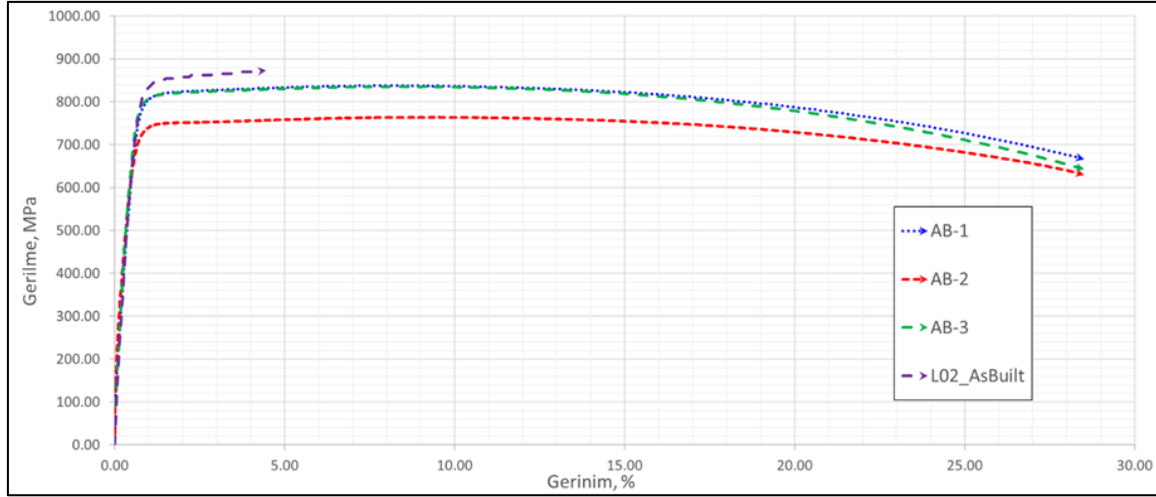


Şekil 5.2. Üretim halli numuneler, nihai çekme dayanımı karşılaştırma

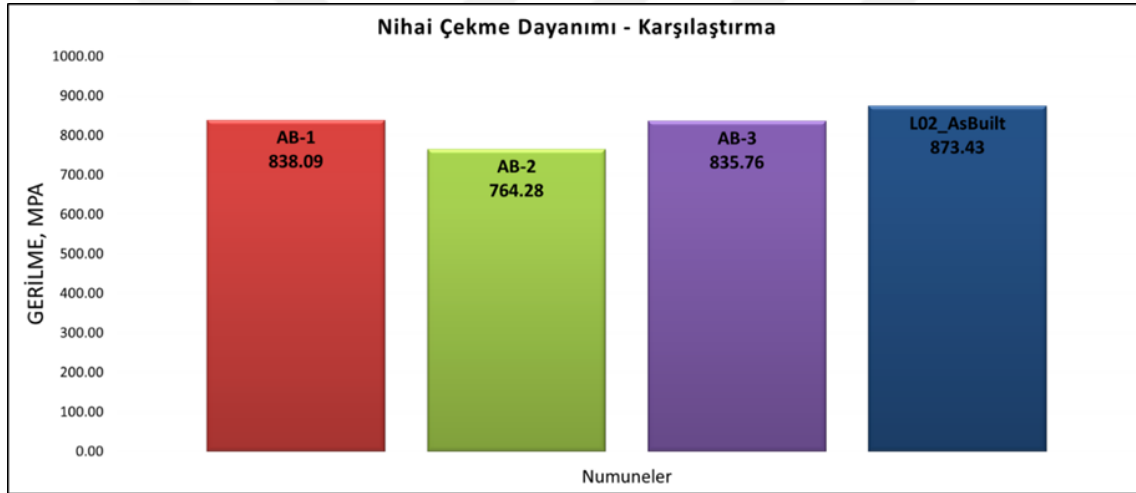
Çizelge 5.1. Üretim halli numuneler, çekme testi sonuçları

Numune No	E (GPa)	Akma Mukavemeti (Mpa)	Nihai Dayanım (Mpa)
Üretim Halli-1	171.9	717	838
Üretim Halli-3	160.0	681	764
Üretim Halli-3	171.3	728	836

Elde edilen mühendislik gerilme – şekil değiştirme grafikleri literatür verileri ile karşılaştırılmış olup, ilgili karşılaştırma Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Üretim halli numuneler, literatür karşılaştırması



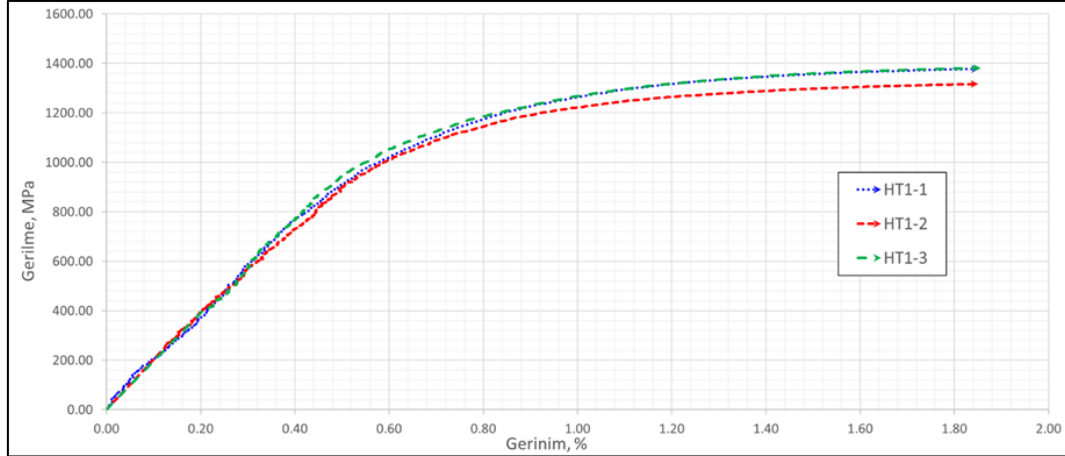
Şekil 5.4. Üretim halli numuneler, nihai çekme dayanımı, literatür karşılaştırması

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de görüldüğü üzere üretim halli numunelerde literatür ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

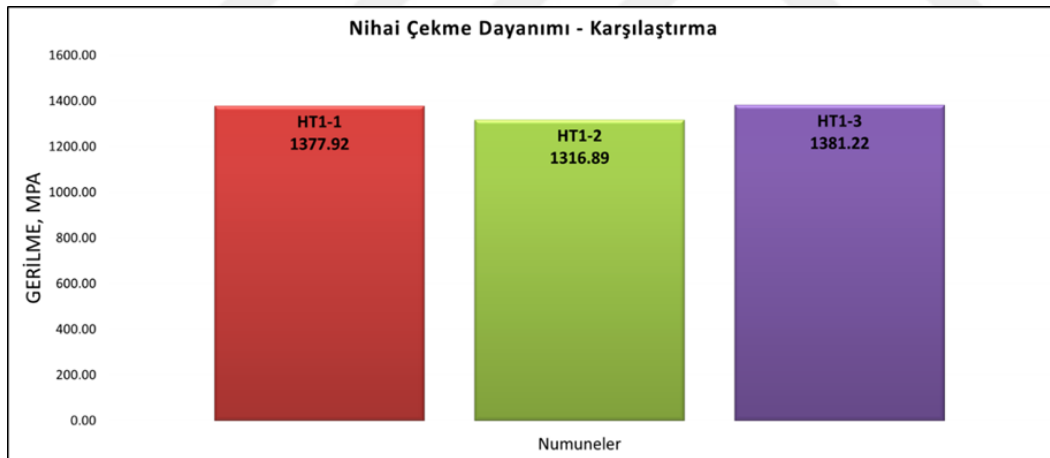
5.2.2. Çekme numuneleri – HT1

Sırasıyla çözündürme ve H900 (HT1) ısıt işlemleri uygulanmış 3 adet çekme numunesinin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. 3 adet numuneden üretim halli numunelere benzer şekilde, 1 ve 3 numaralı çekme numunelerinin akma mukavemeti ve nihai çekme dayanımları birbirlerine yakın çıkarken, 2 numaralı çekme numunesinin, akma mukavemeti ve nihai çekme dayanımı diğer iki numuneye göre daha düşük çıkmıştır. Elastisite modülleri arasında ise belirgin bir fark elde edilmemiştir. Ek olarak 3 numunenin çekme uzamaları

birbirlerine yakın elde edilmiş olup, ortalama kopma uzaması %1.8 seviyelerindedir. Her 3 numuneye ait mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.5’de, nihai çekme dayanımları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.6’da ilgili sonuçlar ise tablo halinde Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.5. H900 (HT1), mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri

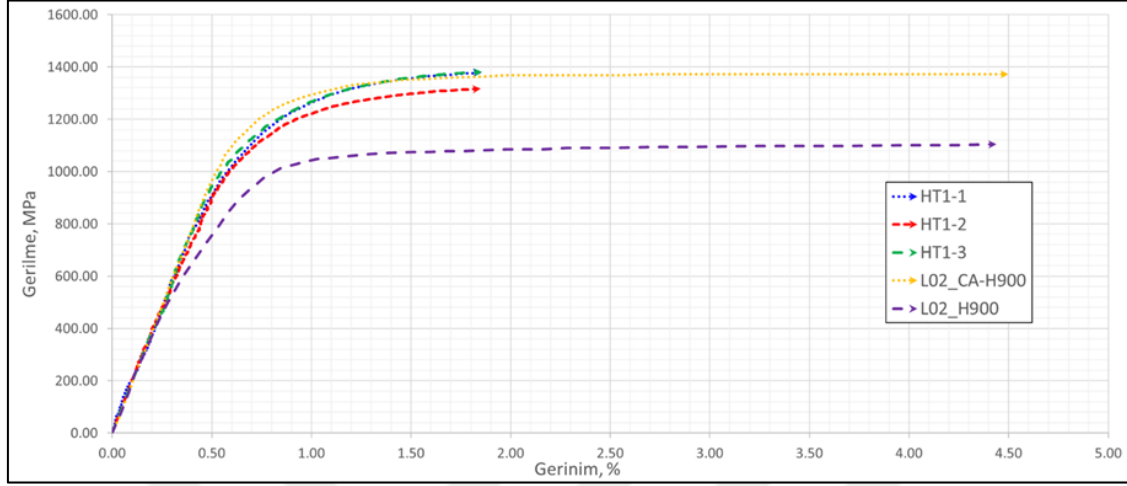


Şekil 5.6. H900 (HT1), nihai çekme dayanımı karşılaştırma

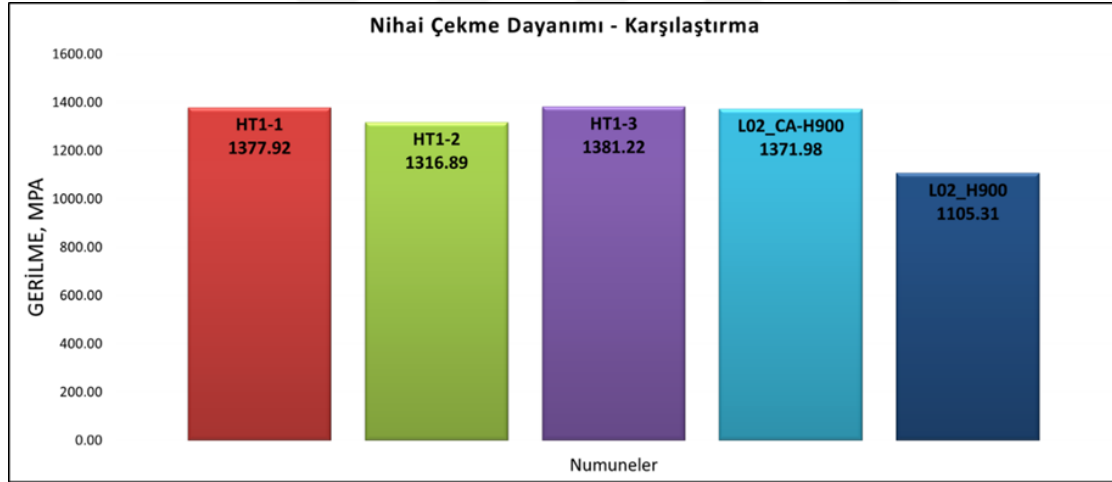
Çizelge 5.2. H900 (HT1), çekme testi sonuçları

Numune No	E (GPa)	Akma Mukavemeti (Mpa)	Nihai Dayanım (Mpa)
HT1-1	191.9	1179.0	1378
HT1-2	189.8	1173.9	1317
HT1-3	191.8	1202.6	1381

Elde edilen mühendislik gerilme – şekil değiştirme grafikleri literatür verileri ile karşılaştırılmış olup, ilgili karşılaştırmalar Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.7. H900 (HT1), literatür karşılaştırması



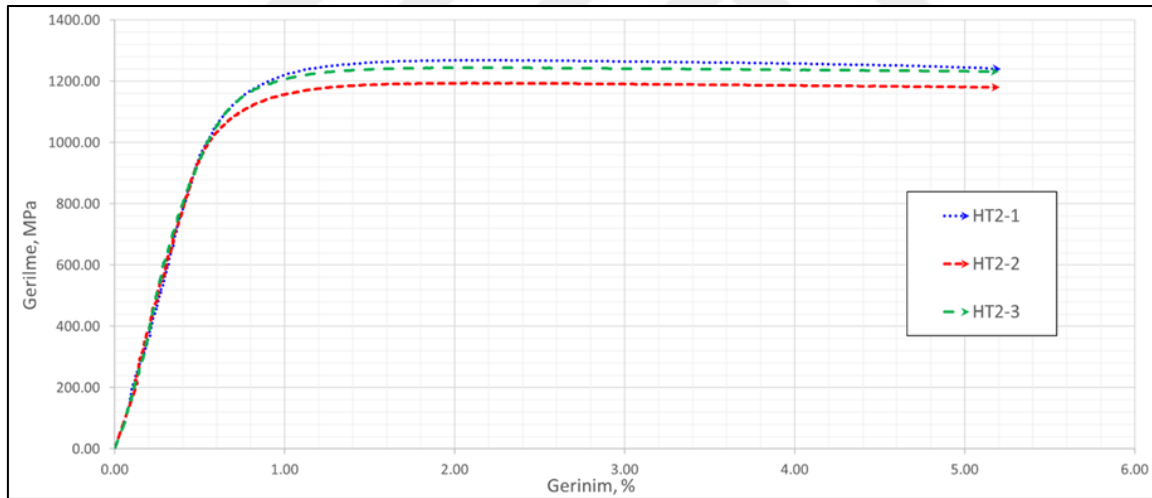
Şekil 5.8. H900 (HT1), nihai çekme dayanımı, literatür karşılaştırması

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’den anlaşılacağı üzere literatürdeki koşullar ve H900 ısıtma işlemlerinin birlikte uygulandığı sonuçlar ile tutarlı sonuçlar, sadece H900 ısıtma işleminin uygulandığı sonuçlara göre ise daha yüksek nihai çekme dayanımı elde edilmiştir. Ancak, kopma uzamalarının literatür verilerine göre daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür.

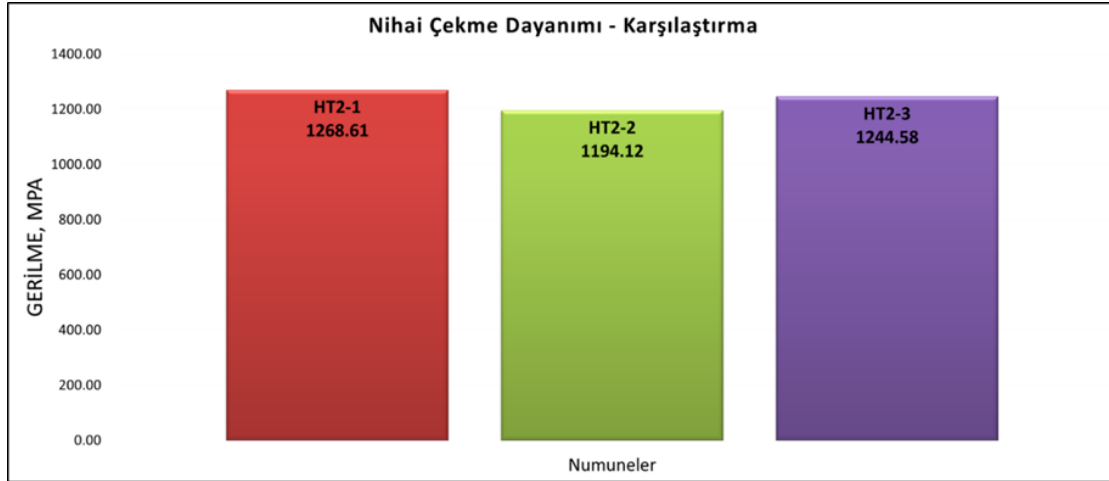
5.2.3. Çekme numuneleri – HT2

Sırasıyla çözündürme ve H1025 (HT2) ısıt işlemleri uygulanmış 3 adet çekme numunesinin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. 3 adet numuneden üretim halli numunelere benzer şekilde, 1 ve 3 numaralı çekme numunelerinin akma mukavemeti ve nihai çekme dayanımları birbirlerine yakın çıkarken, 2 numaralı çekme numunesinin, akma mukavemeti ve nihai çekme dayanımı diğer iki numuneye göre daha düşük çıkmıştır. Elastisite modülleri arasında ise belirgin bir fark elde edilmemiştir.

Ek olarak 3 numunenin çekme uzamaları birbirlerine yakın elde edilmiş olup, ortalama kopma uzaması %5 seviyelerindedir. Her 3 numuneye ait mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.9’da, nihai çekme dayanımları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.10’da, ilgili sonuçlar ise tablo halinde Çizelge 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.9. H1025 (HT2), mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri

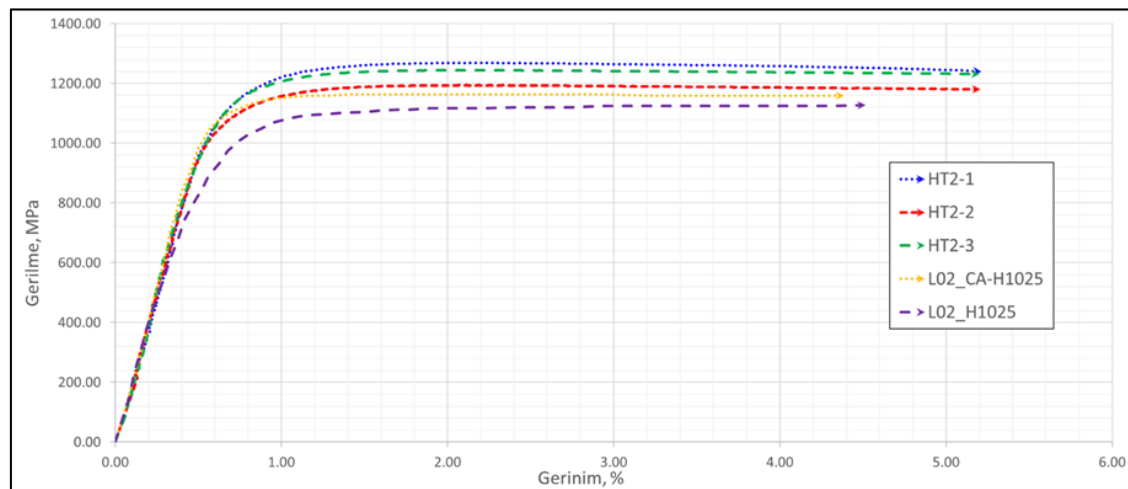


Şekil 5.10. H1025 (HT2), nihai çekme dayanımı karşılaştırma

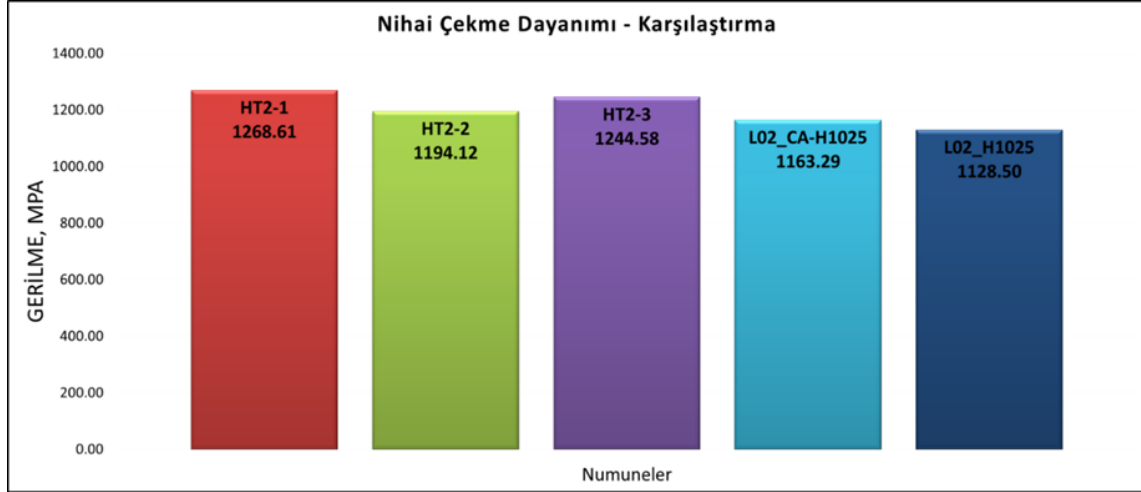
Çizelge 5.3. H1025 (HT2), çekme testi sonuçları

Numune No	E (GPa)	Akma Mukavemeti (Mpa)	Nihai Dayanım (Mpa)
HT2-1	191.2	1085.8	1269
HT2-2	192.9	1064.3	1194
HT2-3	192.6	1084.2	1245

Elde edilen mühendislik gerilme – şekil değiştirme grafikleri literatür verileri ile karşılaştırılmış olup, ilgili karşılaştırmalar Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.11. H1025 (HT2), literatür karşılaştırması

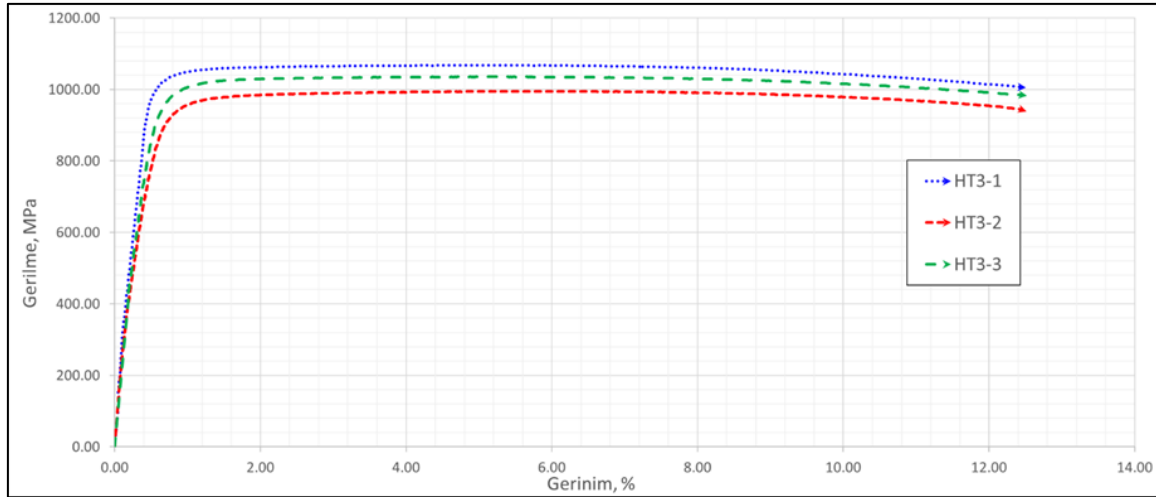


Şekil 5.12. H1025 (HT2), nihai çekme dayanımı, literatür karşılaştırması

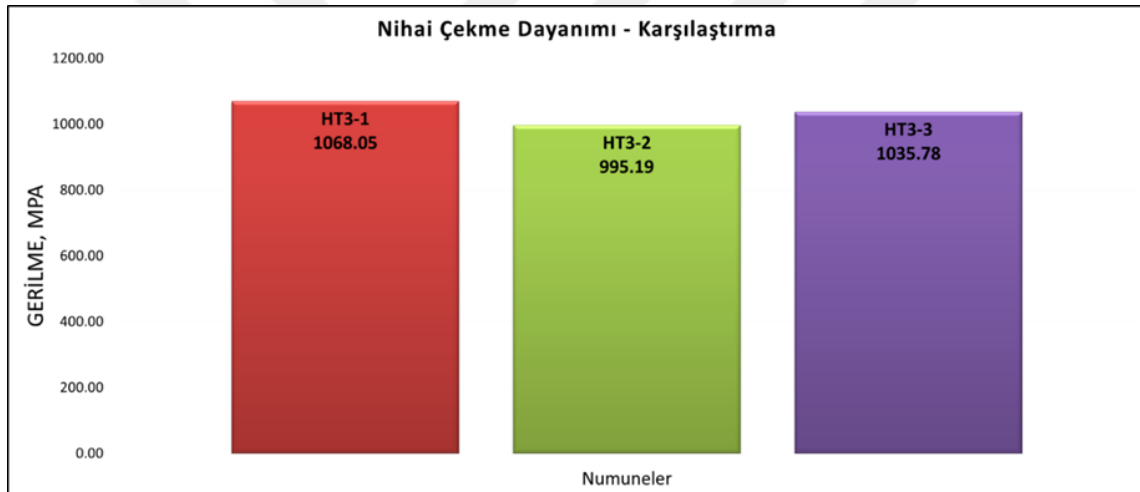
Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’den anlaşılacağı üzere literatürdeki koşul-A ve H1025 ısıtma işlemlerinin birlikte ve sadece H1025 ısıtma işleminin uygulandığı sonuçlara göre daha yüksek nihai çekme dayanımları elde edilmiştir. Kopma uzamalarında ise belirgin bir farkın olmadığı görülmüştür.

5.2.4. Çekme numuneleri – HT3

Sırasıyla çözündürme ve H1150 (HT3) ısıtma işlemleri uygulanmış 3 adet çekme numunesinin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. 3 adet numuneden üretim halli numunelere benzer şekilde, 1 ve 3 numaralı çekme numunelerinin akma mukavemeti ve nihai çekme dayanımları birbirlerine yakın çıkarken, 2 numaralı çekme numunesinin, akma mukavemeti ve nihai çekme dayanımı diğer iki numuneye göre daha düşük çıkmıştır. Ancak, ısıtma işlemi uygulanmış diğer ve üretim halli numunelerden farklı olarak 1 numaralı numunenin nihai çekme dayanımı ve akma mukavemeti, 3 numaralı numuneden daha yüksek çıkmıştır. Elastisite modülleri arasında ise belirgin bir fark elde edilmemiştir. Ek olarak 3 numunenin çekme uzamaları birbirlerine yakın elde edilmiş olup, ortalama kopma uzaması %5 seviyelerindedir. Her 3 numuneye ait mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.13’de, nihai çekme dayanımları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.14’de, ilgili sonuçlar ise tablo halinde Çizelge 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.13. H1150 (HT3), mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri

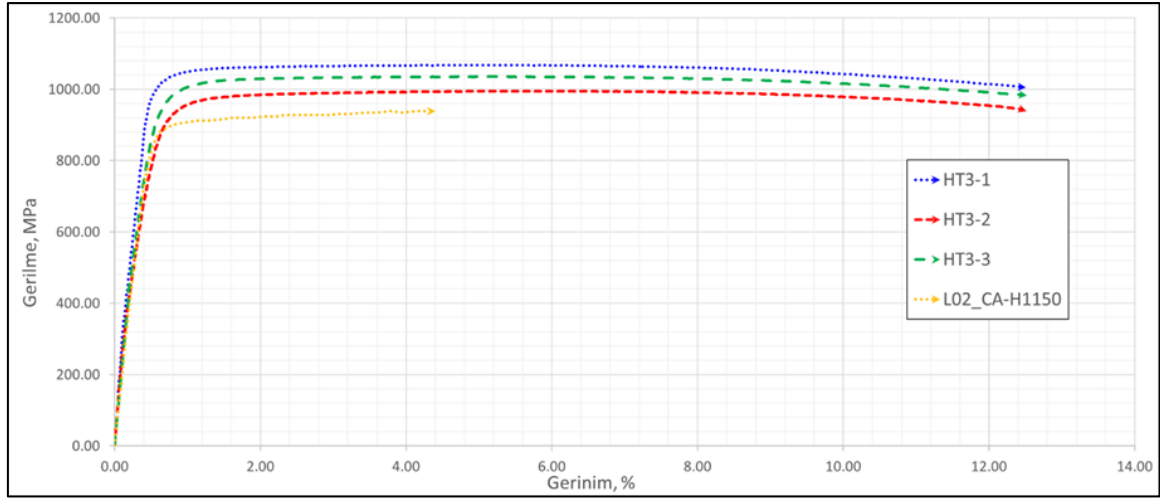


Şekil 5.14. H1150 (HT3), nihai çekme dayanımı karşılaştırma

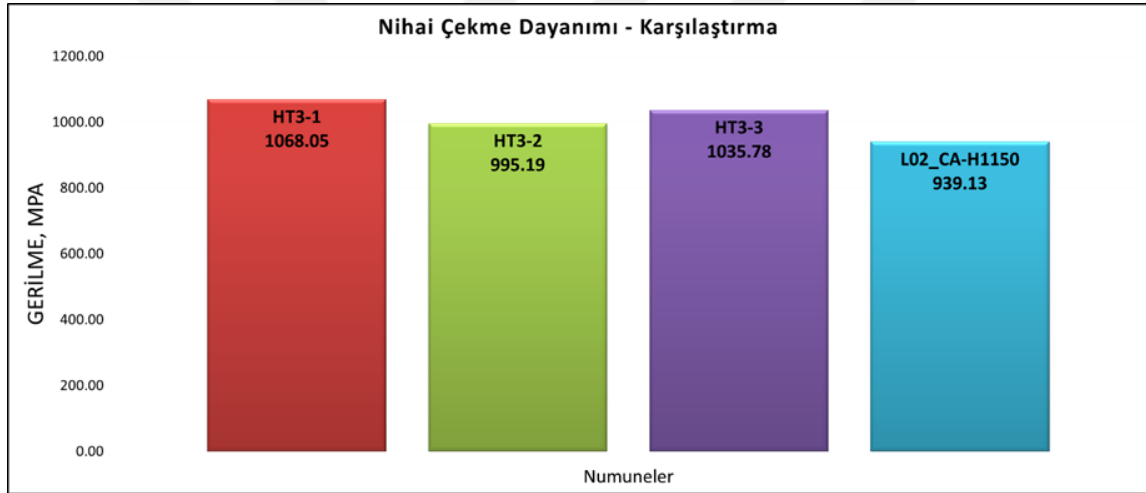
Çizelge 5.4. H1150 (HT3), çekme testi sonuçları

Numune No	E (GPa)	Akma Mukavemeti (Mpa)	Nihai Dayanım (Mpa)
HT3-1	194.1	913.8	1068
HT3-2	193.2	886.9	995
HT3-3	195.0	902.2	1036

Elde edilen mühendislik gerilme – şekil değiştirme grafikleri literatür verileri ile karşılaştırılmış olup, ilgili karşılaştırmalar Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilmiştir.



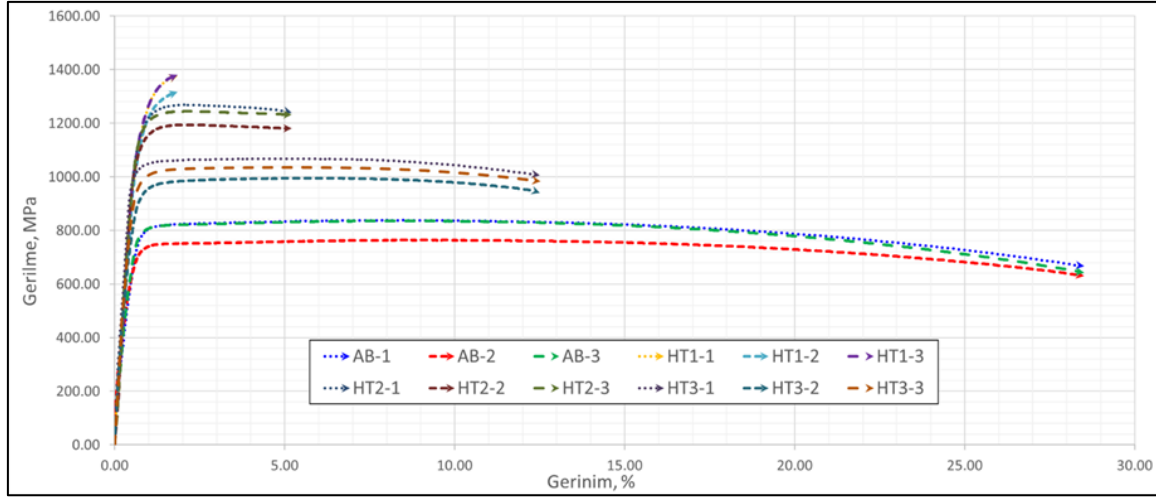
Şekil 5.15. H1150 (HT3), literatür karşılaştırması



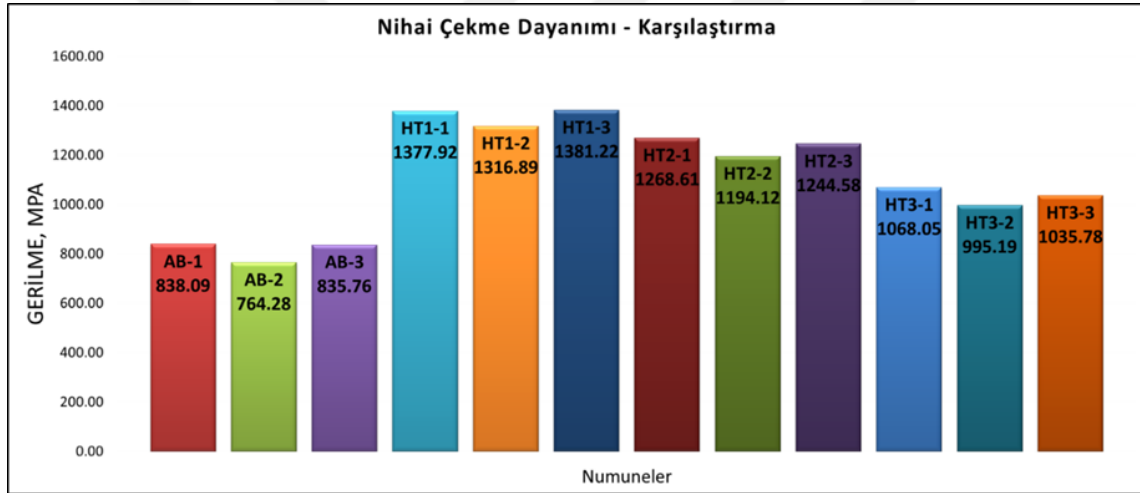
Şekil 5.16. H1150 (HT3), nihai çekme dayanımı, literatür karşılaştırması

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'dan anlaşılabacağı üzere literatürdeki koşul-A ve H1150 ısıtma işlemlerinin birlikte uygulandığı sonuçlara göre daha yüksek nihai çekme dayanımları ve kopma uzamaları elde edilmiştir.

Ayrıca tüm numunelere ait mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.17'de, nihai çekme dayanımları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.18'de verilmiştir.



Şekil 5.17. Tüm numuneler, mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri



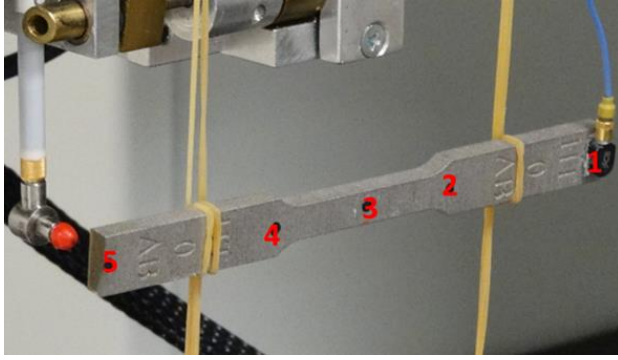
Şekil 5.18. Tüm numuneler, nihai çekme dayanımı karşılaştırma

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'den anlaşılabacağı üzere, en düşük nihai çekme dayanımı ve akma mukavemeti ile en yüksek kopma uzaması üretim halli çekme numunelerinde elde edilmiştir. Isıl işlem uygulanmış çekme numuneleri kendi içlerinde değerlendirildiğinde, ısıl işlem sıcaklığı arttıkça (H900-HT1 → 480 °C, H1025-HT2 → 550 °C, H1150-HT3 → 620 °C) nihai çekme dayanımı ve akma mukavemeti düşerken, kopma uzaması artmaktadır. Ek olarak, her bir üçlü numune grubu kendi içerisinde değerlendirildiğinde en düşük nihai çekme dayanımı ile akma mukavemeti 2 numaralı numunelerde elde edilmiştir.

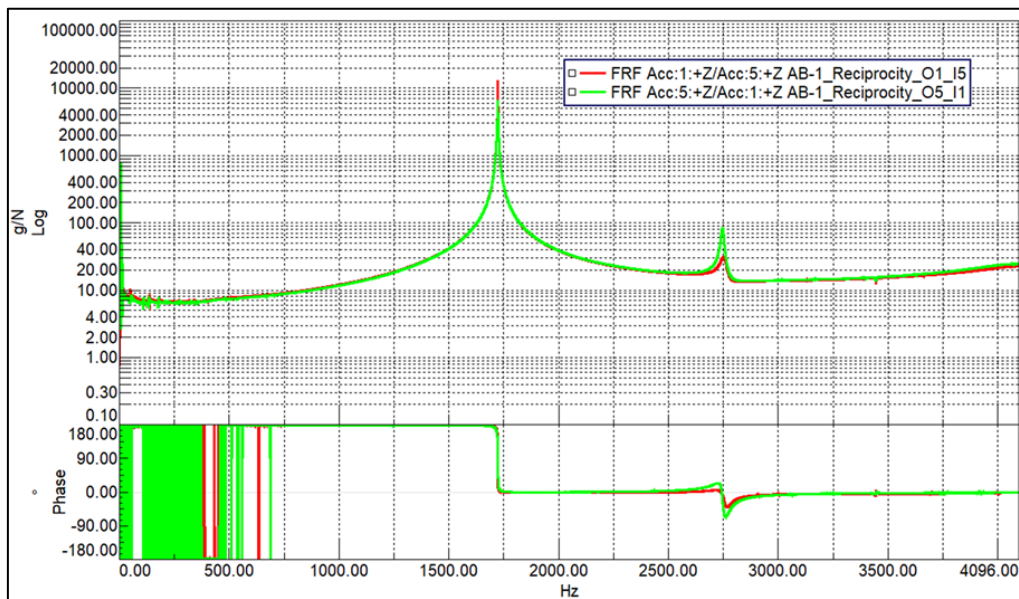
5.3. Deneysel Modal Analiz Sonuçları

5.3.1. Eklemeli imalat üretimi, üretim halli çekme numuneleri sonuçları

Deneysel modal analizlerine, ilgili numunelerin lineer olarak kabul edilip edilemeyeceğini elde etmek amacıyla karşılıklı teoreminin sağlanıp sağlanmadığının kontrolü ile başlanmıştır. Karşılıklı teoreminde belirtildiği üzere Şekil 5.19'da verilen 1 numaralı noktadan vurulup 5 numaralı noktadan numune ivme cevabı toplanmış, daha sonra ise 5 numaralı noktadan vurulup 1 numaralı noktadan numune cevabı ivme verisi toplanmıştır. Her iki durumda FTF grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafikler karşılaştırmalı olarak Şekil 5.20'de verilmiştir.



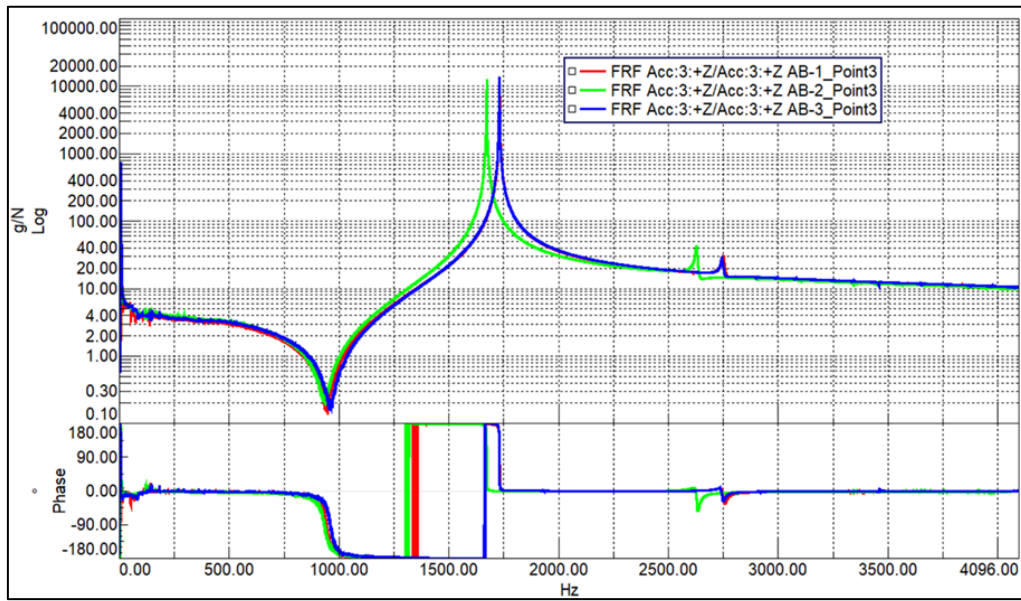
Şekil 5.19. Üretim halli çekme numunesi, tahrik ve ölçüm noktaları



Şekil 5.20. Karşılıklı teoremi, üretim halli 1 numaralı numune, FTF grafikleri

Şekil 5.20’de görüldüğü üzere karşılıklı teoremi kontrolü için elde edilen FTF grafikleri birbirlerine benzer şekilde elde edilmiştir.

Karşılıklı teoremi sağlandıktan sonra, modal test robotu kullanılarak, üretim halli çekme numunelerinin serbest-serbest sınır koşulunda ve oda sıcaklığında deneysel modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel modal analizler sonucunda, 1. eğilme moduna ait, mod şekilleri ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Testler sonucunda elde edilen FTF grafikleri Şekil 5.21’de, doğal frekans değerleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.21. Üretim halli çekme numuneleri, FTF grafikleri

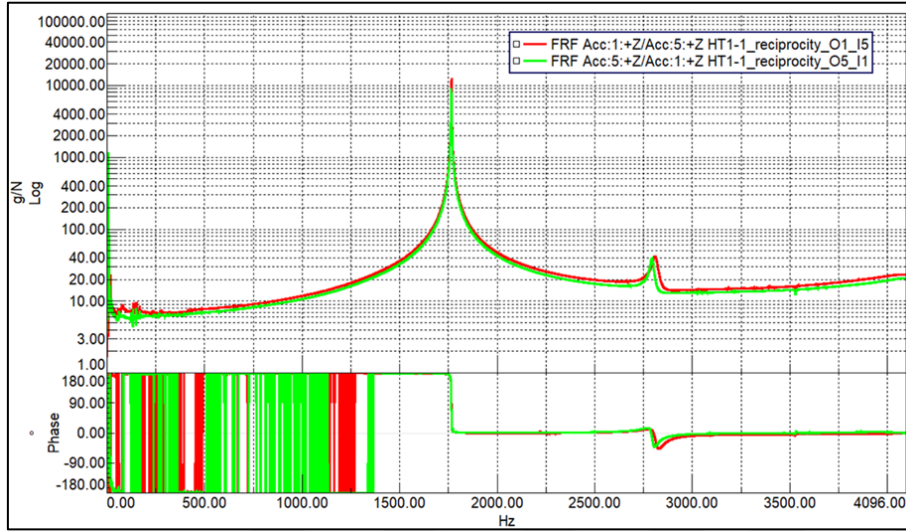
Çizelge 5.5. Üretim halli çekme numuneleri, doğal frekans değerleri

Numune No	Frekans (Hz)
Üretim Halli-1	1730.79
Üretim Halli-2	1672.76
Üretim Halli-3	1729.92

Gerçekleştirilen deneysel modal analizlerde, çekme testi sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. 2 numaralı üretim halli çekme numunesinin, ilk elastik doğal frekansı 1 ve 3 numaralı numunelere göre daha düşük elde edilmiştir.

5.3.2. Eklemeli imalat üretimi, HT1, çekme numuneleri sonuçları

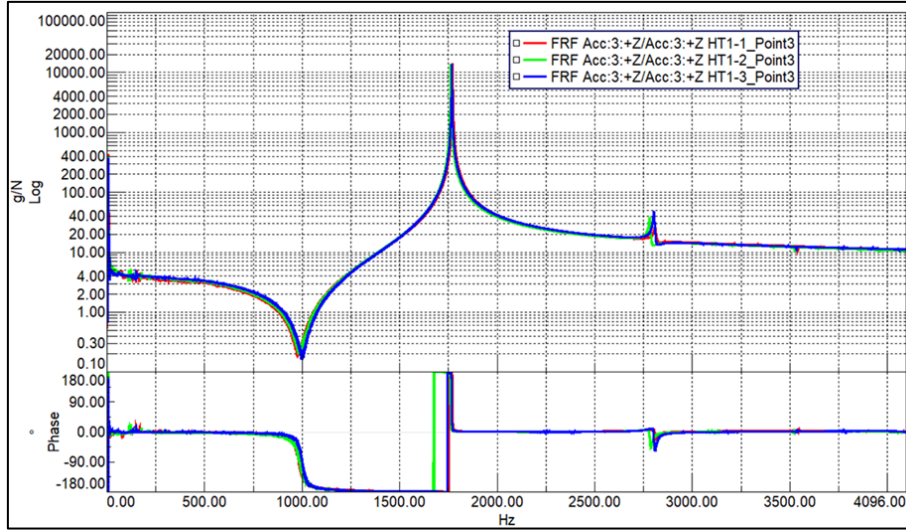
Modal testler öncesinde, çözündürme ve H900 (HT1) ısıt işlemleri uygulanmış numunelerde karşılıklı teoreminin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Elde edilen FTF grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.22. Karşılıklı teoremi, 1 numaralı numune, FTF grafikleri

Şekil 5.22’de görüldüğü üzere karşılıklı teoremi kontrolü için elde edilen FTF grafikleri birbirlerine benzer şekilde elde edilmiştir.

Karşılıklı teoremi sağlandıktan sonra, modal test robotu kullanılarak, çözündürme ve H900 (HT1) ısıt işlemleri uygulanmış çekme numunelerinin serbest-serbest sınır koşulunda ve oda sıcaklığında deneysel modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel modal analizler sonucunda, 1. eğilme moduna ait, mod şekilleri ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Testler sonucunda elde edilen FTF grafikleri Şekil 5.23’de, doğal frekans değerleri Çizelge 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.23. H900 (HT1) ısıt işlemleri uygulanmış numuneler, FTF grafikleri

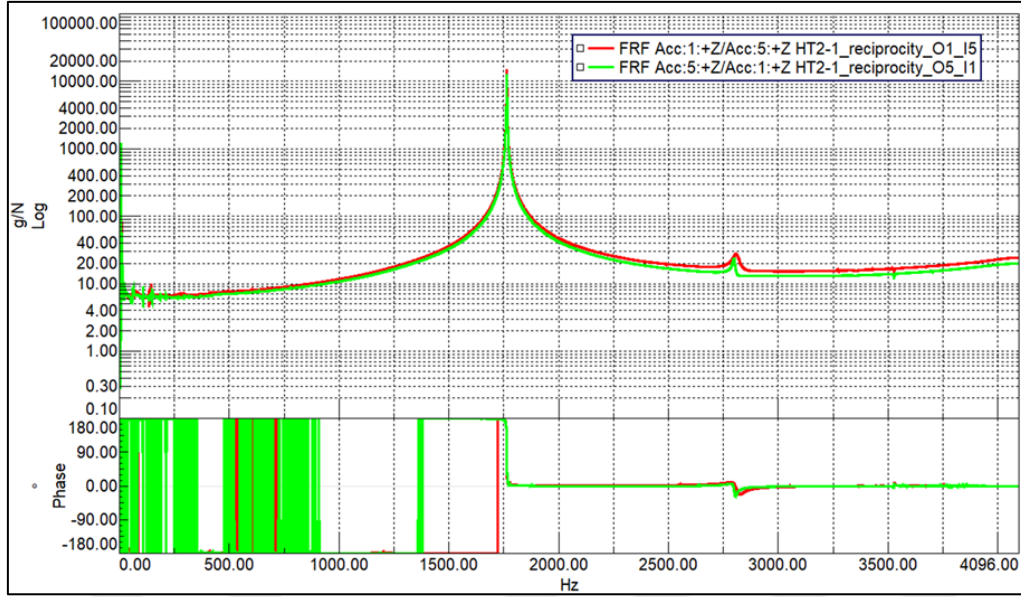
Çizelge 5.6. H900 (HT1) çekme numuneleri, doğal frekans değerleri

Numune No	Frekans (Hz)
HT1-1	1771.83
HT1-2	1761.49
HT1-3	1767.07

Gerçekleştirilen deneysel modal analizlerde, benzer ısıt işlemlerin uygulandığı numunelere ait çekme testi sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Doğal frekans değeri elastisite modülünün bir fonksiyonu olduğu için her 3 numunenin de doğal frekans değerleri birbirlerine benzer olarak elde edilmiştir.

5.3.3. Eklemeli imalat üretimi, HT2, çekme numuneleri sonuçları

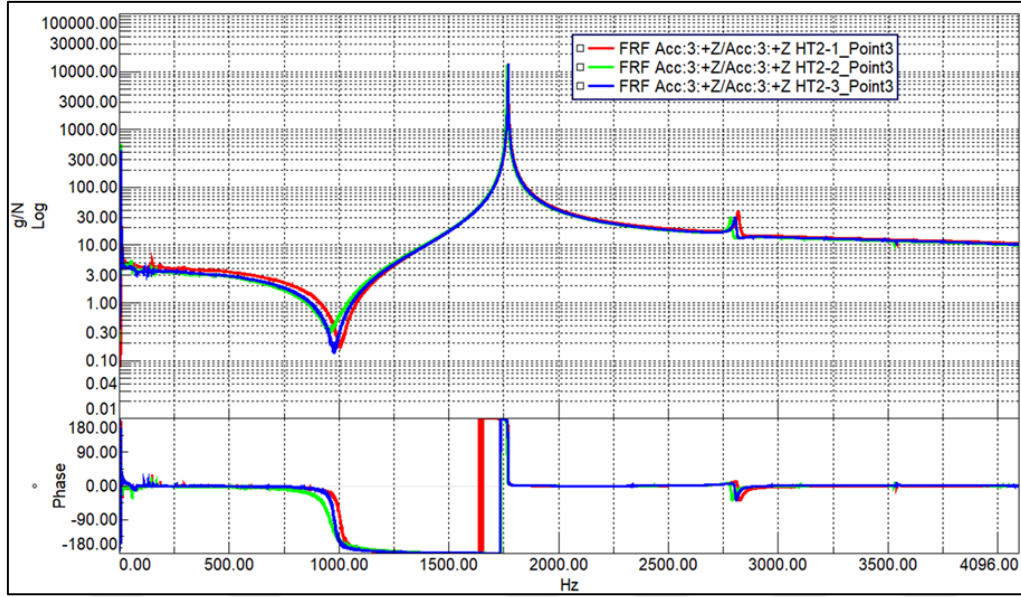
Modal testler öncesinde, çözündürme ve H1025 (HT2) ısıt işlemleri uygulanmış numunelerde karşılıklı teoreminin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Elde edilen FTF grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.24’de verilmiştir.



Şekil 5.24. Karşılıklı teoremi, 1 numaralı numune, FTF grafikleri

Şekil 5.24’de görüldüğü üzere karşılıklı teoremi kontrolü için elde edilen FTF grafikleri birbirlerine benzer şekilde elde edilmiştir.

Karşılıklı teoremi sağlandıktan sonra, modal test robotu kullanılarak, çözündürme ve H1025 (HT2) ısıtma işlemleri uygulanmış çekme numunelerinin serbest-serbest sınır koşulunda ve oda sıcaklığında deneysel modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel modal analizler sonucunda, 1. eğilme moduna ait, mod şekilleri ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Testler sonucunda elde edilen FTF grafikleri Şekil 5.25’de, doğal frekans değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.25. H1025 (HT2) ısıt işlemleri uygulanmış numuneler, FTF grafikleri

Çizelge 5.7. H1025 (HT2) çekme numuneleri, doğal frekans değerleri

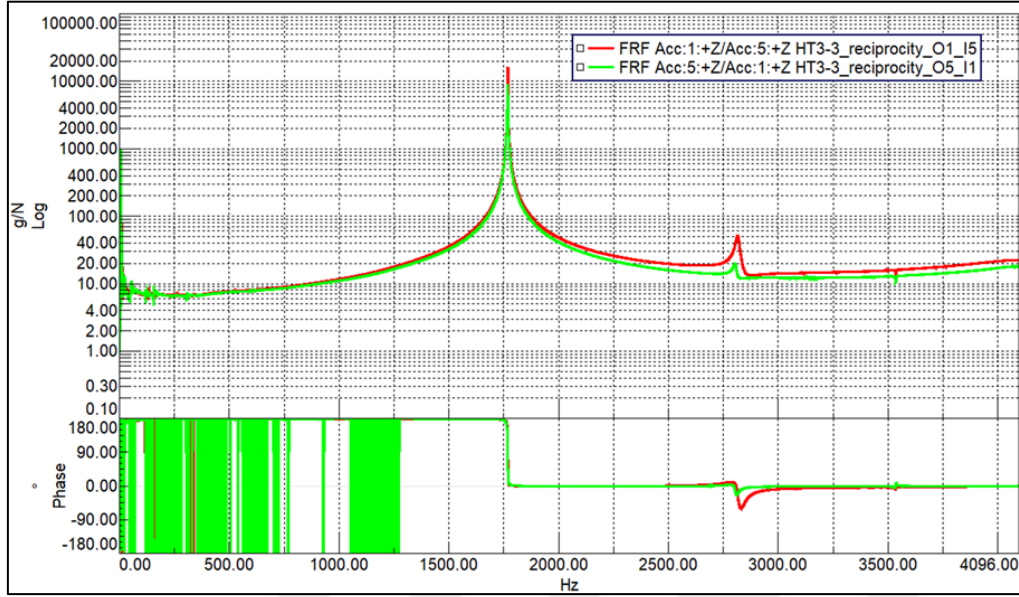
Numune No	Frekans (Hz)
HT2-1	1770.82
HT2-2	1765.78
HT2-3	1769.19

Gerçekleştirilen deneysel modal analizlerde, benzer ısıt işlemlerin uygulandığı numunelere ait çekme testi sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Doğal frekans değeri elastisite modülünün bir fonksiyonu olduğu için her 3 numunenin de doğal frekans değerleri birbirlerine benzer olarak elde edilmiştir.

5.3.4. Eklemeli imalat üretimi, HT3, çekme numuneleri sonuçları

Çözündürme ve H1150 (HT3) ısıt işlemi uygulanan 1 ve 2 numaralı numunelerin, üretim sonrası (ısıt işlem öncesi) uçlarından parça kesilmiştir. Bu numunelerin boyları diğer numunelerden daha kısa olduğu için ısıt işlem sonrası modal testleri gerçekleştirilmemiştir. Ancak bu numunelerin boylarının diğer numunelerden kısa olması çekme testlerinde herhangi bir problem yaratmamıştır (çekme testlerinin gerçekleştirildiği cihaz çeneleri numuneleri sağlıklı bir şekilde tutabilmiştir).

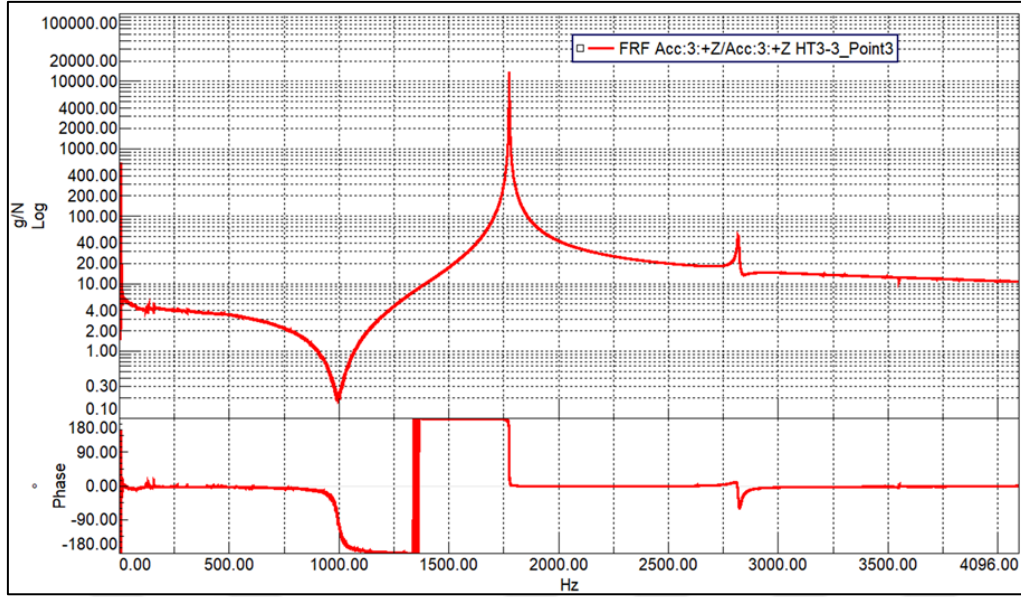
Modal testler öncesinde, çözündürme ve H1150 (HT3) ısıl işlemleri uygulanmış 3 numaralı numune karışıklık teoreminin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Elde edilen FTF grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.26'da verilmiştir.



Şekil 5.26. Karışıklık teoremi, 3 numaralı numune, FTF grafikleri

Şekil 5.26'da görüldüğü üzere karışıklık teoremi kontrolü için elde edilen FTF grafikleri birbirlerine benzer şekilde elde edilmiştir.

Karışıklık teoremi sağlandıktan sonra, modal test robotu kullanılarak, çözündürme ve H1150 (HT3) ısıl işlemleri 3 numaralı çekme numunesinin serbest-serbest sınır koşulunda ve oda sıcaklığında deneysel modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel modal analizler sonucunda, 1. eğilme moduna ait, mod şekilleri ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Testler sonucunda elde edilen FTF grafiği Şekil 5.27'de, doğal frekans değeri Çizelge 5.8'de verilmiştir.

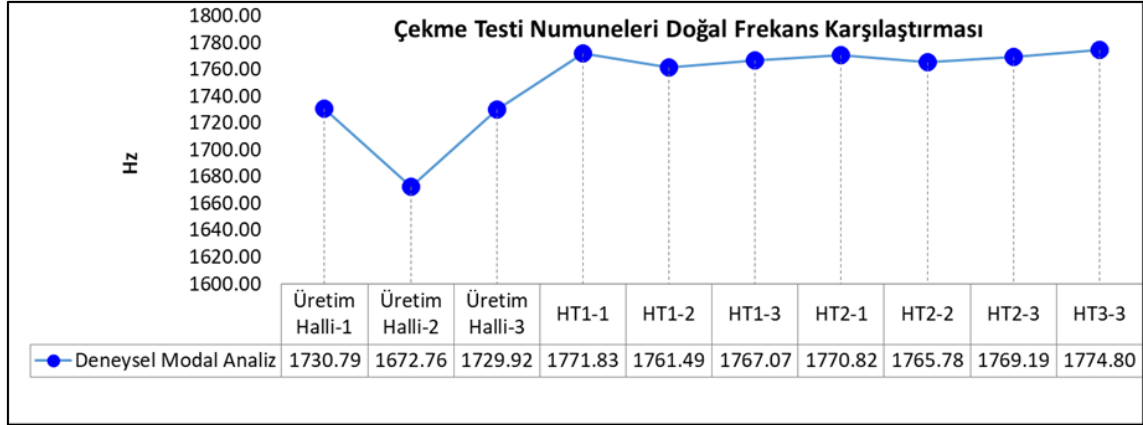


Şekil 5.27. H1150 (HT3), 3 numaralı numune, FTF grafiği

Çizelge 5.8. H1150 (HT3) çekme numunesi, doğal frekans değeri

Numune No	Frekans (Hz)
HT3-3	1774.802

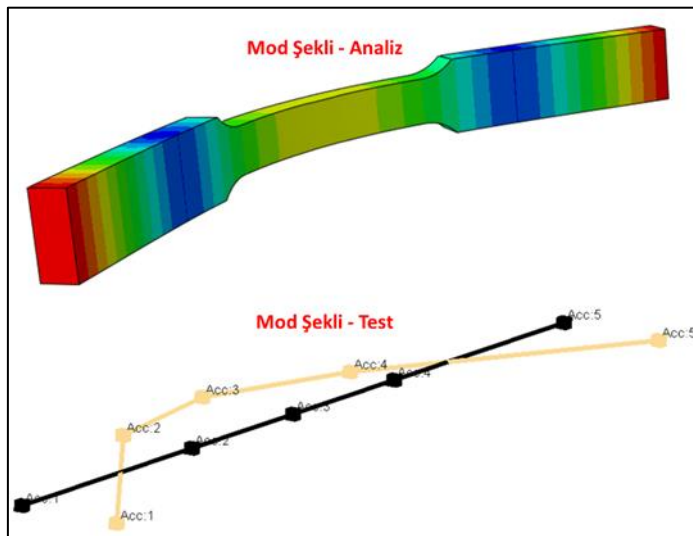
Gerçekleştirilen deneysel modal analizde, benzer ısıt işlemlerin uygulandığı numunelere ait çekme testi sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Doğal frekans değeri elastisite modülünün bir fonksiyonu olduğu için 3 numaralı numunenin de doğal frekans değeri ısıt işlem uygulanmış diğer numunelerin doğal frekans değerlerine benzer olarak elde edilmiştir. Ayrıca, deneysel modal analizlerden elde edilen tüm çekme testi numunelerine ait doğal frekans değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.28’de verilmiştir.



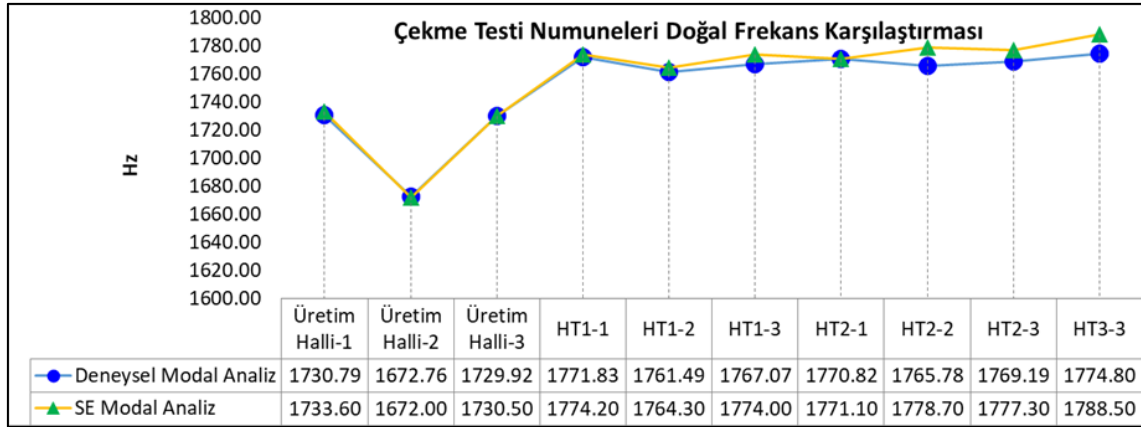
Şekil 5.28. Çekme testi numuneleri, doğal frekans karşılaştırma

Şekil 5.28’den anlaşılacağı üzere, ısıtılmış tüm numunelerin, ısıtılmış tipinden bağımsız olarak doğal frekans değerleri birbirlerine yakın elde edilmiştir. Üretim halli numunelerin doğal frekans değerleri ise ısıtılmış numunelerin doğal frekans değerlerinden daha düşük olarak bulunmuştur.

Ek olarak deneysel modal analizlerden elde edilen mod şekilleri ile çekme testlerinden elde edilen elastisite modüllerini doğrulamak amacıyla çekme testi numunelerinin serbest-serbest sınır koşulunda sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Testler ve analizden elde edilen mod şekilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.29’da, doğal frekans değerleri karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 5.30 ve Çizelge 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.29. Çekme numuneleri mod şekli, analiz/test karşılaştırması



Şekil 5.30. Çekme numuneleri doğal frekans değerleri, analiz/test karşılaştırması

Çizelge 5.9. Çekme numuneleri doğal frekans, analiz/test karşılaştırması

Numune No	Elastisite Modülü (Çekme Testi) GPa	Frekans (Analiz) Hz	Frekans (Deneyisel) Hz
Üretim Halli-1	171.9	1733.60	1730.79
Üretim Halli-2	160.0	1672.00	1672.76
Üretim Halli-3	171.3	1730.50	1729.92
HT1-1	191.9	1774.20	1771.83
HT1-2	189.8	1764.30	1761.49
HT1-3	191.8	1774.00	1767.07
HT2-1	191.2	1771.10	1770.82
HT2-2	192.9	1778.70	1765.78
HT2-3	192.6	1777.30	1769.19
HT3-3	195.0	1788.50	1774.80

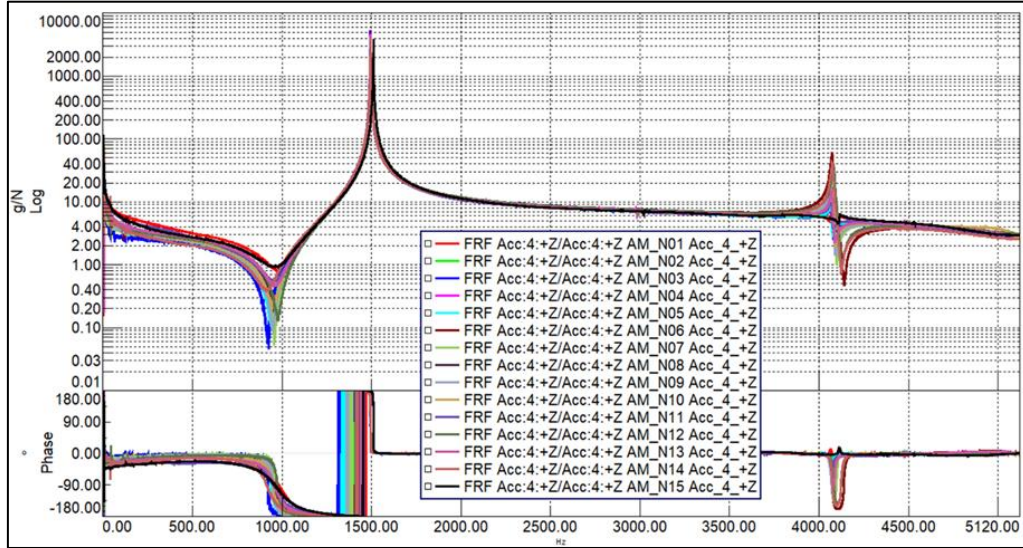
Şekil 5.29'dan anlaşılabacağı üzere deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile benzer mod şekilleri elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen sonlu elemanlar modal analizlerinde çekme testlerinden elde edilen elastisite modülleri kullanılmıştır. Şekil 5.30 ve Çizelge 5.9'da görüldüğü üzere deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile birbirlerine yakın doğal frekans değerleri elde edilmiştir.

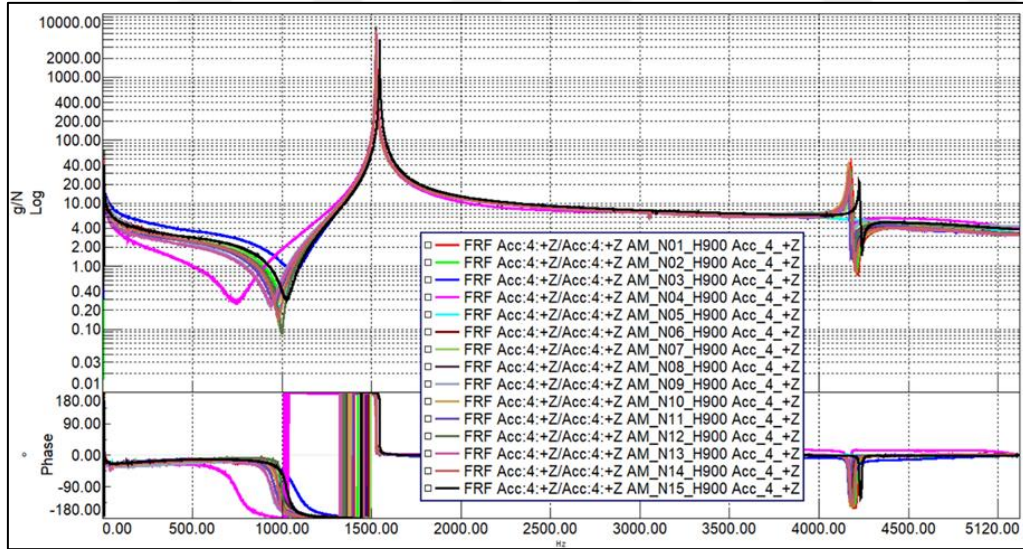
5.3.5. Eklemeli imalat üretimi, yorulma numuneleri sonuçları

Eğilmeli yorulma testlerinde kullanılmak üzere eklemeli imalat yöntemi ile üretilen 15 adet numunenin ısıtma işlemi (çözündürme + H900 ısıtma işlemi) öncesi ve sonrasında modal test robotu kullanılarak, serbest-serbest sınır koşulunda ve oda sıcaklığında deneysel modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel modal analizlerden elde edilen ısıtma

işlem öncesi ve sonrasına ait FTF grafikleri sırasıyla Şekil 5.31 ve Şekil 5.32’de, 1. ve 2. eğilmeli modlarının doğal frekans değerleri de karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’de verilmiştir.

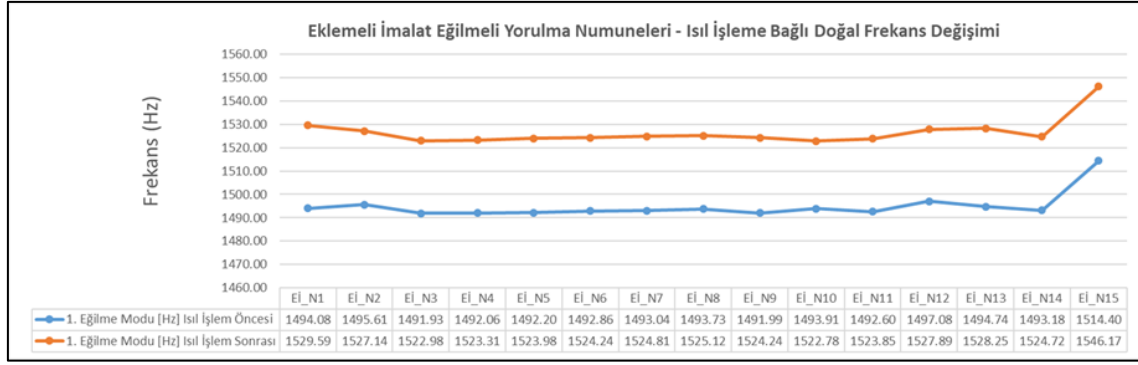


Şekil 5.31 Yorulma numuneleri, ısıt işlem öncesi FTF grafikleri

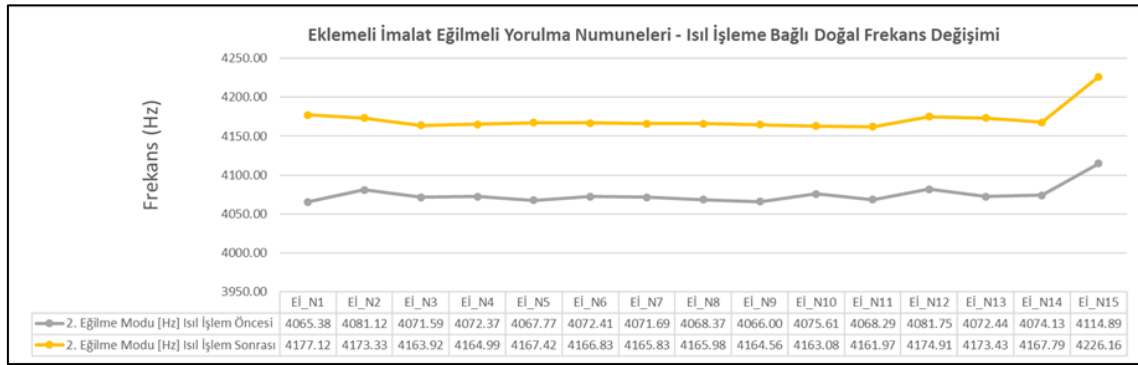


Şekil 5.32. Yorulma numuneleri, ısıt işlem sonrası FTF grafikleri

Şekil 5.31 ve Şekil 5.32’den anlaşılacağı üzere ısıt işlem öncesi ve sonrası tüm numunelerin 1. ve 2. eğilme modları doğal frekans değerleri birbirlerine yakın olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.33. Yorulma numuneleri, 1. eğilme modu doğal frekans değişimi

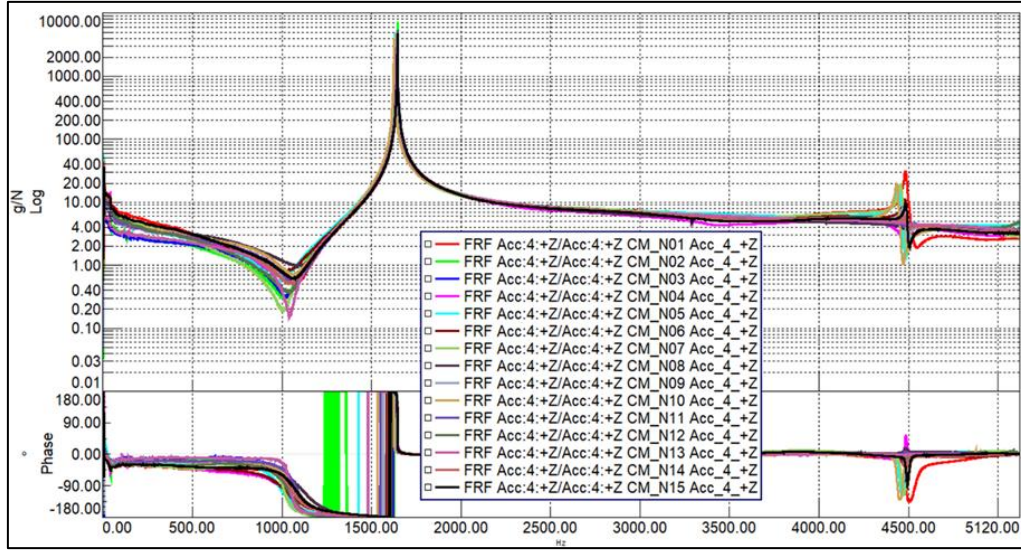


Şekil 5.34. Yorulma numuneleri, 2. eğilme modu doğal frekans değişimi

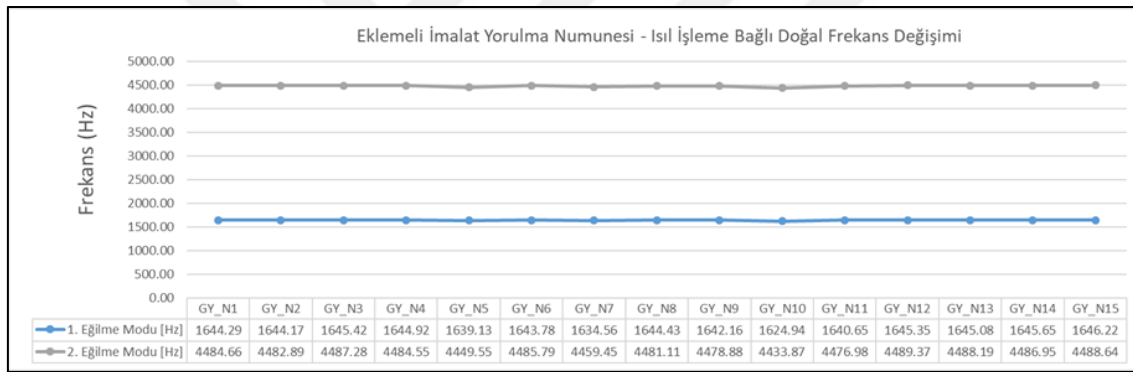
Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’de görüldüğü üzere, hem 1. hem de 2. eğilme modları doğal frekans değerleri, çekme numunelerine benzer şekilde, ısıtıl işlem sonrası (çözündürme + H900 ısıtıl işlemi) artış göstermiştir.

5.3.6. Geleneksel yöntem üretimi, yorulma numuneleri sonuçları

Eğilmeli yorulma testlerinde kullanılmak üzere geleneksel yöntem ile üretilen 15 adet numunenin modal test robotu kullanılarak, serbest-serbest sınır koşulunda ve oda sıcaklığında deneysel modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel modal analizlerden elde edilen FTF grafikleri Şekil 5.35’de, 1. ve 2. eğilme modlarının doğal frekans değerleri de Şekil 5.36’da verilmiştir.



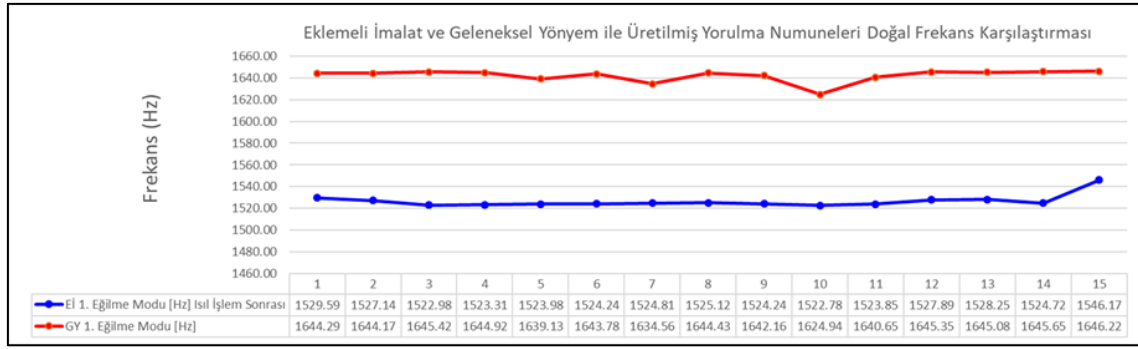
Şekil 5.35. Geleneksel yöntem yorulma numuneleri, FTF grafikleri



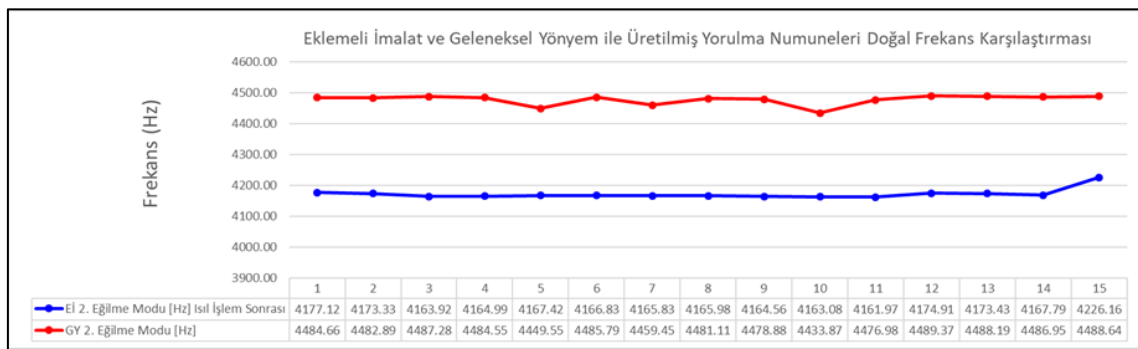
Şekil 5.36. Geleneksel yöntem yorulma numuneleri, doğal frekans değerleri

Şekil 5.35 ve Şekil 5.36’da görüldüğü üzere, geleneksel yöntem ile üretilmiş 15 adet numunenin 1. ve 2. eğilme modlarına ait doğal frekans değerleri kendi içlerinde birbirlerine yakın olarak elde edilmiştir.

Ayrıca, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş numunelerin ısıtılma sonrası doğal frekans değerleri ile geleneksel yöntem ile üretilmiş 15 adet numunenin doğal frekans değerleri karşılaştırılmıştır. İlgili karşılaştırmalar 1. ve 2. eğilme modları olacak şekilde sırasıyla Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’de verilmiştir.



Şekil 5.37. Yorulma numuneleri, 1. eğilme modu doğal frekans değerleri



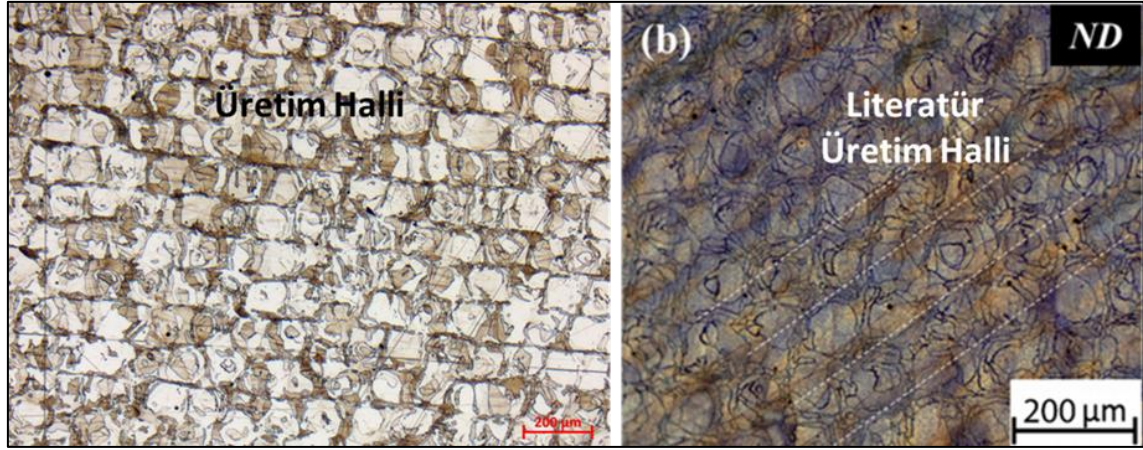
Şekil 5.38. Yorulma numuneleri, 2. eğilme modu doğal frekans değerleri

Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’den anlaşıldığı üzere geleneksel yöntem ile üretilmiş numunelerin hem 1. Hem de 2. Eğilme modlarına ait doğal frekans değerleri, eklemeli imalat ile üretilmiş numunelerin doğal frekans değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir.

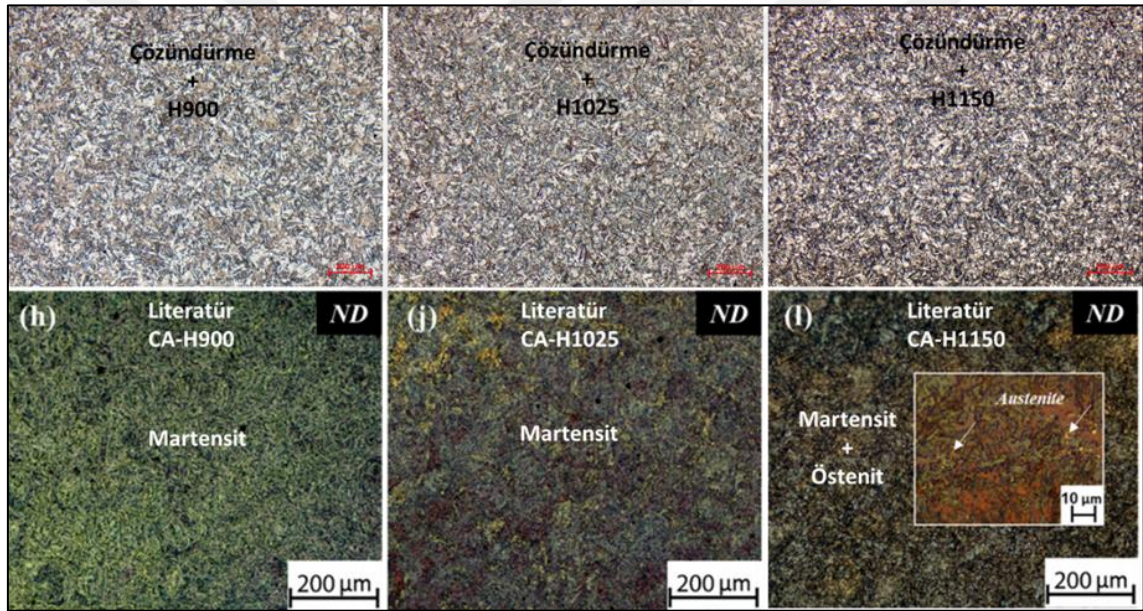
5.4. İç Yapı İncelenmesi

5.4.1. Çekme Numuneleri Optik Mikroskop Görüntüleri

Çalışma kapsamında eklemeli imalat ile üretilmiş numunelerin optik mikroskop altında iç yapıları incelenmiştir. Elde edilen görüntüler literatür ile karşılaştırmalı olarak üretim halli numune için Resim 5.5’de ısıtıl işlem uygulanmış numuneler için Resim 5.6’da verilmiştir.



Resim 5.5. Üretim halli numuneler, optik mikroskop görüntüleri



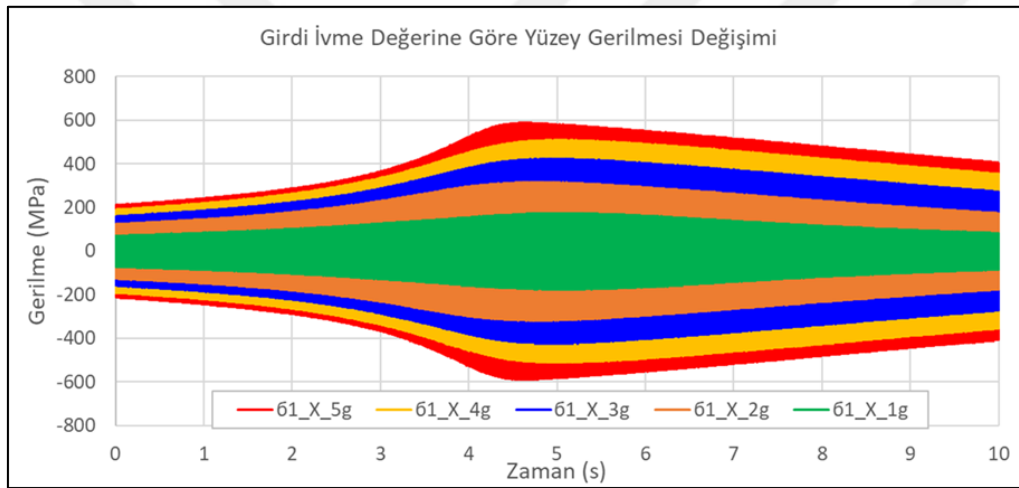
Resim 5.6. Isıl işlem uygulanmış numuneler, optik mikroskop görüntüleri

Resim 5.5'deki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde literatür ile benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Resim 5.6'daki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde ise literatür ile benzer şekilde H900 ve H1025 ısıtma işlem görüntüleri arasında çok fazla farkın olmadığı, H1150 ısıtma işlem görüntüsünün ise diğer iki ısıtma işlem görüntüsünden farklı olduğu görülmüştür.

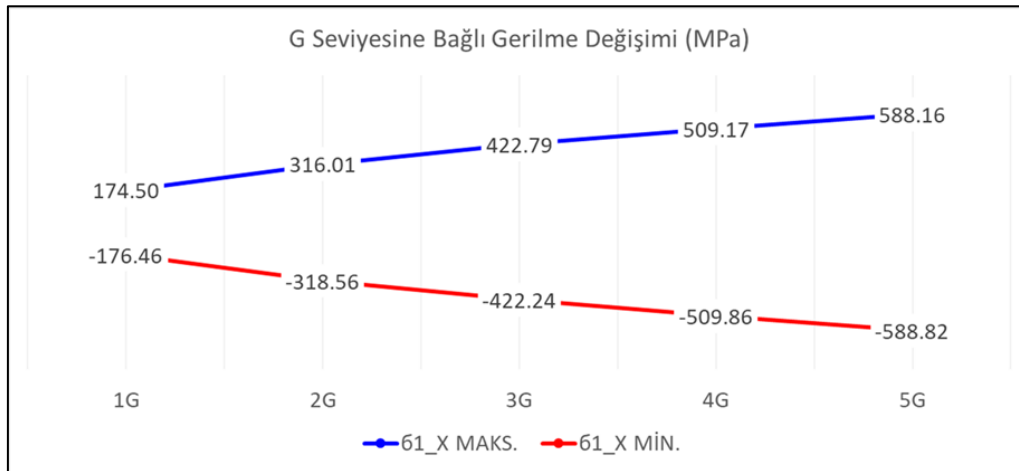
5.5. Sinüs Tarama Testleri

5.5.1. Eklemeli imalat üretimi, yorulma numuneleri sonuçları

Eklemeli imalat ile üretilmiş ve çözündürme ve H900 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerde farklı ivme girdi seviyelerinde, delik dibinde oluşacak yüzey gerilmesi seviyelerinin belirlenebilmesi için sinüs tarama testleri gerçekleştirilmiştir. Sinüs tarama testleri, girdi ivme değeri 1g'den 5'ye 1'er g artırılarak 5 farklı girdi ivme seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Testler esnasında toplanan gerilme-zaman grafiği girdi ivme değerine göre karşılaştırmalı olarak Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'da verilmiştir.



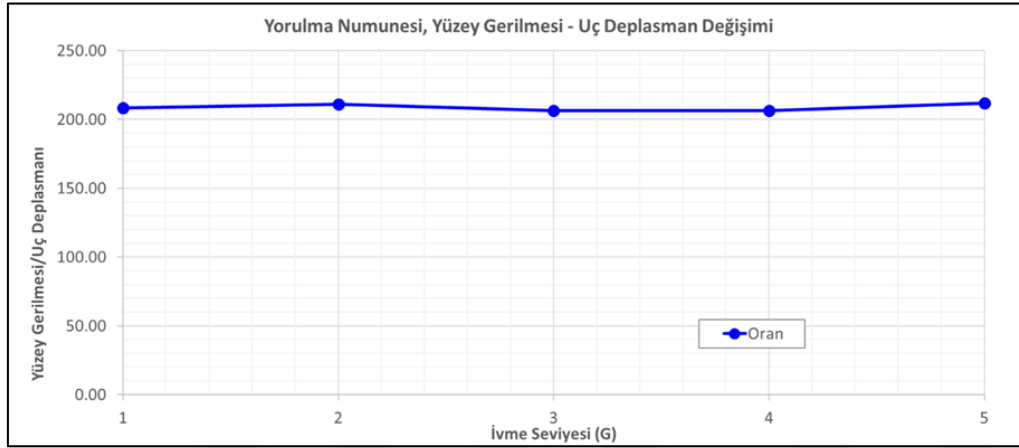
Şekil 5.39. Girdi ivme değerlerine göre yüzey gerilmesi-zaman grafikleri



Şekil 5.40. Girdi ivme değerlerine göre yüzey gerilmeleri değişimi

Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'dan anlaşılabacağı üzere delik dibinde oluşan gerilme seviyeleri, girdi ivme değerine arttıkça artış göstermektedir. Ek olarak, yüzey gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri tüm ivme seviyeleri için birbirlerine yakın değerlerdedir.

Sinüs tarama testleri tamamlandıktan sonra delik dibinde oluşan yüzey gerilmesinin, numune uç deplasmanına bağlı değişimi elde edilmiştir. Elde edilen değişim yüzey gerilmesi / uç deplasmanı oranı şeklinde Şekil 5.41'de verilmiştir.



Şekil 5.41. Yüzey gerilmesi/uç deplasman değişimi

Şekil 5.41'den anlaşılabacağı üzere ivme seviyesine göre yüzey gerilmesi/uç deplasmanı oranı sabit kalmaktadır. Bu oranın sabit kalmasından, eklemeli imalat numunelerinin kendi içlerinde lineer olarak davrandığı anlaşılmaktadır.

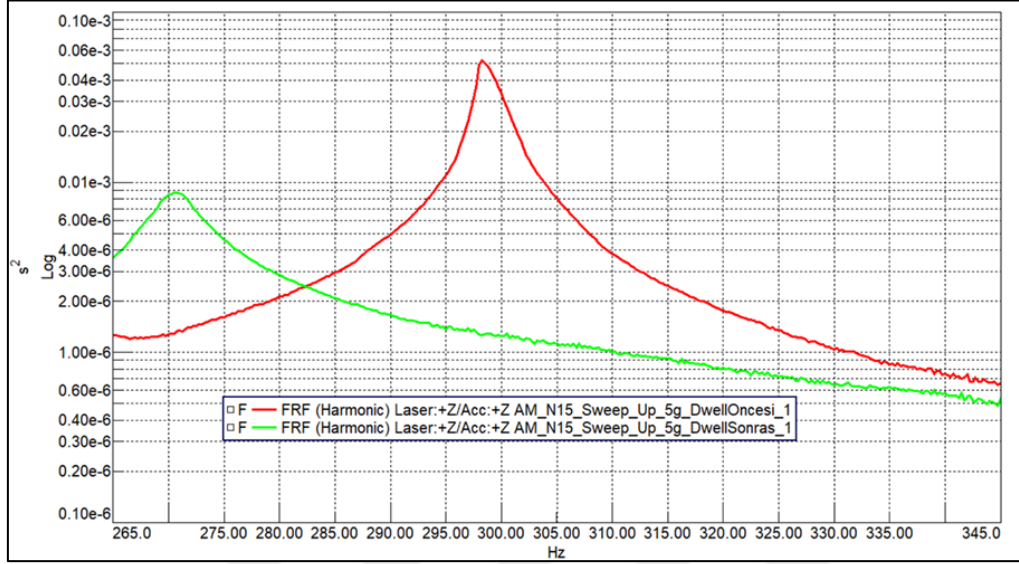
5.6. Eğilmeli Yorulma Testleri

5.6.1. Eklemeli imalat üretimi, yorulma numuneleri sonuçları

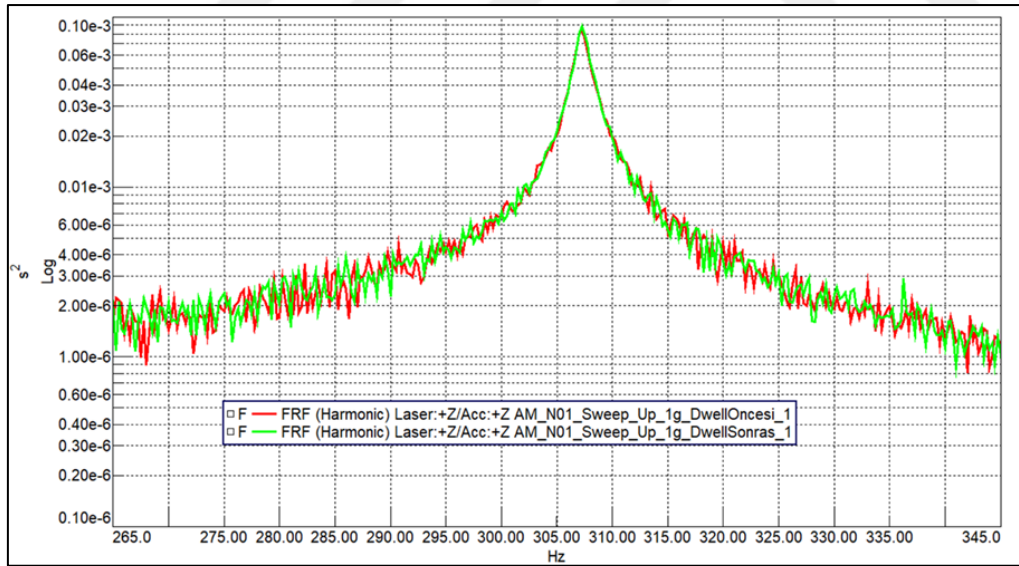
Eklemeli imalat ile üretilmiş ve çözündürme ve H900 ısıtma işlemi uygulanmış numuneler ile farklı ivme girdi seviyelerinde, eğilmeli yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Eğilmeli yorulma testlerinde sinüs bekletme yöntemi kullanılmıştır.

Eğilmeli yorulma testleri öncesi ve sonrasında her bir numuneye sinüs tarama testleri gerçekleştirilmiştir. Eğilmeli yorulma testleri öncesi ve sonrası gerçekleştirilen sinüs tarama

testlerinden elde edilen, çatlak oluşan ve çatlak oluşmayan numunelere ait örnek FTF grafikleri sırasıyla Şekil 5.42 ve Şekil 5.43'de verilmiştir.



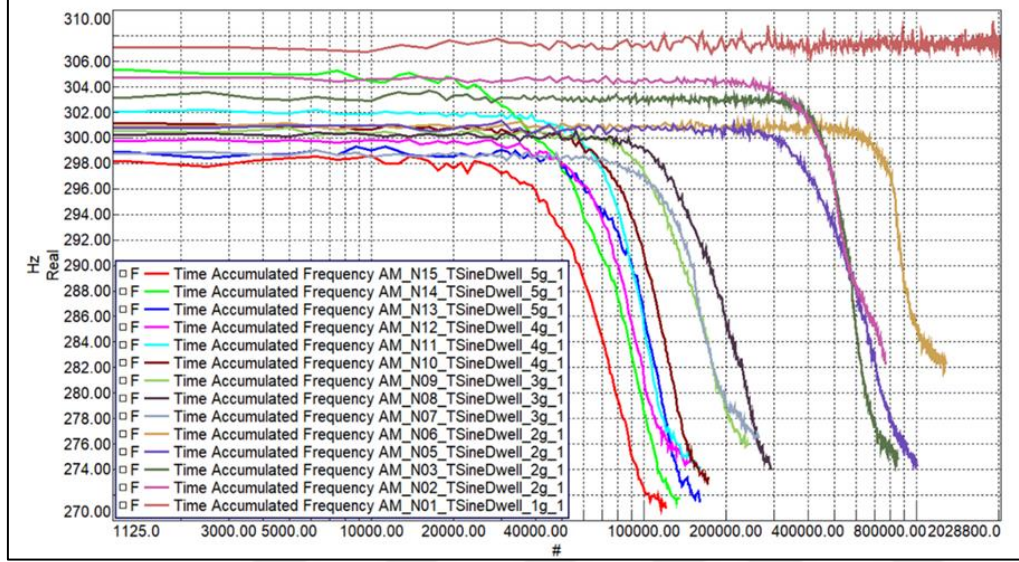
Şekil 5.42. 12 numaralı numune, yorulma testi öncesi ve sonrası FTF grafikleri



Şekil 5.43. 1 numaralı numune, yorulma testi öncesi ve sonrası FTF grafikleri

Şekil 5.42 ve Şekil 5.43'de görüldüğü üzere eğilmeli yorulma testleri sonrasında yüzey çatlak oluşmuş numunenin doğal frekans değeri düşerken, yüzey çatlak oluşmayan numunenin ise doğal frekans değerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır.

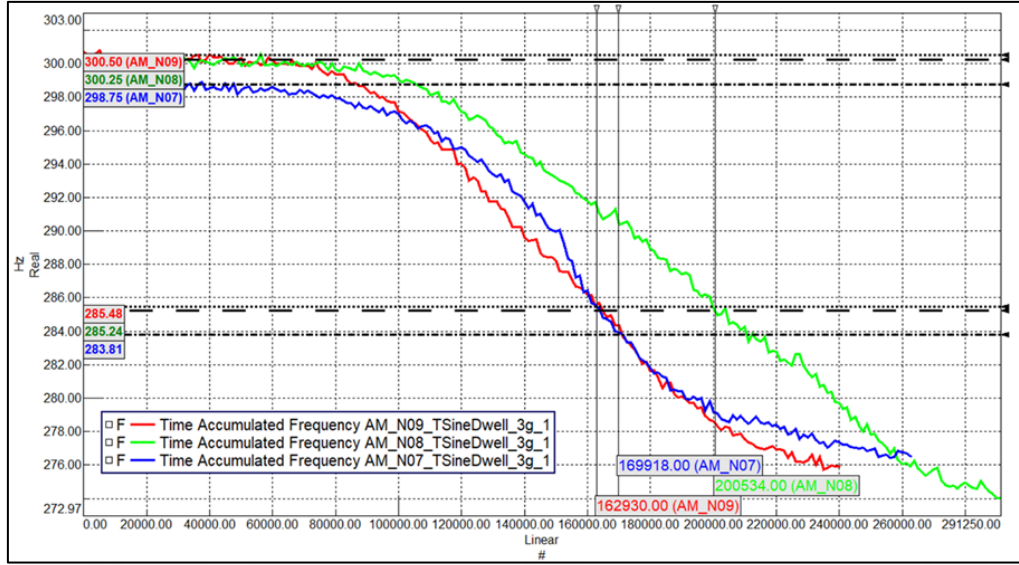
Eğilmeli yorulmalı testler esnasında, her bir numunenin doğal frekans değerinin çevrim sayısına bağlı değişimi elde edilmiştir. Elde edilen değişim Şekil 5.44'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca, S-N eğrisinde gerilme değerleri olarak da sinüs tarama testlerinden elde edilen değerler kullanılmıştır.



Şekil 5.44. Yorulma testleri, numunelerin frekans değişimleri

Şekil 5.44'den anlaşılabileceği üzere, 1 numaralı numune dışındaki tüm numunelerin doğal frekans değerleri düşmüştür. Girdi ivme değeri arttıkça frekansların düşüş gösterdiği çevrim sayısı azalmaktadır. Ayrıca, doğal frekansları düşen numunelerden çoğunun 275 Hz. civarında bir değere yakınsama eğiliminde olduğu görülmektedir.

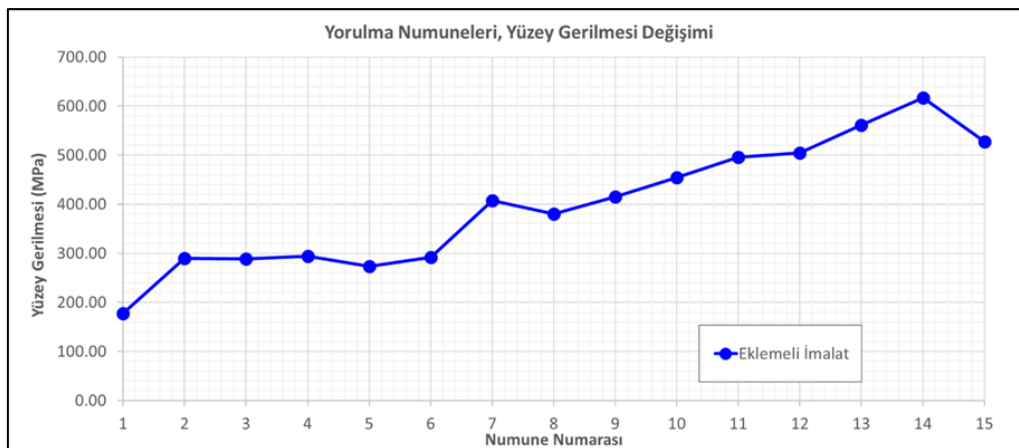
Her bir numunenin çevrim sayısına bağlı frekans değişimi elde edildikten sonra, her bir numunenin (1 numaralı numune dışında) frekans düşüşünün %1 olduğu çevrim sayısı elde edilmiştir. Elde edilen frekans değişimi örnek olarak Şekil 5.45'de verilmiştir.



Şekil 5.45. Yorulma testleri, %1 frekans düşüşü çevrim sayısı eldesi

Şekil 5.45’de görüldüğü üzere, her bir numunenin doğal frekansı farklı olduğundan dolayı %1 düşüşün gerçekleştiği çevrim sayısı da farklılık göstermektedir.

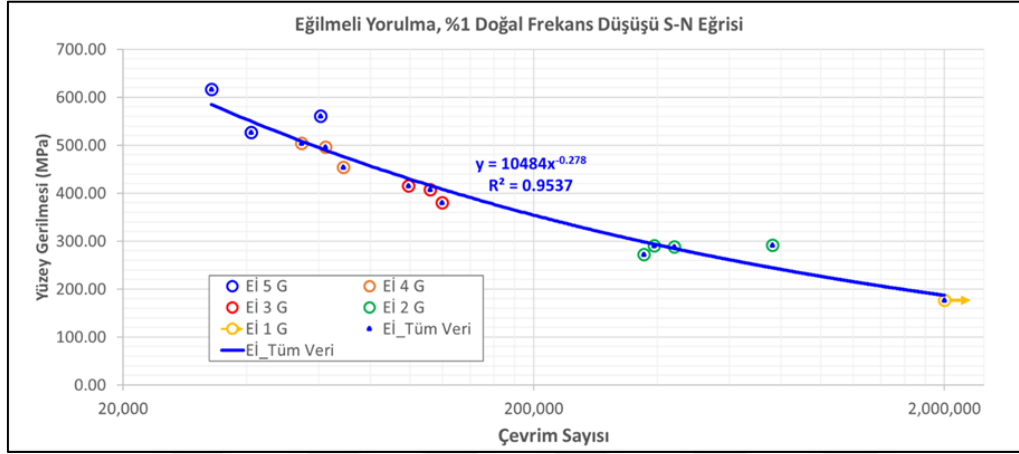
Elde edilen bu çevrim sayıları daha sonra S-N eğrisi oluşturulmasında kullanılmıştır. S-N eğrileri oluşturulurken yüzey gerilmeleri, numune uç kısmının eğilmeli yorulma testlerinde yapmış olduğu deplasman değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen gerilme grafiği, numune numarasına göre Şekil 5.46’da verilmiştir.



Şekil 5.46. Yorulma testleri, numune gerilme değerleri

Şekil 5.46’dan anlaşıldığı üzere numune yüzey gerilmeleri, numune girdi değerinin artışı ile artış eğilimindedir.

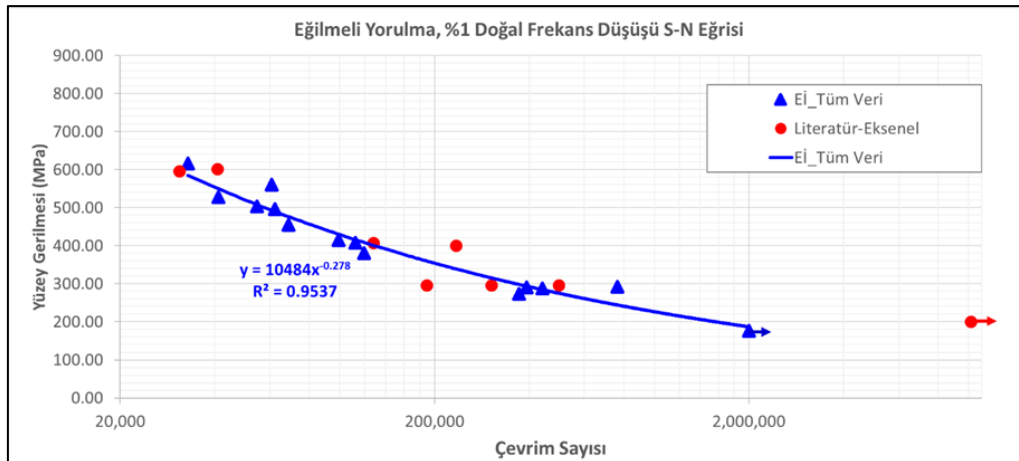
Her bir eklemeli imalat, eğilmeli yorulma numunesine ait hem %1 doğal frekans düşüşüne karşılık gelen çevrim sayıları hem de yüzey gerilmeleri belirlendikten sonra, S-N eğrisi oluşturulmuştur. Elde edilen S-N eğrisi Şekil 5.47’de verilmiştir.



Şekil 5.47. Yorulma testleri, %1 frekans düşüşü, S-N eğrisi

Şekil 5.47’den anlaşıldığı üzere yüzey gerilmesi değeri azaldıkça, doğal frekans değerinin %1 düştüğü çevrim sayısı değeri artmaktadır. Ayrıca, çevrim gerilme değeri 200 MPa değerine yakın bir değerde iken 2.10^6 çevrim sayısında herhangi bir frekans düşüşü meydana gelmemiştir.

Elde edilen S-N eğrisi, literatürde benzer üretim yöntemi ile üretilip, benzer ısıl işlemin uygulandığı S-N eğrisi ile karşılaştırılmıştır (karşılaştırmada kullanılan literatür verisi eksenel yorulma verisidir) (Şekil 5.48).

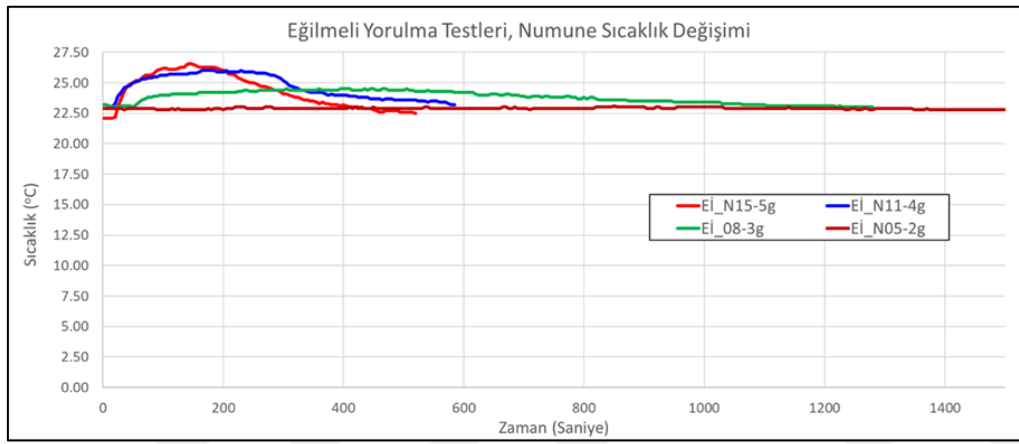


Şekil 5.48. Yorulma testleri, %1 frekans düşüşü, literatür (eksenel) karşılaştırması

Şekil 5.48'deki veriler incelendiğinde, eksenel literatür verisi ile uyumlu sonuçların elde edildiği anlaşılmaktadır.

Sıcaklık sonuçları

Eklemeli imalat üretimi numunelerin eğilmeli yorulma testleri gerçekleştirilirken farklı ivme seviyelerinde sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 5.49'da verilmiştir.



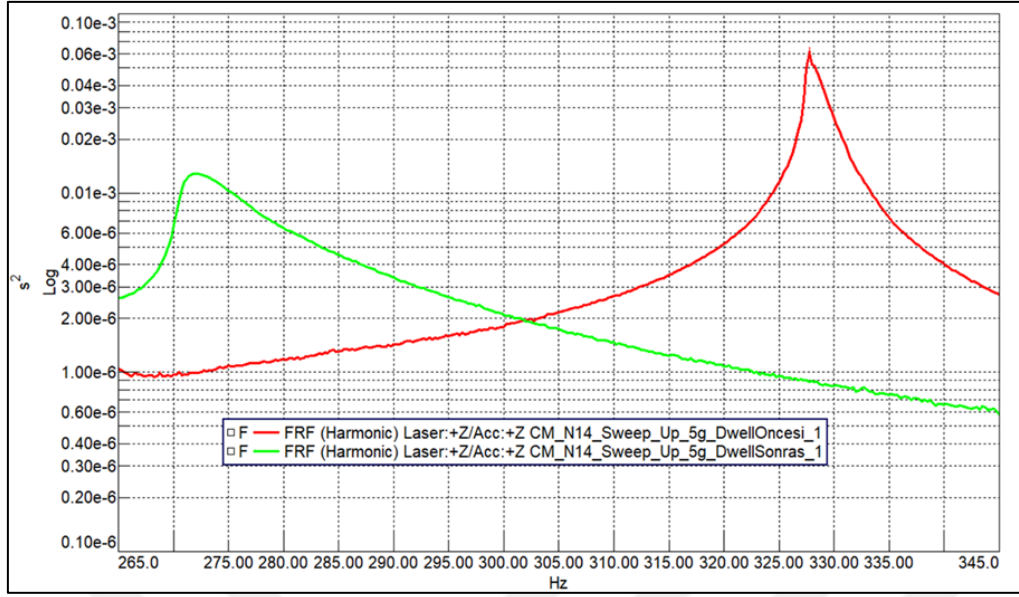
Şekil 5.49. Eklemeli imalat numuneleri, yorulma testleri sıcaklık değişimi

Şekil 5.49'dan anlaşılabacağı üzere, numunelerin delik dibindeki sıcaklıkları oda sıcaklığından en fazla 27 °C değerine yükselmektedir.

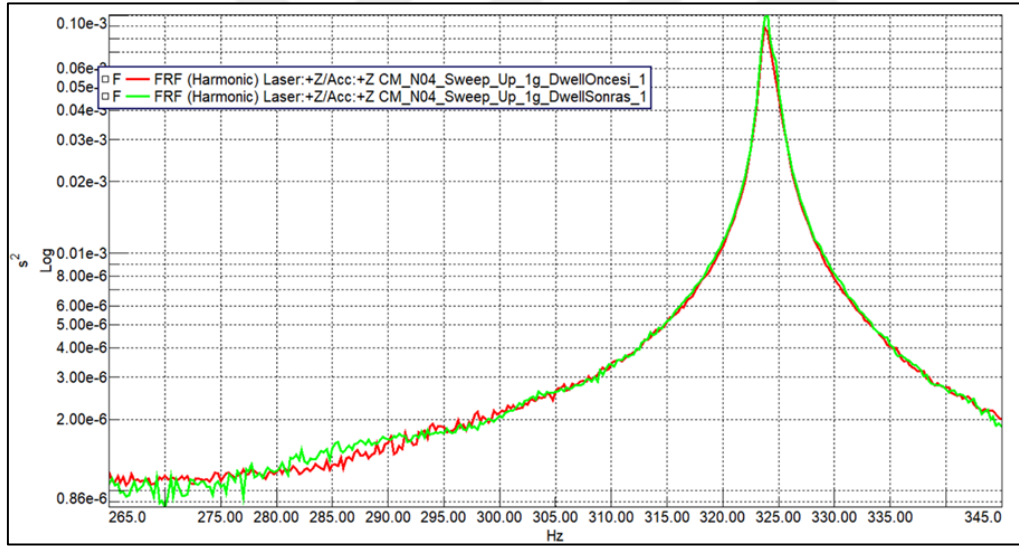
5.6.2. Geleneksel yöntem üretimi, yorulma numuneleri sonuçları

Eklemeli imalat ile üretilmiş numuneler ile gerçekleştirilen testlerden elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla, eklemeli imalat üretimi numunelere uygulanan testler, geleneksel yöntem ile üretilen numunelere de uygulanmıştır.

Sinüs bekletme testleri öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen sinüs tarama testlerine ait çatlak oluşan ve oluşmayan numunelerin FTF grafikleri Şekil 5.50 ve Şekil 5.51'de verilmiştir.



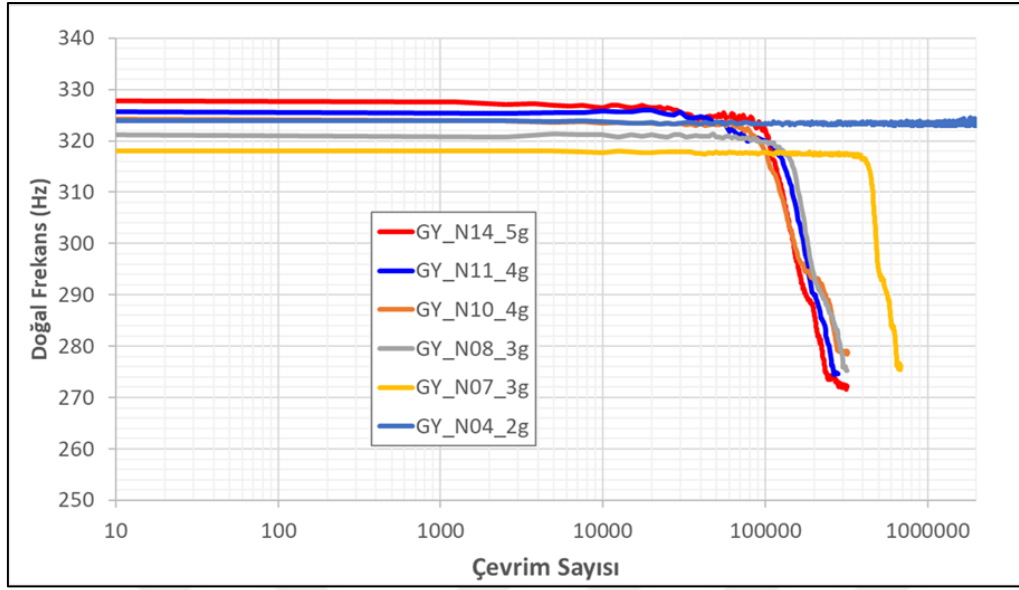
Şekil 5.50. 14 numaralı numune, yorulma testi öncesi ve sonrası FTF grafikleri



Şekil 5.51. 4 numaralı numune, yorulma testi öncesi ve sonrası FTF grafikleri

Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de görüldüğü üzere eğilmeli yorulma testleri sonrasında yüzey çatlağı oluşan numunenin doğal frekans değeri düşerken, yüzey çatlağı oluşmayan numunenin ise doğal frekans değerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır.

Eğilmeli yorulmalı testler esnasında, her bir geleneksel yöntem üretimi numunenin doğal frekans değerinin çevrim sayısına bağlı değişimi eklemeli imalat üretimi numunelerde kullanılan yöntem ile elde edilmiştir. Eğilmeli yorulma testleri gerçekleştirilen numunelerin çevrim sayısına bağlı frekans değişimleri Şekil 5.52’de verilmiştir.

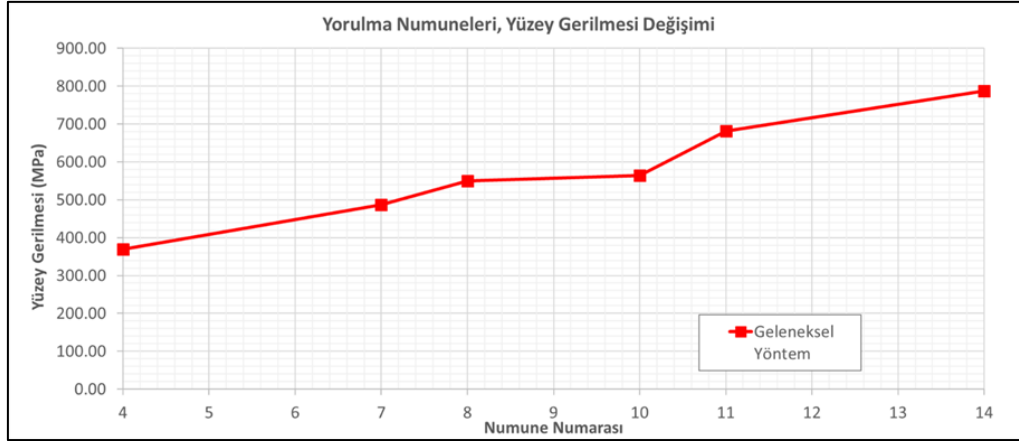


Şekil 5.52. Numunelerin frekans değişimleri, geleneksel yöntem

Şekil 5.52'den anlaşılacağı üzere, 4 numaralı numune dışında eğilmeli yorulma testlerinde kullanılan diğer tüm numunelerin doğal frekans değerleri düşmüştür. Girdi ivme değeri arttıkça frekansların düşüş gösterdiği çevrim sayısı azalmaktadır. Ayrıca, doğal frekansları düşen numunelerden çoğunun 275 Hz. civarında bir değere yakınsama eğiliminde olduğu görülmektedir.

Her bir numunenin çevrim sayısına bağlı frekans değişimi elde edildikten sonra, her bir numunenin (4 numaralı numune dışında) frekans düşünün %1 olduğu çevrim sayısı elde edilmiştir. Doğal frekans değerinin %1 düştüğü çevrim sayısı, eklemeli imalat numunelerinde kullanılan yöntemler ile belirlenmiştir.

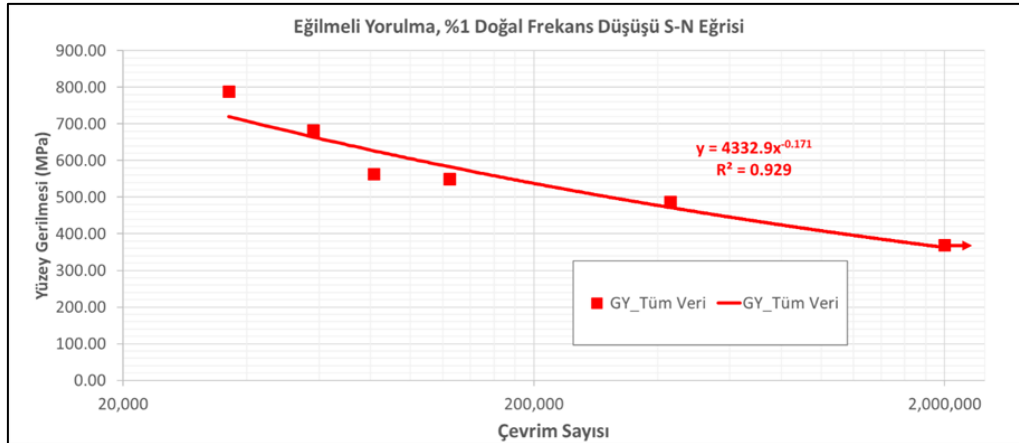
Elde edilen bu çevrim sayıları daha sonra S-N eğrisi oluşturulmasında kullanılmıştır. S-N eğrileri oluşturulurken yüzey gerilmeleri, numune uç kısmının eğilmeli yorulma testlerinde yapmış olduğu deplasman değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen gerilme grafiği, numune numarasına göre Şekil 5.53'de verilmiştir.



Şekil 5.53. Yorulma testleri, numune (geleneksel yöntem) gerilme değerleri

Şekil 5.53'den anlaşıldığı üzere numune yüzey gerilmeleri, numune girdi değerinin artışı ile artış eğilimindedir.

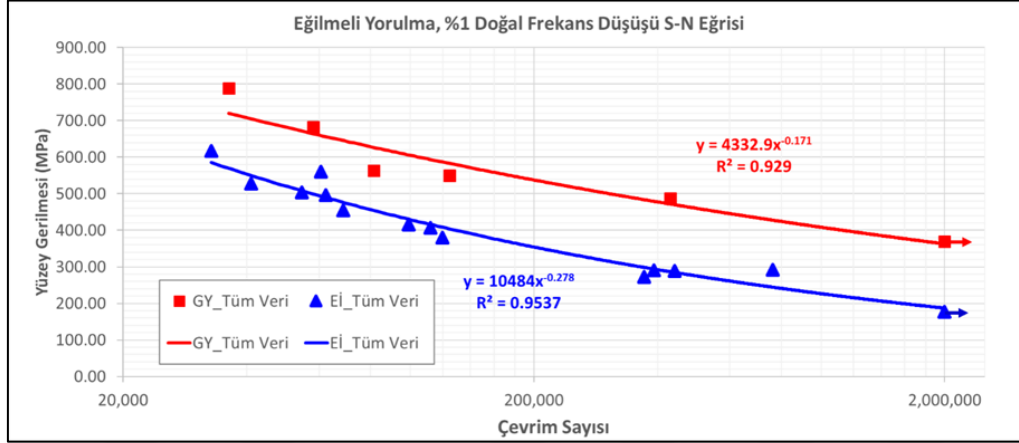
Her bir eklemeli imalat, eğilmeli yorulma numunesine ait hem %1 doğal frekans düşüşüne karşılık gelen çevrim sayıları hem de yüzey gerilmeleri belirlendikten sonra, S-N eğrisi oluşturulmuştur. Elde edilen S-N eğrisi Şekil 5.54'de verilmiştir.



Şekil 5.54. Yorulma, %1 frekans düşüşü, S-N eğrisi, geleneksel yöntem

Şekil 5.54'den anlaşıldığı üzere yüzey gerilmesi değeri azaldıkça, doğal frekans değerinin %1 düştüğü çevrim sayısı değeri artmaktadır. Ayrıca, çevrim gerilme değeri 380 MPa değerine yakın bir değerde iken 2×10^6 çevrim sayısında herhangi bir frekans düşüşü meydana gelmemiştir.

Elde edilen S-N eğrisi, eklemeli imalat numunelerinin sonuçları kullanılarak elde edilen S-N eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen karşılaştırma grafiği Şekil 5.55’de verilmiştir.

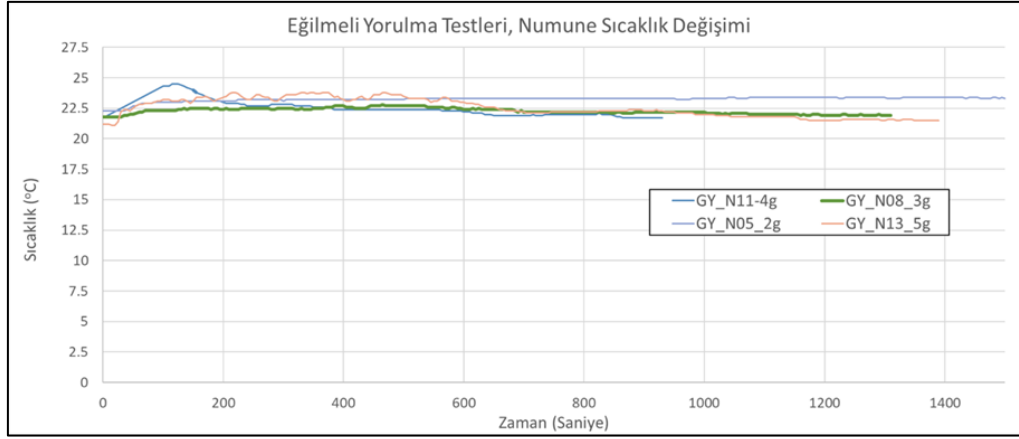


Şekil 5.55. Yorulma, %1 frekans düşüşü, S-N eğrisi karşılaştırma

Şekil 5.55’den anlaşılabileceği üzere, aynı gerilme değeri için eklemeli imalat numunesinin eğilmeli yorulma ömrü, geleneksel yöntem üretimi numuneninkine göre düşüktür. Ek olarak, frekans düşüşünün olmadığı 2×10^6 çevrim sayısında, geleneksel yöntem ile üretilmiş numuneler eklemeli imalat ile üretilmiş numunelere göre yaklaşık 2 kat daha fazla gerilmeye dayanabilmektedir.

Sıcaklık sonuçları

Geleneksel yöntem ile üretilmiş numunelerin eğilmeli yorulma testleri gerçekleştirilirken farklı ivme seviyelerinde sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 5.56’da verilmiştir.



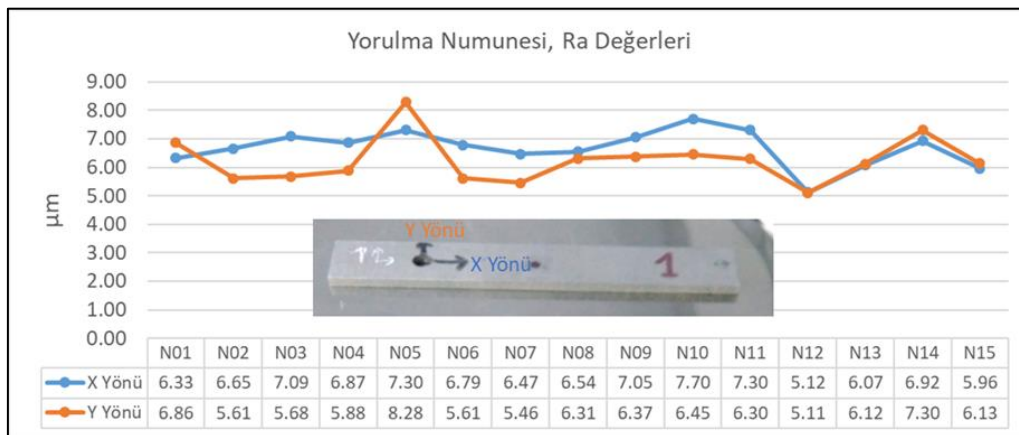
Şekil 5.56. Yorulma testleri sıcaklık değişimi, geleneksel yöntem

Şekil 5.56'dan anlaşılabacağı üzere, numunelerin delik dibindeki sıcaklıkları oda sıcaklığından en fazla 25 °C değerine yükselmektedir.

5.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

5.7.1. Eklemeli imalat üretimi, yorulma testleri numuneleri

Eğilmeli yorulma testleri öncesinde, eklemeli imalat üretimi, üretim halli numunelerin delik dibi yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlere ilişkin görsel Şekil 5.57'de verilmiştir.



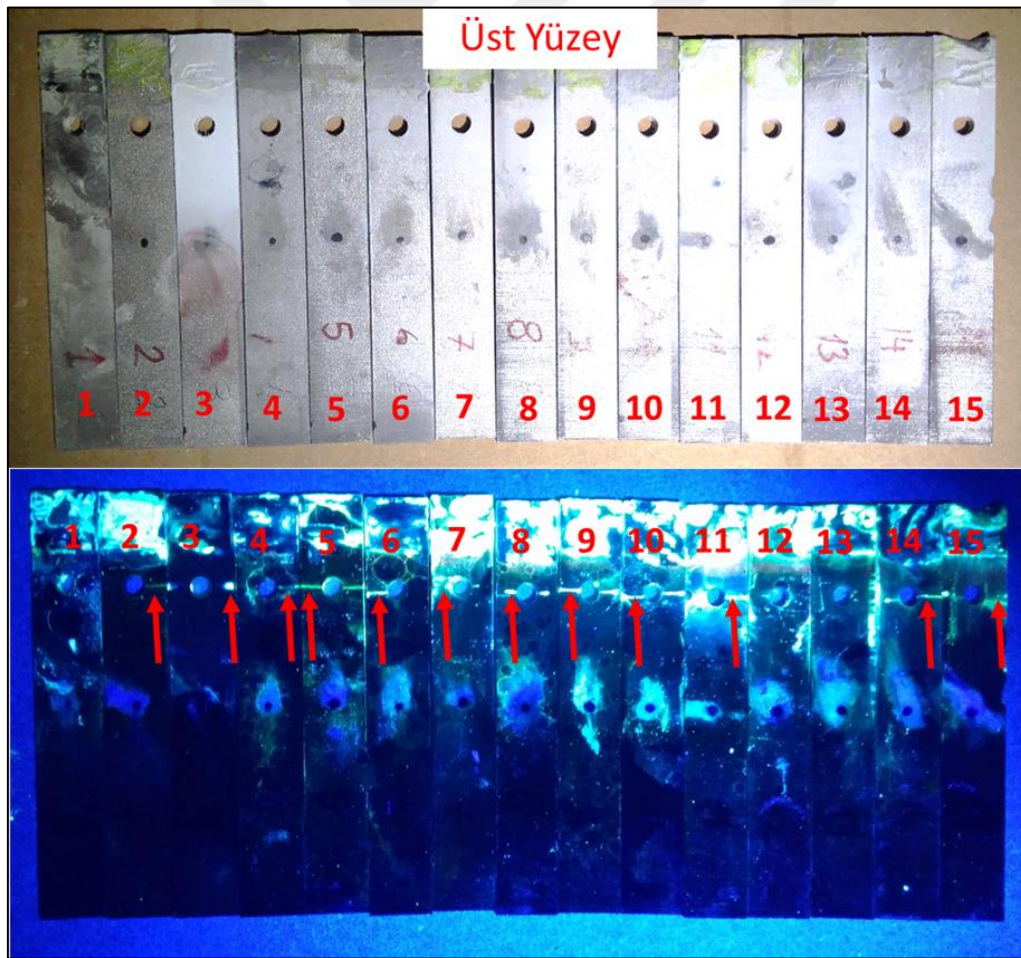
Şekil 5.57. Eklemeli imalat numunesi, R_a yüzey pürüzlülüğü değerleri

Şekil 5.57’de görüldüğü üzere R_a olarak verilen delik dibi yüzey pürüzlülük değerleri 5 ile 8 mikrometre arasında değişmektedir. Delik dibi yüzey pürüzlülük değerleri numuneye bağlı olarak çok fazla değişmemiştir.

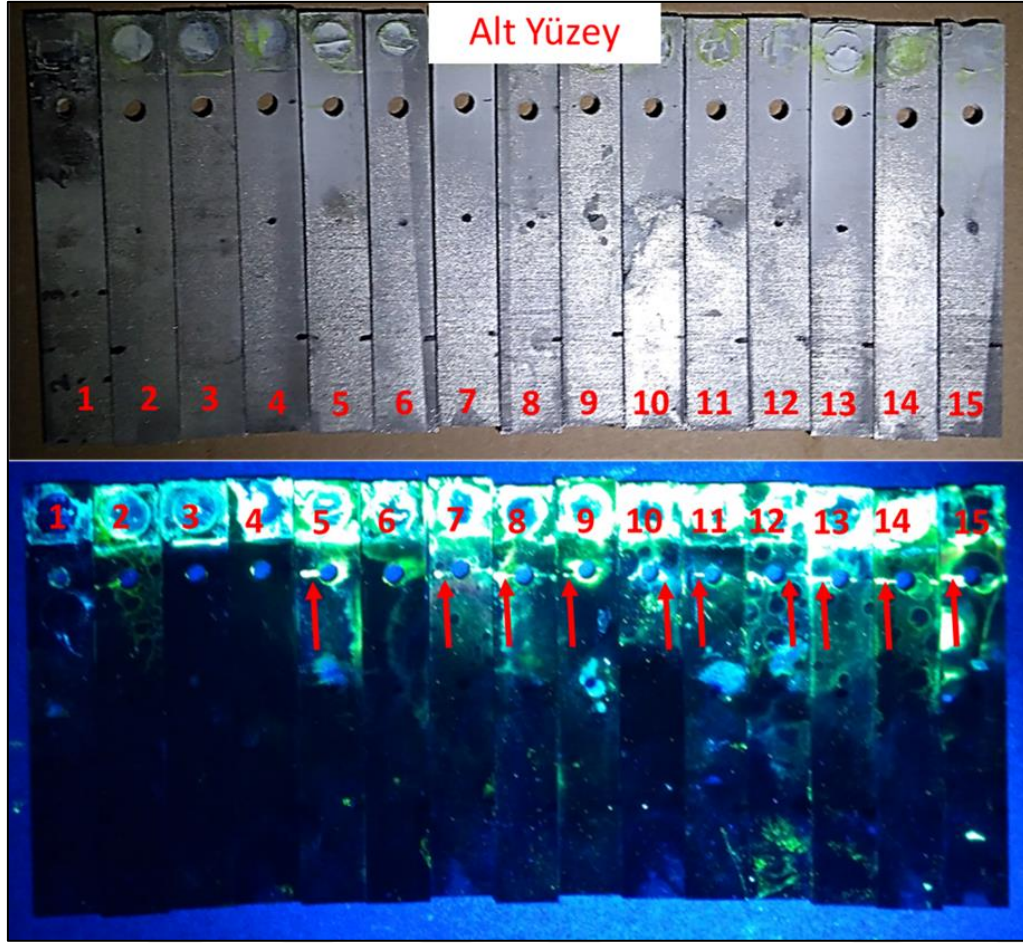
5.8. Sıvı Penetran Testleri

5.8.1. Eklemeli imalat üretimi, yorulma testleri numuneleri

Eklemeli imalat üretimi, eğilmeli yorulma testi numunelerine, yorulma testleri sonrasında sıvı penetran testleri uygulanmıştır. Flüoresan özellikli sıvı kullanılan testlerde, numuneler flüoresan ışık altında incelenmiştir. Gerçekleştirilen testlere ilişkin görseller alt ve üst yüzey olmak üzere sırasıyla Resim 5.7 ve Resim 5.8’de verilmiştir.



Resim 5.7. Eklemeli imalat numuneleri, sıvı penetran testi görüntüsü, üst yüzey

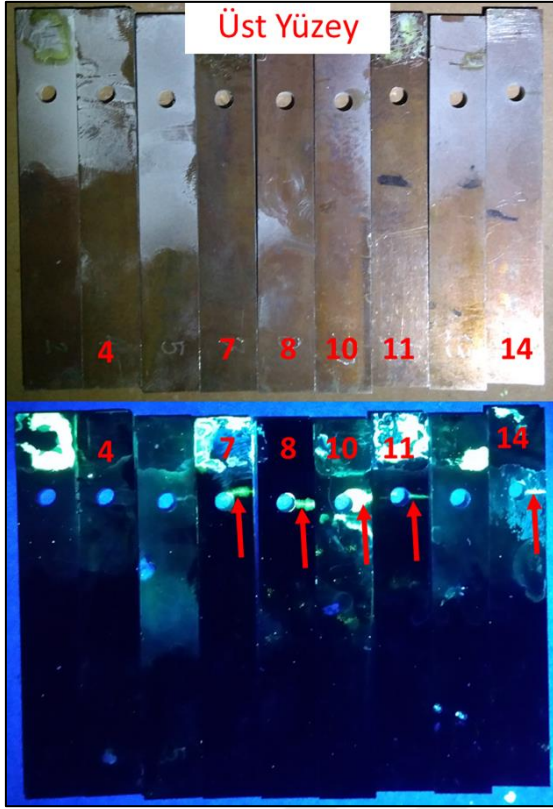


Resim 5.8. Eklemeli imalat numuneleri, sıvı penetran testi görüntüsü, alt yüzey

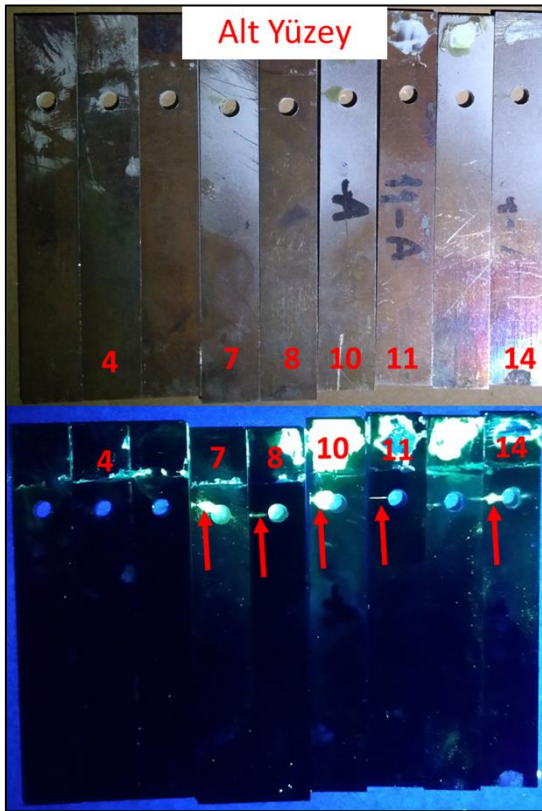
Resim 5.7 ve Resim 5.8’de görüldüğü üzere, eğilmeli yorulma testlerinde doğal frekans düşüşü gerçekleşmeyen 1 numaralı numune dışındaki tüm doğal frekans düşüşü yaşanan numunelerde çatlak gözlemlenmiştir. Gözlemlenen çatlakların tamamı delik dibi ve delik en kesitinde oluşmuştur. Ayrıca, bazı numunelerde sadece alt, bazı numunelerde sadece üst ve bazı numunelerde de hem alt hem de üst yüzeylerde çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Ek olarak, numunelerde eğilmeli yorulma testlerinde oluşan gerilme arttıkça, gözlemlenen çatlakların görünebilirliğinin artış eğiliminde olduğu anlaşılmıştır.

5.8.2. Geleneksel yöntem üretimi, yorulma testleri numuneleri

Geleneksel yöntem üretimi, eğilmeli yorulma testi numunelerine, yorulma testleri sonrasında sıvı penetran testleri uygulanmıştır. Flüoresan özellikli sıvı kullanılan testlerde, numuneler flüoresan ışık altında incelenmiştir. Gerçekleştirilen testlere ilişkin görseller alt ve üst yüzey olmak üzere sırasıyla Resim 5.9 ve Resim 5.10’da verilmiştir.



Resim 5.9. Geleneksel yöntem numuneleri, sıvı penetran testi görüntüsü, üst yüzey



Resim 5.10. Geleneksel yöntem numuneleri, sıvı penetran testi görüntüsü, alt yüzey

Resim 5.9 ve Resim 5.10’da görüldüğü üzere, eğilmeli yorulma testlerinde doğal frekans düşüşü gerçekleşmeyen 4 numaralı numune dışındaki tüm doğal frekans düşüşü yaşanan numunelerde (7, 8, 10, 11, 14) çatlak gözlemlenmiştir. Gözlemlenen çatlakların tamamı delik dibi ve delik en kesitinde oluşmuştur. Ayrıca, tüm numunelerde hem alt hem de üst yüzeylerde çatlak oluşumu gözlemlenmiştir.

5.9. Sertlik Testleri

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilip, farklı tipte ısıt işlemlerin uygulandığı çekme numunelerinin kalınlık boyunca sertlik testleri icra edilmiştir. Ayrıca, ısıt işlem uygulanmamış, üretim halli numunelerinde kalınlık boyunca sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, geleneksel yöntem ile üretilmiş olan koşul-A ve H900 ısıt işlemleri uygulanmış plakanın da sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sertlik değerleri Rockwell sertlik biriminde Çizelge 5.10’da literatür değerleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.10. Sertlik testi sonuçları

Numune	HRC	Literatür (HRC)
Plaka (CA+H900)	46-48	40-47
Üretim Halli-1	31-33	-
Üretim Halli-2	31-32	-
Üretim Halli-2	32-33	-
HT1-1 (Ç+H900)	49-51	40-47
HT1-2 (Ç+H900)	49-50	
HT1-3 (Ç+H900)	49-50	
HT2-1 (Ç+H1025)	46-47	35-42
HT2-2 (Ç+ H1025)	47-48	
HT2-3 (Ç+ H1025)	46-47	
HT3-1 (Ç+ H1150)	40-41	28-37
HT3-2 (Ç+ H1150)	40-41	
HT3-3 (Ç+ H1150)	40-41	

Çizelge 5.10’dan anlaşılacağı üzere, geleneksel yöntem ile üretilmiş plakanın sertlik değeri literatür değerleri ile tutarlı olarak elde edilmiştir. Ancak, ısıt işlem uygulanmış eklemeli imalat ile üretilmiş çekme numunelerinin sertlik değerleri literatür değerlerine göre daha yüksek elde edilmiştir. Tüm ısıt işlem tipleri uygulanmış numunelerde benzer bir davranış bulunmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, eklemeli imalat yöntemlerinden SLM yöntemi ile 17-4 PH paslanmaz çelik malzeme kullanılmış olup, literatürde SLM üretimi 17-4 PH numunelerin doğal frekans ve mod şekli gibi modal parametrelerinin ve eğilme yükü altında yorulma davranışının elde edilmesine yönelik çalışmaların eksik olduğu görülmüştür. Bu nedenle, tez çalışmasında, düşey yönde argon gazı altında üretilen numunelerin hem mekanik hem de eğilme yükü altında yorulma davranışları incelenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalarda, 12 adet SLM üretimi çekme numunesi, 15 adet SLM üretimi ve 6 adet geleneksel yöntem ile üretim olmak üzere toplam 21 adet eğilmeli yorulma numunesi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, farklı ısıtma işlemlerin (çözündürme ısıtma işlemi + H900/H1025/H1150) iç yapı, sertlik, akma dayanımı, nihai çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik parametrelere etkisini, çözündürme ve H900 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin, geleneksel yöntemle üretilip benzer ısıtma işlem uygulanmış numunelere göre eğilmeli yorulma davranışını elde etmek amaçlanmıştır.

Bu kapsamda önce, ASTM-E8M standardına (ASTM Standard E8/E8M-13a, 2013) göre KÖ çekme testi numuneleri üretilip, çözündürme ısıtma işlemi ortak olacak şekilde üç farklı yaşlandırma ısıtma işlemi (H900, H1025, H1150) uygulanmıştır.

Üretim halli ısı ve ısıtma işlem uygulanmış tüm çekme numunelerinin, doğal frekans ve mod şekillerini elde etmek amacıyla, modal test robotu kullanılarak, oda sıcaklığında, serbest-serbest sınır koşulunda, darbe tahrik tekniği kullanılarak modal testleri icra edilmiştir. Modal testlerden toplanan veriler işlenerek her bir numunenin 1. eğilme modları ve bu modlara ait mod şekilleri deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ısıtma işlem uygulanmış numunelerin 1. eğilme doğal frekans değerlerinin, üretim halli numunelerin 1. eğilme modu doğal frekans değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu duruma ısıtma işlem sonrası elastisite modülündeki artışın sebep olduğu düşünülmektedir. Literatürde de ısıtma işlem sonrası elastisite modülünün artış gösterdiğine dair sonuçlar bulunmaktadır. Ayrıca, üretim halli numunelerde daha belirgin olmakla birlikte, üretim halli ve ısıtma işlem görmüş numunelerden 2 numaralı numunelerin doğal frekans değerlerinin 1 ve 3 numaralı numunelere göre daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Üretim esnasında 2 numaralı numuneler,

üretim tablasının aynı bölgesinde üretilmiştir ve bu durumun da üretim tablasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Deneysel modal analizler tamamlandıktan sonra, SLM üretimi numunelerde üretim kaynaklı makro düzeyde süreksizlik (çatlak, boşluk vb.) olup olmadığını elde etmek amacıyla tahribatsız muayene tekniklerinden olan radyografik testler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen radyografik testlerde, numunelerde herhangi bir kusura rastlanmamıştır.

Radyografik muayene de tamamlandıktan sonra SLM üretimi çekme numunelerinin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda, ısıtma işlem sıcaklığı ve süresi arttıkça, nihai çekme dayanımı ve akma mukavemeti gibi mekanik özelliklerin azaldığı ve kopma uzamasının yani sünekliliğin arttığı görülmüştür. Bu davranışa, bakır çökeltilerinin ısıtma işlemine bağlı olarak kabalaşmasının ve martenzite göre daha yumuşak bir faz olan östenit fazının oluşmaya başlamasının sebep olduğu düşünülmektedir [42]. Elde edilen değerler literatür verileri ile karşılaştırıldığında ise literatür ile tutarlı verilerin elde edildiği anlaşılmıştır. Ancak, özellikle çözündürme ve H900 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin kopma uzamalarının literatür verilerine göre daha düşük seviyede kaldığı görülmüştür. Ayrıca, üretim halli numunelerin elastisite modülleri, ısıtma işlem görmüş numunelerin elastisite modüllerinden daha düşük olarak elde edilmiştir. Ek olarak, 2 numaralı numunelerin nihai çekme dayanımları ve akma mukavemetleri 1 ve 3 numaralı numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Çekme testi ve modal test sonuçları birlikte ele alındığından elde edilen sonuçların benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır.

SLM üretimi numunelerin çekme testleri tamamlandıktan sonra, çekme testi numunelerinin optik mikroskop görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür verileri ile karşılaştırıldığında, benzer iç yapıların elde edildiği görülmüştür. Çözündürme ısıtma işlemi ortak olmak üzere, H900 ve H1025 ısıtma işlemlerinden sonra iç yapının ağırlıklı olarak martenzit yapıda olduğu, H1150 ısıtma işleminden sonra ise östenit fazının oluşmaya başladığı, martenzit ve östenit fazlarının birlikte olduğu literatür verileri ile doğrulanmıştır. Bu sonuç, çekme testi sonuçlarını doğrular niteliktedir.

İç yapı incelemesinden sonra, çekme testi numunelerinin kalınlık boyunca rockwell metodu ile sertlik değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlere göre, ısıtma işlemlerin kalınlık boyunca uniform bir şekilde uygulandığı anlaşılmıştır. Ancak, elde edilen değerler geleneksel yöntemle üretilmiş numunelerin literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, daha

yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği anlaşılmıştır. Benzer sertlik davranışları literatürde bulunan çalışmalarda da görülmüştür.

Mekanik karakterizasyon aşaması tamamlandıktan sonra, eğilmeli yorulma testlerinde kullanılmak üzere, SLM ile KÖ çekme numunelerine benzer üretim yönü ve parametreleriyle eğilmeli yorulma testi numuneleri üretilmiştir. Eğilmeli yorulma testi numuneleri üretildikten sonra, ısıtma işlem öncesi modal test robotu kullanılarak serbest-serbest sınır koşulunda ve oda sıcaklığında deneysel modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tüm numunelere, çözündürme ve H900 ısıtma işlemleri uygulanmıştır.

Isıtma işlemleri tamamlanan eğilmeli yorulma numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerler literatür ile karşılaştırıldığında, Ra değerlerinin bir miktar yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun, üretim parametrelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Pürüzlülük ölçümlerinden sonra, mekanik karakterizasyon aşamasına benzer şekilde radyografik test ve ısıtma işlem sonrası darbe tahrik tekniği kullanılarak serbest-serbest sınır koşulunda modal testler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen radyografik testlerde makro düzeyde bir süreksizliğe rastlanılmamıştır.

Isıtma işlem sonrası gerçekleştirilen modal testlerden elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri ile ısıtma işlem öncesi doğal frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, çekme testi numuneleri modal test sonuçlarına benzer şekilde, ısıtma işlem ile doğal frekans değerlerinde artışın olduğu, mod şeklinde ise herhangi bir değişikliğin olmadığı görülmüştür. Ek olarak, geleneksel yöntem ile üretilmiş numunelerinde benzer koşullarda modal testleri icra edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri, SLM numuneleri ile benzerlik göstermiş olup, doğal frekans değerleri, SLM numunelerinden daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum, geleneksel yöntem ile üretilen numunelerin elastisite modüllerinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Modal testler sonrası hem SLM hem de geleneksel yöntem üretimi numunelerin elektro dinamik sarsıcı kullanılarak, eğilme yükü altında, konsol sınır koşulunda yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Eğilmeli yorulma testleri maksimum 2×10^6 çevrime sayısına kadar gerçekleştirilmiş olup, 2×10^6 çevrim sayısına kadar numune doğal frekansında herhangi

bir düşüş olmaması durumunda testler durdurulmuş ve 2×10^6 çevrim sayısı ve karşılık gelen gerilme değeri yorulma limiti olarak değerlendirilmiştir. Testlerden elde edilen veriler kullanılarak S-N eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan S-N eğrilerinde her bir numunenin doğal frekansında %1 düşüşün olduğu çevrim sayıları kullanılmıştır. Gerçekleştirilen eğilmeli yorulma testlerinden elde edilen S-N eğrileri incelendiğinde, beklendiği üzere numunelerin üzerinde oluşan yüzey gerilmesi azaldıkça yorulma ömrünün arttığı anlaşılmıştır. SLM ve geleneksel yöntem üretimi numunelerin S-N eğrileri karşılaştırıldığında ise geleneksel yöntem numunelerinin yorulma dayanımlarının daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu durumun, SLM üretimi numunelerin yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek olmasının kaynaklandığı düşünülmektedir. Ek olarak, SLM üretimi numunelerin sonuçları benzer parametrelerle üretilmiş literatürdeki SLM numuneleri eksenel yorulma sonuçları ile karşılaştırıldığında tutarlı sonuçların elde edildiği anlaşılmıştır.

Tamamlandıktan sonra frekans düşüşü gerçekleşen numunelerde, çatlak oluşup oluşmadığını, çatlak oluştu ise nerede oluştuğunu elde etmek amacıyla tüm numunelerin sıvı penetran testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda, doğal frekans düşüşü gerçekleşen tüm numunelerde çatlak oluştuğu ve oluşan çatlaklarında beklendiği gibi delik dibinde oluşup tüm kesite yayıldığı görülmüştür. Bu durumda, numunelerin delikli olarak üretilmesinin gerilme yoğunlaşmasını sağlıklı bir şekilde oluşturduğu ve bu sayede numune üzerinde çatlak başlangıç konumundaki olası saçılımın önüne geçildiği anlaşılmaktadır.

Gerçekleştirilen tüm statik ve dinamik karakterizasyon test çalışmalarının sonuçlarından faydalı bilgiler elde edilmiştir. Ancak, test sonuçlarından da anlaşıldığı üzere özellikle yorulma davranışına yüzey pürüzlülük değerinin ciddi etkileri bulunmaktadır. Bu sebeple, benzer geometri ve üretim parametrelerinde üretilmiş numunelerin yüzeyleri işlenerek testlerin tekrar edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, eklemeli imalat yönteminde, numunelerin üretim yönünün hem mekanik hem de yorulma özelliklerine etkisi bulunmaktadır. Bu yüzden, farklı üretim yönlerinde üretilmiş hem yüzeyi işlenmiş hem de üretim halli numuneler ile benzer çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda, ısıtma işlem tipinin mekanik özellikleri etkilediği görülmüştür. Benzer şekilde, ısıtma işlem tipinin yorulma özelliklerine üzerine etkisinin incelenmesi önerilmektedir. Son olarak, benzer üretim yöntemleri ile üretilmiş numunelerin eksenel

yorulma davranışının elde edilmesi, eksenel ve eğilmeli yorulma davranışı arasındaki korelasyonun sağlanması açısından faydalı olacaktır.





KAYNAKLAR

1. Gokuldoss, P. K., Kolla, S., and Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines. *Materials*, 10(6).
2. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., and Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224.
3. Greitemeier, D., Dalle Donne, C., Syassen, F., Eufinger, J., and Melz, T. (2016). Effect of surface roughness on fatigue performance of additive manufactured Ti–6Al–4V. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 32(7), 629–634.
4. American Society for Testing and Materials. (2003). Standard test methods for tension testing of metallic materials [metric]. (Standard No. E8 / E8M).
5. Fatemi, A., Molaei, R., Sharifimehr, S., Phan, N., and Shamsaei, N. (2017). Multiaxial fatigue behavior of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V including surface finish effect. *International Journal of Fatigue*, 100(1), 347–366.
6. Bagehorn, S., Wehr, J., and Maier, H. J. (2017). Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *International Journal of Fatigue*, 102, 135–142.
7. Sarkar, S., Kumar, C. S., and Nath, A. K. (2019a). Effects of different surface modifications on the fatigue life of selective laser melted 15–5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 762, 138109.
8. Sanaei, N., and Fatemi, A. (2020). Analysis of the effect of surface roughness on fatigue performance of powder bed fusion additive manufactured metals. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 108, 102638.
9. Liang, X. (2020). *High cycle fatigue behavior of additive manufactured stainless steel 316L: free surface effect and microstructural heterogeneity*. Doctorate's Thesis, University of Hesam, Paris.
10. Kahlin, M., Ansell, H., and Moverare, J. J. (2017). Fatigue behaviour of additive manufactured Ti6Al4V, with as-built surfaces, exposed to variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, 103, 353–362.
11. Balachandramurthi, A. R., Moverare, J., Dixit, N., and Pederson, R. (2018). Influence of defects and as-built surface roughness on fatigue properties of additively manufactured Alloy 718. *Materials Science and Engineering A*, 735, 463–474.

12. Masuo, H., Tanaka, Y., Morokoshi, S., Yagura, H., Uchida, T., Yamamoto, Y., and Murakami, Y. (2018). Influence of defects, surface roughness and HIP on the fatigue strength of Ti-6Al-4V manufactured by additive manufacturing. *International Journal of Fatigue*, 117, 163–179.
13. Pegues, J., Roach, M., Scott Williamson, R., and Shamsaei, N. (2018). Surface roughness effects on the fatigue strength of additively manufactured Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 116, 543–552.
14. Zhang, J., and Fatemi, A. (2019). Surface roughness effect on multiaxial fatigue behavior of additive manufactured metals and its modeling. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103, 102260.
15. Liu, Q. C., Elambasseril, J., Sun, S. J., Leary, M., Brandt, M., and Sharp, P. K. (2014). The effect of manufacturing defects on the fatigue behaviour of Ti-6Al-4V specimens fabricated using selective laser melting. *Advanced Materials Research*, 891–892, 1519–1524.
16. Hrabe, N., Gnäupel-Herold, T., and Quinn, T. (2017). Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress. *International Journal of Fatigue*, 94, 202–210.
17. Meneghetti, G., Rigon, D., and Gennari, C. (2019). An analysis of defects influence on axial fatigue strength of maraging steel specimens produced by additive manufacturing. *International Journal of Fatigue*, 118, 54–64.
18. Smith, T. R., Sugar, J. D., Schoenung, J. M., and San Marchi, C. (2019). Relationship between manufacturing defects and fatigue properties of additive manufactured austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 765, 138268.
19. Tang, M., and Pistorius, P. C. (2017). Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*, 94, 192–201.
20. Zhang, C., Zhu, H., Liao, H., Cheng, Y., Hu, Z., and Zeng, X. (2018). Effect of heat treatments on fatigue property of selective laser melting AlSi10Mg. *International Journal of Fatigue*, 116, 513–522.
21. Sarkar, S., Kumar, C. S., and Nath, A. K. (2019b). Effects of heat treatment and build orientations on the fatigue life of selective laser melted 15-5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 755, 235–245.
22. Meid, C., Dennstedt, A., Ramsperger, M., Pistor, J., Ruttart, B., Lopez-Galilea, I., Theisen, W., Körner, C., and Bartsch, M. (2019). Effect of heat treatment on the high temperature fatigue life of single crystalline nickel base superalloy additively manufactured by means of selective electron beam melting. *Scripta Materialia*, 168, 124–128.

23. Seki, E., Kajima, Y., Takaichi, A., Kittikundecha, N., Cho, H. H. W., Htat, H. L., Doi, H., Hanawa, T., and Wakabayashi, N. (2019). Effect of heat treatment on the microstructure and fatigue strength of CoCrMo alloys fabricated by selective laser melting. *Materials Letters*, 245, 53–56.
24. Blinn, B., Krebs, F., Ley, M., Teutsch, R., and Beck, T. (2020). Determination of the influence of a stress-relief heat treatment and additively manufactured surface on the fatigue behavior of selectively laser melted AISI 316L by using efficient short-time procedures. *International Journal of Fatigue*, 131, 105301.
25. Zhao, X., Li, S., Zhang, M., Liu, Y., Sercombe, T. B., Wang, S., Hao, Y., Yang, R., and Murr, L. E. (2016). Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Materials and Design*, 95, 21–31.
26. Todai, M., Nakano, T., Liu, T., Yasuda, H. Y., Hagihara, K., Cho, K., Ueda, M., and Takeyama, M. (2017). Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 13, 61–70.
27. Zhou, Q., Hayat, M. D., Chen, G., Cai, S., Qu, X., Tang, H., and Cao, P. (2019). Selective electron beam melting of NiTi: Microstructure, phase transformation and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 744, 290–298.
28. Yi, J. H., Kang, J. W., Wang, T. J., Wang, X., Hu, Y. Y., Feng, T., Feng, Y. L., and Wu, P. Y. (2019). Effect of laser energy density on the microstructure, mechanical properties, and deformation of Inconel 718 samples fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 786, 481–488.
29. Wen, S., Wang, C., Zhou, Y., Duan, L., Wei, Q., Yang, S., and Shi, Y. (2019). High-density tungsten fabricated by selective laser melting: Densification, microstructure, mechanical and thermal performance. *Optics and Laser Technology*, 116, 128–138.
30. Bai, Y., Wang, D., Yang, Y., and Wang, H. (2019). Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of maraging steel by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A*, 760, 105–117.
31. Zhang, S., Zhu, H., Zhang, L., Zhang, W., Yang, H., and Zeng, X. (2019). Microstructure and properties in QCr0.8 alloy produced by selective laser melting with different heat treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 800, 286–293.
32. Zhang, G., Xiong, H., Yu, H., Qin, R., Liu, W., and Yuan, H. (2020). Microstructure evolution and mechanical properties of wire-feed electron beam additive manufactured Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy with different subtransus heat treatments. *Materials and Design*, 195(8), 109063.
33. George, T. J., Seidt, J., Herman Shen, M. H., Nicholas, T., and Cross, C. J. (2004). Development of a novel vibration-based fatigue testing methodology. *International Journal of Fatigue*, 26(5), 477–486.

34. Tafti, M. A. (2013). *Experimental High Cycle Fatigue Testing and Shape Optimization of Turbine Blades*. Master's Thesis, University of Toronto, Canada.
35. Nicoletto, G. (2017). Anisotropic high cycle fatigue behavior of Ti–6Al–4V obtained by powder bed laser fusion. *International Journal of Fatigue*, 94, 255–262.
36. Nicoletto, G., Konečná, R., Frkáň, M., and Riva, E. (2018). Surface roughness and directional fatigue behavior of as-built EBM and DMLS Ti6Al4V. *International Journal of Fatigue*, 116, 140–148.
37. Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Elwany, A., and Bian, L. (2015, November 13-19). *Mechanical and microstructural properties of selective laser melted 17-4 PH stainless steel*. Paper presented at the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Houston, Texas.
38. Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Elwany, A., and Bian, L. (2017). Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 94, 218–235.
39. Mahmoudi, M., Elwany, A., Yadollahi, A., Thompson, S. M., Bian, L., and Shamsaei, N. (2017). Mechanical properties and microstructural characterization of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 280–294.
40. Hu, Z., Zhu, H., Zhang, H., and Zeng, X. (2017). Experimental investigation on selective laser melting of 17-4 PH stainless steel. *Optics and Laser Technology*, 87, 17–25.
41. Carneiro, L., Jalalahmadi, B., Ashtekar, A., and Jiang, Y. (2019). Cyclic deformation and fatigue behavior of additively manufactured 17–4 PH stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 123, 22–30.
42. Nezhadfar, P. D., Shrestha, R., Phan, N., and Shamsaei, N. (2019). Fatigue behavior of additively manufactured 17-4 PH stainless steel: Synergistic effects of surface roughness and heat treatment. *International Journal of Fatigue*, 124, 188–204.
43. Romano, S., Nezhadfar, P. D., Shamsaei, N., Seifi, M., and Beretta, S. (2020). High cycle fatigue behavior and life prediction for additively manufactured 17-4 PH stainless steel: Effect of sub-surface porosity and surface roughness. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 106, 102477.
44. Sanaei, N., and Fatemi, A. (2020). Defects in Additive Manufactured Metals and Their Effect on Fatigue Performance: A State-of-the-Art Review, *Progress in Materials Science*, 117, 100724.
45. Begum, S., Karim, A., Ansari, M., and Hashmi, M. (2020). *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier, 515-539.
46. Outokumpu. (2013). *Handbook of stainless steel*. Finland: Outokumpu Oyj, 5-46.
47. Murathan, O. F. and Abul, M. R. *Heat Treatment and Surface Hardening of Materials*. Atılım University Term Project, Ankara.

48. Gören, Ş. (2018). *The effects of heat treatment on microstructure, hardness and fatigue behavior of (AMS5659) 15-5 precipitation hardenable stainless steel*. Master's Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
49. Departments and Agencies of the Department of Defense (1989). Military Specification Heat Treatment of Steel. (Standard No. MIL-H-6875H).
50. Society of Automobile Engineers International. (2018). Aerospace material specification. (Standard No. AMS5604J).
51. Moore, O. P. (2012). *Nondestructive testing handbook overview* (Third edition). USA: American Society for Nondestructive Testing, 75-198.
52. Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: theory, practice and application*. (Second Edition). England: Research Studies Press, 1-14.
53. Avitabile, P. (2012). Modal space. *Experimental Techniques*, 36(2), 1–2.
54. Brooke, M. H. and Miller, R. (1990). Fatigue testing, *Muscle Nerve*, 13(1), 35–37.
55. Zakaria, K. A., Abdullah, S. and Ghazali, M. J. (2016). A review of the loading sequence effects on the fatigue life behaviour of metallic materials, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 9(5), 189–200.
56. Irvine, T. (2013). *An Introduction to Shock and Vibration Response Spectra*. (First Edition). USA: Endaq, 1-42.





GAZİ GELECEKTİR..