

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MAZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AA2024, AA6061, AA7075 AL ALAŞIMLARINA UYGULANAN SIĞ-
KRIYOJENİK VE YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMLERİNİN
MİKROYAPI, SERTLİK VE DOĞAL FREKANS ÖZELLİKLERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RİDVAN ARSLAN

DENİZLİ, HAZİRAN- 2023

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**AA2024, AA6061, AA7075 AL ALAŞIMLARINA UYGULANAN SIĞ-
KRIYOJENİK VE YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMLERİNİN
MİKROYAPI, SERTLİK VE DOĞAL FREKANS ÖZELLİKLERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RİDVAN ARSLAN

DENİZLİ, HAZİRAN- 2023

**Bu tez çalışması PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL
ARAŞTIRMA PROJELERİ tarafından 2021FEBE057 nolu proje ile
desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

RIDVAN ARSLAN

ÖZET

AA2024, AA6061, AA7075 AL ALAŞIMLARINA UYGULANAN SIĞ-KRİYOJENİK VE YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMLERİNİN MİKROYAPI, SERTLİK VE DOĞAL FREKANS ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RİDVAN ARSLAN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DOÇ.DR. SINAN AKSÖZ)

(EŞ DANIŞMAN:DOÇ.DR.GÖKMEN ATLIHAN)

DENİZLİ, HAZİRAN- 2023

Alüminyum (Al) ve alaşımları sahip oldukları düşük özgül ağırlık, korozyon direnci ve dayanım özellikleri açısından birçok sanayi alanında yaygın kullanım alanına sahip malzemelerdir. Sahip olduğu özellikler sayesinde sanayi alanında geçmişte kullanılan malzemelerin yerini günümüzde Al ve alaşımları almaya başlamıştır. Tasarımların hafifletilmesi ve dayanım özelliklerinin korunması sanayi alanında ilgi çekici olsa da tasarımlardaki kütleli hafifletilmesi sıcak, soğuk ve basınç vb. farklı çevre koşullarında malzemelerin dış etkiler altında uyarılması sonucu oluşan doğal frekans değerini tetiklemektedir. Malzemelerin çalışma alanına göre dış uyaranlarca sürekli olarak farklı frekanslara maruz kaldığı, maruz kalınan farklı frekanslar ile malzemelerin doğal frekans değerinin çakışması sonucu oluşan rezonans etkisinin malzemeye zarar verebildiği bilinmektedir. Bu çalışmada AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlı 2 mm kalınlığa sahip levhalardan 0° ile 1° aralığında 0,1° artış oranı ile farklı kesit alanına sahip numuneler su jeti yöntemi ile kesilerek üretilmiştir. Üretilen farklı kesit alanına sahip test numunelerine iki farklı koşulda ısıtma işlemi uygulanmış. Çalışmada uygulanan 1. ısıtma işlemi süreci; 510°C’de 2 saat çözündürme + su verme + 160°C’de yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmıştır. Uygulanan 2. Isıtma işlemi sürecinde ise; 510°C’de 2 saat çözündürme + su verme + $\approx -75^{\circ}\text{C}$ ’de 168 saat sıg-kriyojenik soğutma + 160°C’de yaşlandırma ısıtma işlemi aşamaları gerçekleştirilerek test numuneleri elde edilmiştir. Uygulanan her işlem basamağı sonunda Al alaşımlarının sertlik özellikleri ve doğal frekans değeri analiz edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda Al alaşımlarına uygulanan ısıtma ve soğutma süreçlerini barındıran iki ısıtma işlemi süreci ve farklı kesit alanına sahip numunelerin doğal frekans değerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada karakterizasyon amaçlı numunelere ısıtma işlemi sonrası ve öncesinde Optik Mikroskop, FESEM, EDS ve XRD analizleri uygulanmıştır. Çalışma sayesinde havacılık sektörü başta olmak üzere, birçok mühendislik sektöründe yer alan Al ve alaşımlarının sertlik özelliklerinin iyileştirilmesi ve doğal frekans özellikleri ile birlikte irdelenerek, Al alaşımlarının soğuk, sıcak ortamlarda ve oda sıcaklıklarında doğal frekans değerine etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER:

Yaşlandırılabilir Al Alaşımları, Sıg-kriyojenik Soğutma, Doğal Frekans

ABSTRACT

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SHALLOW-CRYOGENIC AND AGING
HEAT TREATMENTS ON MICROSTRUCTURE, HARDNESS AND NATURAL
FREQUENCY PROPERTIES APPLIED TO AA2024, AA6061, AA7075 AL ALLOYS.**

MSC THESIS

RIDVAN ARSLAN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSOC. DR. SINAN AKSOZ)

(CO-SUPERVISOR:ASSOC. DR. GOKMEN ATLIHAN)

DENİZLİ, JUNE 2023

Aluminum (Al) and its alloys are materials that are widely used in many industrial areas in terms of their low specific gravity, corrosion resistance and strength properties. Thanks to its properties, Al and its alloys have begun to replace the materials used in the past in the industry. Although the lightening of the designs and the preservation of their strength properties are interesting in the field of industry, the mass lightening of the designs can be caused by heat, cold and pressure etc. It triggers the natural frequency value that occurs as a result of excitation of materials under different environmental conditions. It is known that materials are constantly exposed to different frequencies by external stimuli according to the working area, and the resonance effect that occurs as a result of the coincidence of the different frequencies exposed and the natural frequency value of the materials can damage the material. This study produced AA2024, AA6061 and AA7075 Al alloy plates with 2 mm thickness by cutting samples with different cross-sectional areas between 0° and 1° with a 0.1° increase rate. The heat treatment process was applied to the test samples with different cross-sectional areas produced under two different conditions. The first heat treatment process applied in the study; Thawing at 510°C for 2 hours + quenching + aging at 160°C was applied. In the second heat treatment process applied; Test samples were obtained by thawing at 510°C for 2 hours + quenching + 168 hours shallow-cryogenic cooling at $\approx -75^{\circ}\text{C}$ + aging heat treatment at 160°C. At the end of each applied step, the hardness properties and natural frequency values of Al alloys were analyzed. In line with the data obtained, two heat treatment processes, which include heating and cooling processes applied to Al alloys, and the effects of samples with different cross-sectional areas on the natural frequency value were investigated. The study applied Optical Microscope, FESEM, EDS and XRD analyses to the samples for characterization after and before the heat treatment. Thanks to the study, the effects of Al alloys on the natural frequency value in cold, hot environments and room temperatures were examined in detail by examining the improvement of the hardness properties of Al and its alloys in many engineering sectors, especially in the aviation sector, and their natural frequency properties.

KEYWORDS:

Aging Applicable Al Alloys, Shallow Cryogenic Cooling, Natural Frequency

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLO LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER TABLOSU.....	x
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. Al ve Al Alaşımları	4
2.1. 1XXX Serisi Saf Al.....	8
2.2 2XXX Serisi Al-Cu Alaşımı	8
2.3 3XXX Serisi Al -Mg Alaşımı	8
2.4 4XXX Serisi Al-Si Alaşımı.....	8
2.5 5XXX Serisi Al-Mg Alaşımı	9
2.6 6XXX Seri Al-Si-Mg Alaşımı	9
2.7 7XXX Seri Al-Zn Alaşımı	9
2.8 8XXX Seri Al-Li Alaşımı	10
2.9 Al ve Alaşımlarının Kullanım Alanları	10
2.10 Alaşım Elementlerinin Al'ye Etkileri	11
2.10.1 Cu Elementi.....	11
2.10.2 Mangan (Mn)	12
2.10.3 Silisyum (Si)	12
2.10.4 Magnezyum (Mg)	13
2.10.5 Çinko (Zn).....	14
2.10.6 Krom (Cr).....	15
2.10.7 Demir (Fe).....	15
2.10.8 Titanyum (Ti).....	15
2.10.9 Nikel (Ni)	15
2.11 Dövme ve Döküm Al Alaşımları.....	16
2.12 Al Alaşımlarında Isıl İşlem Özellikleri	18
2.13 Isıl İşlem Aşamaları	19
2.13.1 Kriyojenik soğutma İşlemi	23
2.13.1.1 Kriyojenik işlemin Etkileri	25
3. Doğal Titreşim Frekansı	27
3.1 Al ve Alaşımlarında Doğal Frekans İncelenmesi	29
3.2 Kirişlerin Analitik Titreşim Analizleri	30
4. MATERYAL METOT	34
4.1 Malzeme Seçimi	35
4.2 Numune Hazırlama	35
4.3 Isıl İşlem Aşaması	41
4.3.1 Sertlik Analizi	46
4.3.2 Metalografik Analiz	47

4.3.3	Doğal Frekans Analizi	49
5.	Bulgular	53
5.1.1	Sertlik Analizi	53
5.2	Doğal Titreşim Analizi	59
5.3	Karakterizasyon Analizleri	81
5.3.1	Optik Mikroskop-FESEM-EDS-XRD İncelemeleri	81
6.	Sonuç ve Öneriler	89
7.	KAYNAKÇA.....	91



Şekiller Tablosu

Sayfa

Şekil 2.1: Al eldesinde Bayern ve Hall- Heroult prosesleri.....	5
Şekil 2.2: Al ve alaşımlarının kullanım alanları şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.3: Al-Cu faz diyagramı, a) Al-Cu alaşımının genel faz diyagramı, b) Al-Cu faz diyagramı orta bölüm ayrıntılı gösterimi.....	12
Şekil 2.4: Al-Si İkili Faz Diyagramı.....	13
Şekil 2.5: Al-Zn İkili Faz Diyagramı.....	14
Şekil 2.6: Alaşım Elementlerinin Al Üzerinde Etkileri.....	16
Şekil 2.7: Al alaşımları ısıtıl işlem uygulanabilirlik özellikleri, a) Dövme Al alaşımlarında ısıtıl işlem uygulanabilirlik özellikleri, b) Dökme Al alaşımlarında ısıtıl işlem uygulanabilirlik özellikleri.....	19
Şekil 2.8: Isıl işlem aşamaları ve mikro yapı özellikleri.....	21
Şekil 2.9: Aşırı yaşlanmanın sertlik özelliklerine etkisi şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.10: Çökelti sertleşmesinde faz oluşum aşamaları.....	23
Şekil 2.11: Kuru buz (sıg- kriyojenik) ve sıvı azot (dip kriyojenik)	24
Şekil 1.12: Kriyojenik soğutma sonrası kazanılan özellikler.....	26
Şekil 3.1: Sönümsüz bir sistemin serbest titreşiminin yer değişimi-zaman eğrisini şematik gösterimi.....	27
Şekil 3.2: Kirişin eğilme durumunda oluşan moment.....	31
Şekil 3.3: Değişken kesitli kiriş.....	32
Şekil 4.1: Çalışma aşamaları grafiksel gösterimi.....	34
Şekil 4.2: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al levhalar.....	36
Şekil 4.3: Su jeti makine ve kesim temsili görüntüsü.....	37
Şekil 4.4: Dar kenar test numune serisi, a) Numune şematik gösterimi, b) Numune boyut bilgisi.....	38
Şekil 4.5: Geniş kenar numune serisi, a) Numune şematik gösterimi, b) Numune boyut bilgisi.....	40
Şekil 4.6: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarının su jeti ile kesim sonrası kesim açısı ve kesim yönü görüntüleri.....	41
Şekil 4.7: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarına uygulanan ısıtıl işlem basamakları, a) Çözündürme sonrası yaşlandırma işlemi, b) Çözündürme sonrası sıg kriyojenik soğutma ve yaşlandırma ısıtıl işlem basamakları.....	42
Şekil 4.8: Isıl işlem uygulama aşamaları.....	44
Şekil 4.9: Sıg kriyojenik soğutma işlemi uygulama aşaması.....	45
Şekil 4.10: Vickers sertlik analiz cihaz görüntüsü.	46
Şekil 4.11: Numune hazırlama ekipmanları, a) Otomatik zımpara parlatma makinesi, b) Dağlama işleminde kullanılan çeker ocak.....	47
Şekil 4.12: Yüzey analiz işlemlerinde kullanılan cihazlar, a) 50X – 1000X büyütme oranına sahip optik mikroskop cihaz görüntüsü, b) Ayrıntılı yüzey analizi işleminde kullanılan FESEM analiz cihazı.....	48
Şekil 4.13: XRD analiz cihazı.....	49
Şekil 4.14: Doğal titreşim frekansı test düzeneği ve birleşenleri.....	50
Şekil 4.15: Doğal titreşim frekansı test düzeneği ve birleşenleri.....	52
Şekil 4.16: Seri test numunesinin ankastre test düzeneğine bağlanma konumu.....	52

Şekiller Tablosu

Sayfa

Şekil 5.1: Al alaşımlarına uygulanan ısıtma işlem sonrası sertlik değerleri, a) AA2024 Al alaşımına ait sertlik değerleri, b) AA6061 Alaşımına ait sertlik değeri, c) AA7075 Al alaşımına ait sertlik değeri.	54
Şekil 5.2: Çözündürme, sıg kriyojenik ve yaşlandırma işlemi uygulanmış Al alaşım serilerine ait sertlik değerleri, a) AA2024 Al alaşım serisi sertlik değerleri, b) AA6061 Al alaşım serisi sertlik değeri, c) AA7075 Al alaşım serisi sertlik değeri.....	58
Şekil 5.3: AA2024 Al alaşım serisine ait deneysel ve analitik doğal frekans değerleri, a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.....	61
Şekil 5.4: AA6061 Al alaşım serisine ait deneysel ve analitik doğal frekans değerleri a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.....	65
Şekil 5.5: AA7075 Al alaşım serisine ait deneysel ve analitik doğal frekans değerleri a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.....	69
Şekil 5.6: AA2024 Al alaşım serisine ait sıg kriyojenik soğutma ve ısıtma işlem sonrası deneysel ve analitik doğal frekans değerleri, a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.....	72
Şekil 5.7: AA6061 Al alaşım serisine ait sıg kriyojenik soğutma ve ısıtma işlem sonrası deneysel ve analitik doğal frekans değerleri, a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.....	76
Şekil 5.8: AA7075 Al alaşım serisine ait sıg kriyojenik soğutma ve ısıtma işlem sonrası deneysel ve analitik doğal frekans değerleri, a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.....	80
Şekil 5.9: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait ham numune ve çözündürme ve yaşlandırma ısıtma işlemi sonrası en yüksek sertlik değerinin elde edildiği numunelere ait optik mikroskop görüntüleri.....	81
Şekil 5.10: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait ham numune ve çözündürme sonrası yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelere ait FESEM görüntüleri	83
Şekil 5.11: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait sıg kriyojenik soğutma sonrası İşlemsiz ham numune ve yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmış numunelere ait FESEM görüntüsü.....	85
Şekil 5.12: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait FESEM ve FESEM görüntüsü üzerinden alınmış EDS analiz verileri.....	87
Şekil 5.13: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine uygulanan ısıtma işlem sonrası XRD analiz verileri.....	88

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Saf Al 'un fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	6
Tablo 2.2: Saf Al ve alaşımlı Al'nin mekanik özellikleri.....	7
Tablo 2.3: Al ve alaşımlarının sınıflandırılması.....	7
Tablo 2.4: İmal yöntemine göre Al'nin mekanik özellikleri.....	17
Tablo 2.5: Uygulanan ısıt işlemler basamakları ve sembolik gösterimleri.....	20
Tablo 3.1: Elementlerin Yoğunluk, Erime ve Kaynama Noktaları.....	29
Tablo 4.1: Çalışmada kullanılan Al alaşımlarının fabrikasyon ısıt işlemler türleri.....	35
Tablo 4.2: AA2024 Al alaşım serisi için Ankastre düzeneğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve deneysel doğal titreşim frekans değerleri.....	60
Tablo 4.3: AA2024 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar uzun kenar, serbest kenar kısa bağlanan numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	61
Tablo 4.4: AA6061 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	63
Tablo 4.5: AA6061 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar uzun kenar, serbest kenar kısa kenar bağlanan numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	64
Tablo 4.6: AA7075 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	67
Tablo 4.5: AA7075 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar uzun kenar, serbest kenar kısa kenar bağlanan numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	68
Tablo 4.6: AA2024 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	71
Tablo 4.7: AA2024 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar uzun kenar, serbest kenar kısa bağlanan numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	71
Tablo 4.8: AA6061 Al alaşım serisi için Ankastre düzeneğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	74
Tablo 4.9: AA6061 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar uzun, serbest kenar kısa numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	75
Tablo 4.10: AA7075 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	78
Tablo 4.11: AA7075 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar uzun, serbest kenar kısa numune serilerine uygulanan işlemler başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.....	79

SEMBOL LİSTESİ

Al: Alüminyum

Cu: Bakır

Mn: Mangan

Si: Silisyum

Zn: Çinko

Cr: Krom

Fe: Demir

Mg: Magnezyum

Ni: Nikel

Ti: Titanyum

T_n: Titreşim periyodu.

ω: Omega

σ: Sigma

Hz: Herz

XRD: X- Isını Difraktometresi

FESEM: Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu

EDS: Enerji Dağılımlı Spektroskopi

OM: Optik Mikroskop

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarında kullanılan malzeme ve ekipman alımı için destek veren Pamukkale Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar Projeler Koordinatörlüğü birimine teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamda planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın Doç. Dr. Sinan AKSÖZ ve Doç. Dr. Gökmen ATLIHAN hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının deneysel süreçlerinde yardım ve desteğini esirgemeyen sayın Ahmet Semih KIŞLA, Hasan DURAN ve Nurcihan KISAOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Bu süreçte tüm şirket imkânlarından yararlanma fırsatı bulduğum, AKSÖZ ARGE MÜHENDİSLİK SANAYİ ve TİCARET LİMİTED ŞİRKETİ'NE teşekkür ederim. Ayrıca numune hazırlama sürecinde bize imkanlarını açan Majet Su Jeti Kesme San. ve Tic.Ltd.Şti. ve şirket yöneticisi Mehmet KARAMAN'a katkıları için teşekkürlerimizi iletmekteyiz.

Son olarak, her türlü maddi ve manevi desteği sonuna kadar sağlayan, desteğini her zaman hissettiğim sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinin gelişimi ile birçok sanayi alanı, tasarım ve üretim hizmetlerinde gelenekselliğin dışına çıkmak ve gelişen teknolojinin bir gerekliliği olarak güncel çalışmalarını tüketici talep ve ihtiyaçlarına uygun tasarlamaktadır (Güven ve diğ. 2012). Bu anlamda başta havacılık ve uzay sanayi, ulaşım sanayi, savunma sanayi ve inşaat sanayi olmak üzere birçok sanayi alanı günümüz ihtiyaçlarına uygun tasarım ve ürün geliştirmek üzerine çalışmalarını gerçekleştirmektedir (Aksöz ve diğ. 2020).

Ticari kullanıma uygun malzeme çalışmalarında ve tasarımlarda öncelik olarak hafiflik, dayanım, maliyet ve maruz kalınan doğal etkilere karşı yüksek dayanım özellikleri ön planda tutulmaktadır. Tasarımlarda yer bulan malzeme tercihlerinde dayanım, maliyet gibi özellikler yanı sıra görselliğe hitap edebilecek alanlarda dış dizayn özelliklerinde malzeme tercihinde önemli bir etkidir. Bu neden ile işleme ve şekillendirme özelliklerini karşılayan malzeme gruplarında malzeme tercihinde etken olduğu bilinmektedir (Huda ve diğ. 2004).

Sanayi ve teknoloji alanındaki gelişmeler malzeme alanında da değişime ve yenilenme ihtiyacına yol açmış ve malzeme alanında yeni arayışlara olanak sağlamıştır. Gelişen ve gelişmekte olan malzeme çeşitleri incelendiğinde bu alanda etkin malzeme olarak hafif metaller arasında yer alan Alüminyum (Al) ve alaşımlarının kullanımlarının yaygın olduğu görülmektedir (Nie ve diğ. 2004).

Üretici ve tüketici ihtiyaçları ön planda tutularak malzeme bilimi ve mühendisliği alanında yeni malzeme arayışı, uygun maliyetli üretim yöntemleri ve mevcut malzemelerin özelliklerini geliştirme üzerine çalışmalar aralıksız devam etmektedir (Aydın ve diğ. 2012).

Malzeme alanında 1930'dan günümüze sanayi alanında hafif metaller sınıfında yer alan Al (Al) ve alaşımlarının geniş yer edindiği bilinmektedir (Al-Shammari ve diğ. 2020). Al alaşımları geleneksel çelik ve dökme demirden sonra en çok kullanım alanı bulan malzeme türüdür (Yalçın 2017). Yüksek dayanım ve tokluk özelliklerine sahip Al alaşımları düşük yoğunluk ($2,7 \text{ g/cm}^3$), dış etkilere karşı yüksek dayanım direnci ve kolay işleme özellikleri nedeniyle birçok sanayi alanında gerek ana malzeme gerek ise destek malzemesi olarak tercih edilmektedir (Jiang ve diğ. 2022).

Al ve alaşımları döküm, hadde ve ekstrüzyon yöntemleri ile üretilmektedir. Al alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilebilirliğine göre ısıtım işlem uygulanabilen ve uygulanamayan olarak ikiye ayrılmaktadır. Isıtım işlem uygulanabilen Al alaşımları mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için belirli alaşıım elementlerini içermesi gerekmektedir. Bu alaşıım elementleri Cu, Zn, Mg ve Si elementleridir. Uygun ısıtım işlem koşullarında alaşıım elementlerin Al içerisinde çözünmesi ile malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde katkı sağlamaktadır (Hussein ve diğ. 2020).

Sanayi ürünlerinin hafiflemesi ve kütleli olarak küçülmesi ile malzemenin doğal dış etkilere karşı göstermiş olduğu direnç önem kazanmaktadır (Wang ve diğ 2021). Başlıca doğal etkiler incelendiğinde maruz kalınan dış etkiler arasında malzemenin korozyon direnci ve malzemenin doğal frekans değeri gösterilebilmektedir (Atlihan ve diğ. 2019). Korozyon direnci malzemenin farklı elementler ile alaşımlanabilirliği, malzemenin karakteristik özelliklerinin değıştirilmesi ve çeşitli yüzey kaplama işlemleri ile ilgili yapılan çalışmalarca Al alaşımlarının korozyona karşı direnç kazandırıldığı gözlenmektedir (Czerwinski 2020).

Malzemelerin kullanım alanına göre farklı kimyasal uyarılara maruz kalabilen malzemelerde korozyon özellikleri yanı sıra ortam koşullarında malzemelerin sürekli olarak dış etkilerce fiziksel olarak farklı frekans genliklerinde uyarılması önem arz etmektedir. Bu etkilere kütleli değışim ile doğrudan etkiye sahip malzemenin doğal frekans değeri yer almaktadır (Tezel ve diğ. 2019). Geçmiş dönemlerde büyük kütleli sahip tasarımlarda dış etkilerce maruz kalınan doğal titreşim etkilerinin, sistem üzerindeki etkileri önemsiz kabul edilirken günümüz ihtiyaçlarına uygun tasarımlarda ise kütleli değışimler malzemenin maruz kaldığı doğal titreşim etkilerine karşı göstermiş olduğu etkiyi önemli hale getirmektedir (Tezel ve diğ. 2019). Al alaşımlarının kullanım alanlarına bakıldığında insan hayatını etkileyebilecek havacılık- uzay ve ulaşıım sanayi veya maliyet olarak oldukça büyük yatırım gerektiren savunma sanayi, makine imalat sanayi ve gemi imalat sanayi gibi kritik noktaların olduğu görölmektedir (Ugurlu ve Buldum 2017).

Kritik kullanım alanlarına sahip Al alaşımları bu alanda tasarımların kütleli olarak hafifletilmesinde düşük yoğunluk özelliklerinden, maruz kalınan kimyasal dış etkilere karşı gösterdiği yüksek korozyon direnci gibi özellikleri Sayesinde ve ilk üretim maliyetlerinin uygun olmasından dolayı tercih edilmektedir.

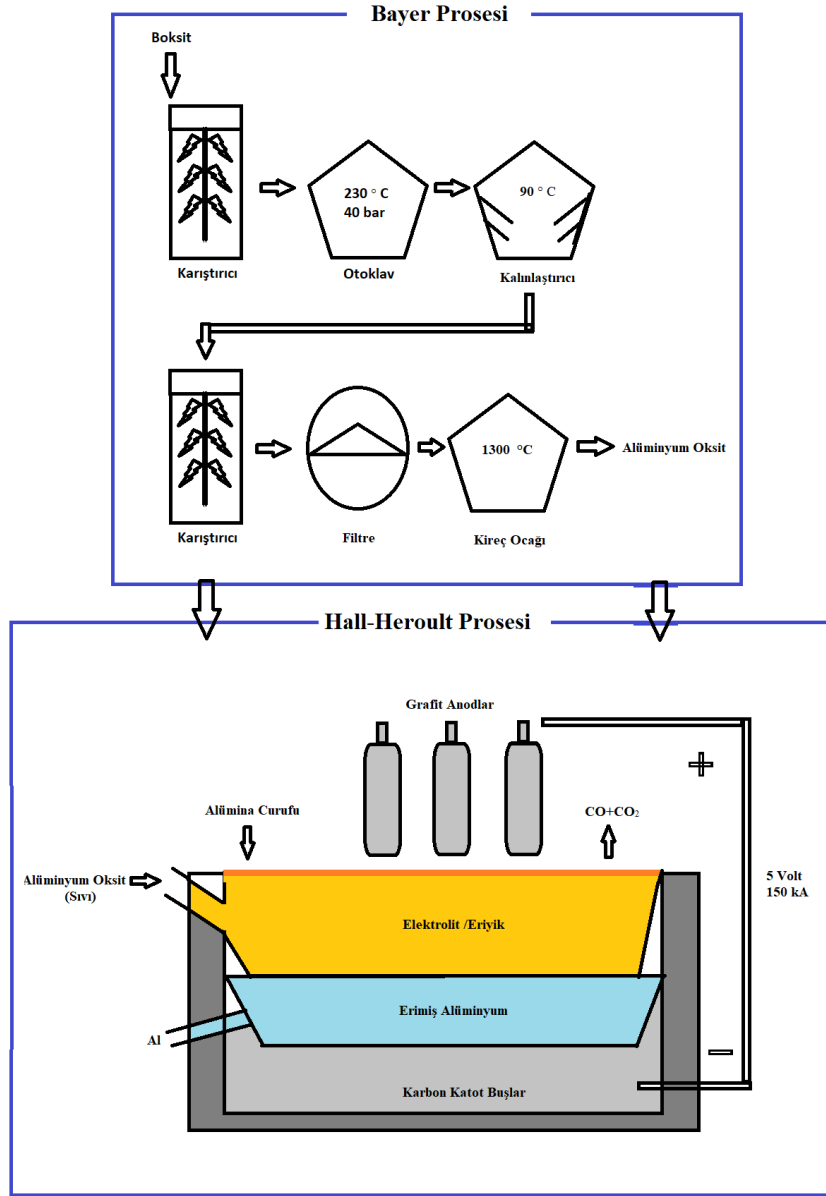
(Rana ve diğ. 2012). Kütlesel hafifleme amacı ile kullanılan Al alaşımlarında dayanım özellikleri kullanım alanına uygun olsa dahi malzemenin kullanım alanında maruz kalması muhtemel doğal titreşim genliklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir (Rao ve diğ. 2012).

Kütlesel hafiflemelerde malzemeler kullanım alanlarına bağlı olarak düzenli veya düzensiz olarak sürekli olarak doğal titreşimlere maruz kalmaktadır (Atlıhan ve diğ. 2021). Bir uçak veya uzay aracı içerisinde kullanılan Al alaşımlarının maruz kaldığı doğal titreşim etkisi ile bir makine veya otomobil alanında kullanılan Al alaşımlarının maruz kaldığı doğal titreşim etkileri farklılık göstermektedir (Tezel ve diğ. 2019). Malzemenin sahip olduğu doğal titreşim değeri bulunduğu ortamda maruz kaldığı titreşim değeri ile çakışması durumunda rezonans frekanslarına neden olmakta, bu durumda malzemenin yüksek genlikte sürekli olarak titreşerek bulunduğu yapı içerisinde mekanik zarara yol açabilmektedir (Matsumoto ve diğ. 2003).

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, genel itibari ile Al ve alaşımlarının mekanik özellikleri iyileştirilmesi üzerinde durulmuştur. Ayrıca Al ve alaşımlarının titreşim özelliklerini incelenmesi üzerinde akademik çalışmalar yer almaktadır. Ancak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sonrası titreşimde meydana gelen etkilerin incelendiği akademik ve ticari çalışmaların sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu çalışmada birçok sanayi alanında yaygın kullanım alanına sahip AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarına uygulanan T6 ısıtma işlemi ile malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilip, bu iyileşmenin titreşim özellikleri üzerindeki değişimleri incelenmiştir. T6 ısıtma işlemi yanı sıra malzemeye Sıg-kriyojenik soğutma işlemi uygulanmış ve ısıtma ve soğutma etkileri sonrası malzemenin doğal titreşim değerine etkileri araştırılmıştır. Bu sayede mesnetlenme yerine göre titreşimlerin değiştirilebileceği gösterilmiştir.

2. Al ve Al Alaşımları

Al ve alaşımları; çok eski zamanlardan bugüne doğada bulunan altın, Cu, gümüş, kalay ve demir gibi elementlerin aksine 19. Yüzyılda insanlar tarafından keşfedilmiştir. Al'nin ilk keşfine bakıldığında çok eski tarihlerde Al ve sülfür birleşimi olan alum olarak isimlendirilen kimyasal ile kıyafet boyamak amacı ile kullanılmaktadır (Farndon ve diğ. 2001). 1807 yılında Humphry Davy Al elementini demir alaşımı olarak keşfetmiş ve Al olarak isimlendirilmesini önermiştir (Kvande ve diğ. 2008). 1825 yılında Hans Christian Oersted tarafından potasyum amalgam ile Al klorürü indirgeyerek ilk kez saf Al elde etmiştir (Geological 2010). Bu dönemlerde Al metali çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmış fakat ticari olarak seri üretim aşamasına geilememesinden dolayı altın gibi değerli metallerden daha yüksek fiyatlara satışı gerçekleştirilmiştir. 1886 yıllarında Al seri üretim aşamasına geçiş için ilk patent başvuruşu yapılmıştır. Al hammaddesi olan boksit cevheri içeriğinde demir, Si, oksijen gibi elementleri içerir. Boksit elementi Bayer prosesi adı verilen işlem ile saf Al eldesi gerçekleştirilir şekil 2.1'de Bayer prosesi ile boksit cevheri çeşitli kimyasal reaksiyon ve ısıl işlem aşamalarından geçirilerek Al_2O_3 birleşiği elde edilir. Elde edilen eriyik Al_2O_3 birleşiği elektrolitik hücrede elektroliz edilerek Hall-Heroult prosesine hazır hale getirilir. Hall-Heroult prosesi ile Bayern prosesinden elde edilen birleşik yapı çeşitli zeltiller ve tuz banyosu aşamalarından geçirilerek %99,5-99,8 saflıkta Al eldesi sağlanır (Khaji ve Qassemi 2016).



Şekil 2.1: Al eldesinde Bayern ve Hall- Heroult prosesleri.

Al metalinin seri üretiminin başlamasıyla birlikte seri üretimin sağladığı ilk üretim maliyetindeki düşüş, düşük özgül ağırlık ve korozyon dayanım özellikleri sebebi ile endüstri ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanımına imkân sağlamıştır (Venetski ve diğ. 1969). Endüstri alanında kullanıma uygun Al özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Saf Al 'un fiziksel ve kimyasal özellikleri.

<i>Saf Alüminyum</i>	<i>Ozellikleri</i>
<i>Kristal Yapı</i>	Yüzey Merkezli Kübik Yapı
<i>Yoğunluk</i>	2,7 g/cm ³
<i>Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı</i>	150-300 °C
<i>Isıl İletkenlik</i>	645-660 Kcal/Sa/cm/°C
<i>Erime Sıcaklığı</i>	660 °C
<i>Elastik Modül</i>	7,06 x 10 ⁶ MPa
<i>Kayma Modülü</i>	2,65x10 ⁵ MPa
<i>Kopma Uzaması</i>	%30-40

İlk üretilen saf Al oldukça yumuşak yapıda olması nedeni ile endüstri ve mühendislik uygulamalarında kullanıma uygun değildi. Bu neden ile saf Al metali ilk olarak hafiflik ve parlak görüntüsü nedeni ile süs ve gündelik eşyaların yapımında aktif rol oynamıştır (Apelian 2009). Seri üretime geçilmesi ile Al ile ilgili farklı döküm yöntemleri, farklı elementler ile alaşımlama ve ısıtma işlemi altında malzeme özelliklerindeki değişimlerin incelenebilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde Al'nin kokil ve basınçlı dökümü, farklı elementler ile alaşım oluşturmaları ve ısıtma işlemi uygulanabilmesi ile malzeme özelliklerinin değişebilirliği belirlenmiştir (Kaufman ve diğ. 2004). Geçmişten günümüze Al alanında yapılan akademik ve endüstriyel çalışmalar neticesince saf Al çeşitli alaşım elementleri ile alaşımlayarak saf Alüminyum mekanik ve karakteristik özelliklerinde iyileştirmeler yapılmıştır. Alaşımlama sonrası malzemenin çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzama değerlerinde önemli bir artış elde edilmiştir. Çekme dayanımı 700 MPa değerine, akma dayanımı 450 MPa seviyelerine çıkarılabilirken uzama oranı ise %30 seviyelerine kadar artış göstermiştir. Saf Al'nin endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğine engel teşkil eden yumuşak bir yapıda olması alaşımlama ve ısıtma işlemi sonrası önemli ölçülerde artışı sağlanmıştır (Davis 1993). Saf Al'nin alaşımlama ve sonrasında uygulanan ısıtma işlemi aşamaları ile malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimler Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 1.2: Saf Al ve alaşımlı Al'nin mekanik özellikleri (Kaufman 2000).

<i>Alüminyum Özellikleri</i>	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Sertlik (HB)	%Uzama	Elastisite Modülü (ksi*10⁻³)
<i>Saf Alüminyum</i>	49	20	19-40	6-43	10.0
<i>Alaşımlı Alüminyum</i>	700	450	45-150	4-35	10-10,2

Mevcut kullanım alanlarına bakıldığında saf Al'nin malzeme dayanımı gerektirmeyen günlük kullanıma uygun alanlarda yaygın kullanıldığı bilinmektedir. Demir çelik gibi geleneksel malzemelerin yoğunluğunun yüksek olmasından kaynaklı olarak Al düşük özgül ağırlığı sahip olması geleneksel malzeme türlerine kıyasla Al'nin önemli bir özelliği öne çıkmaktadır (Davis 2001). Al'nin hafifliği yanı sıra dayanım özelliklerinin de geleneksel malzemelere yakın değerlere iyileştirilebilmesi için alaşımlama işlemi yapılmaktadır. Al'nin ana alaşım elementleri genel olarak bakır (Cu), silisyum (Si), magnezyum (Mg), çinko (Zn) ve kalay (Sn) elementleridir (Revie ve diğ. 2000). İçerdiği alaşım elementlerine göre Al alaşımlarının sınıflandırılması Tablo 2.3'te yer almaktadır.

Tablo 2.2: Al ve alaşımlarının sınıflandırılması.

Alüminyum Sınıflandırılması	İçerdiği Alaşım Elementi
1XXX	Saf Alüminyum %99,0 ve üzeri
2XXX	Alüminyum-Bakır (Cu)
3XXX	Alüminyum-Mangan (Mn)
4XXX	Alüminyum-Silisyum (Si)
5XXX	Alüminyum-Magnezyum (Mg)
6XXX	Alüminyum-Silisyum-Magnezyum
7XXX	Alüminyum-Çinko (Zn)
8XXX	Alüminyum- Lityum (Li)

2.1 1XXX Serisi Saf Al

1XXX Serisi Al minimum %99.00 oranında yüksek saflıkta Al içermektedir. Mukavemet özellikleri Al alaşımlarına oranla oldukça düşük özellik göstermektedir. Mukavemet özellikleri gerinim sertleşmesi ile düşük oranda artış sağlanabilmektedir. Mukavemet özellikleri yanı sıra korozyon direnci ve elektrik ve ısı iletkenlik özellikleri üst seviyededir. 1XXX serisi Al alaşımları başta elektrik, kimya ve gıda sektörlerinde yaygın kullanım alanına sahiptir (Anderson, 2019).

2.2 2XXX Serisi Al-Cu Alaşımı

2XXX serisi Al alaşımları yaşlanabilir Al alaşımları sınıfına girmektedir. Isıl işlem sonrası malzemede çökelme sertleşmesi ile mukavemet özelliklerinde iyileştirme gerçekleştirilebilir. Genel olarak dayanım ve yorulma özellikleri iyileştirilmiş malzemelerdir. Yapı içerisinde Cu elementi malzemenin dökülebilirlik özellikleri ve işlenebilirlik özelliklerinde olumlu yönde etkilemektedir. Cu oranının belirli bir seviyeye kadar mukavemet artışı sağladığı bu seviye üzerinde ise tersi yönde etki ederek dayanım özelliklerinde düşüş etkisi yaratmaktadır (Tariq ve diğ. 2012).

2.3 3XXX Serisi Al -Mn Alaşımı

3XXX seri Al alaşımlarının birincil alaşım elementi mangandır. 3XXX seri alaşımlarda genel olarak ısıl işleme tabi tutulamayan Al alaşımları arasında yer almaktadır. Genel özellikleri incelendiğinde 3XXX seri Al alaşımlarının orta seviyede mekanik özellik göstermesine karşın işlenebilirlik özellikleri iyi seviyededir. Seri alaşımlarında ana alaşım elementi yanı sıra belirli oranlarda Mg, Fe ve Si elementlerinin takviye edilmesiyle mekanik özelliklerinde artış sağlanabilmektedir (Huang ve diğ. 2009).

2.4 4XXX Serisi Al-Si Alaşımı

4XXX serisi Al alaşımlarında esas alaşım elementi olarak Si kullanılmaktadır. Erime sıcaklığı 577 °C'dir. Döküm özellikleri ve akışkanlık özellikleri oldukça iyidir. Seri içerisinde diğer alaşım elementlerin oranına bağlı olarak bazı seriler ısıl işlem uygulanabilirken bazı serilerine uygulanamamaktadır. Al-Si alaşımları tribolojik özellikleri oldukça iyi olmakla birlikte içerdiği ana alaşım elementi Si oranının yapı içerisinde artması ile mukavemet özelliklerinde düşüş

göstermektedir. Genel olarak otomotiv sektöründe kayma yatakları, piston ve motor silindirlerinde kullanılmaktadır (Mehdi ve Kumar 2015).

2.5 5XXX Serisi Al-Mg Alaşımı

5XXX serisi Al alaşımlarının esas alaşım elementi olarak Mg kullanılmaktadır. Yapı içerisinde Yaklaşık olarak %7 ve %7'nin altında Mg içeriğine sahip alaşımlar ısıtılma işlemine tabi tutulabilir(Kaufman 2004). 4XXX seri Al alaşımları yüksek tokluk, mukavemet ve korozyon direnci ile kaynaklanabilirlik özellikleri iyi seviyededir. Genel olarak deniz araçları, otomotiv sektörü ve yiyecek içecek sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kutz 2002).

2.6 6XXX Seri Al-Si-Mg Alaşımı

6XXX seri Al alaşımlarının esas alaşım elementi olarak Si-Mg elementleridir. Isıl işlem uygulanabilir Al alaşımları sınıfında yer almaktadır. 6XXX serisi Al alaşımları içerdiği alaşım elementlerine bağlı olarak genel özellikleri yüksek süneklik ve korozyon direnci, iyi işlenebilirlik ve işlem sonrası uygun yüzey kalitesine sahiptir. Bu özellikleri yanı sıra orta mukavemetli Al alaşımları sınıfında yer almaktadır (Sun ve diğ. 2013). 6XXX serisi Al alaşımları otomotiv sanayi, havacılık ve uzay sanayi, Gemi sanayi yanı sıra mimari dekantasyon parçaları ve yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sielski 2008).

2.7 7XXX Seri Al-Zn Alaşımı

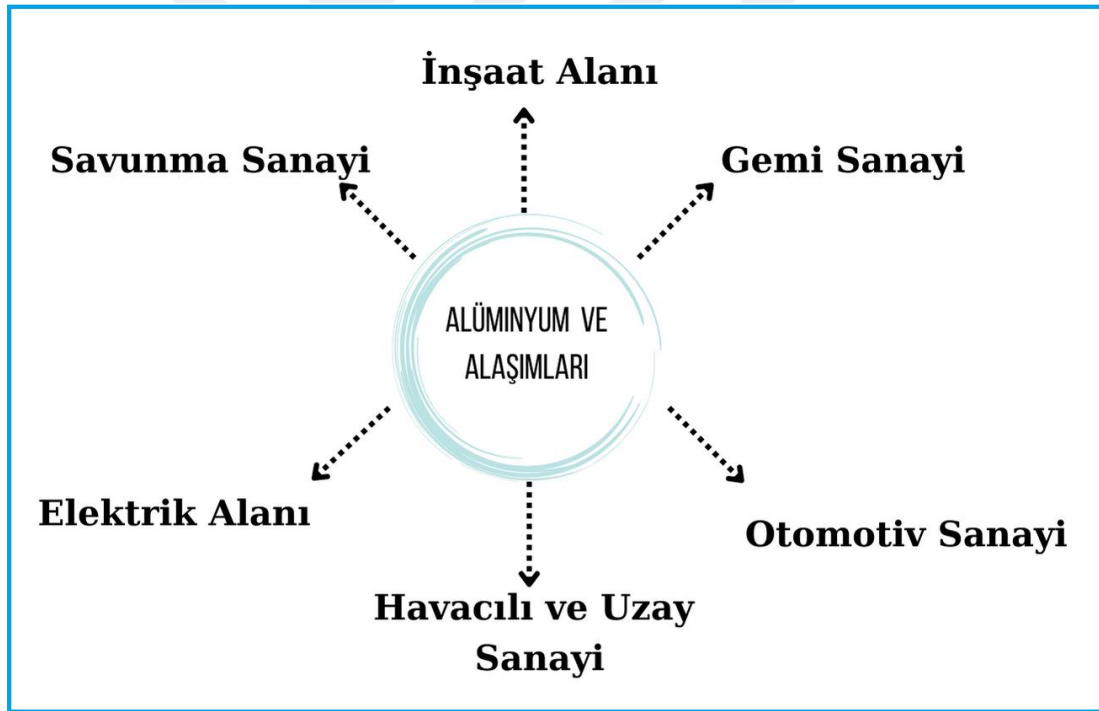
7XXX serisi Al alaşımlarda ana alaşım elementi Zn elementidir. Isıl işlem uygulanabilir Al alaşımları arasından yer almaktadır. 7XXX serisi Al alaşımlarında ince çökelti oluşumu, tane sınırı özellikleri ve tane yapısı ısıtılma işlemi ile önemli ölçüde kontrol edilebilmektedir. Yapı içerisinde ana alaşım elementi Zn yanı sıra Mg içermesi ısıtılma işlemi sonrası çökelti sertleşmesine bağlı olarak alaşımların mekanik özelliklerinde önemli iyileştirme sağlanabilmektedir (Rometsch ve diğ. 2014). 7XXX serisi Al alaşımları yüksek mukavemet, yüksek tokluk, ısı direnci ve düşük yoğunluk özellikleri yanı sıra korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik özellikleri nedeni ile başta havacılık sektörü, otomotiv sektörü, inşaat sektörlerinde yaygın kullanım alanına sahiptir.

2.8 8XXX Seri Al-Li Alaşımı

8XXX serisi Al alaşımlarda ana alaşım elementi Li elementidir. Isıl işlem uygulanabilir Al alaşımları arasında yer almaktadır. Ana alaşım elementi Li, yapı içerisinde bağıl yoğunluğu azaltarak mukavemeti ve elastik modülü artırır. Yapı içerisinde Li elementi dışında bulunan Mg ve Cu elementleri ısıtıl işlem etkisine bağılı olarak yapı içerisinde çökelme sertleşmesi meydana getirerek mukavemet artışını sağlamaktadır (Davis 1993).

2.9 Al ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Al ve alaşımlar üretim ve şekillendirme kolaylığı yanı korozyon özellikleri, uzun ömürlü kullanıma uygun, yüksek iletkenlik ve çevre ile uyumlu malzeme olması nedeni ile birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Al ve alaşımlarının başlıca kullanım alanları Şekil 2.2’de belirtilmiştir.



Şekil 2.2: Al ve alaşımlarının kullanım alanları şematik gösterimi.

Al ve alaşımları yüksek elektrik iletkenliği özelliğine sahip olması sayesinde ile elektrik güç hatları, motor ve uydu antenleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğa sahip olmakla birlikte iyi dayanım özellikleri sergilemesinden dolayı inşaat sektörlerinde iç ve dış dekorasyon ürünleri ve bina temellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük yoğunluk

oranına rağmen çeşitli alaşımlarında yüksek dayanım özellikleri sergilemesi ile otomotiv sanayi, inşaat alanında, havacılık ve uzay sanayi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.10 Alaşım Elementlerinin Al'ye Etkileri

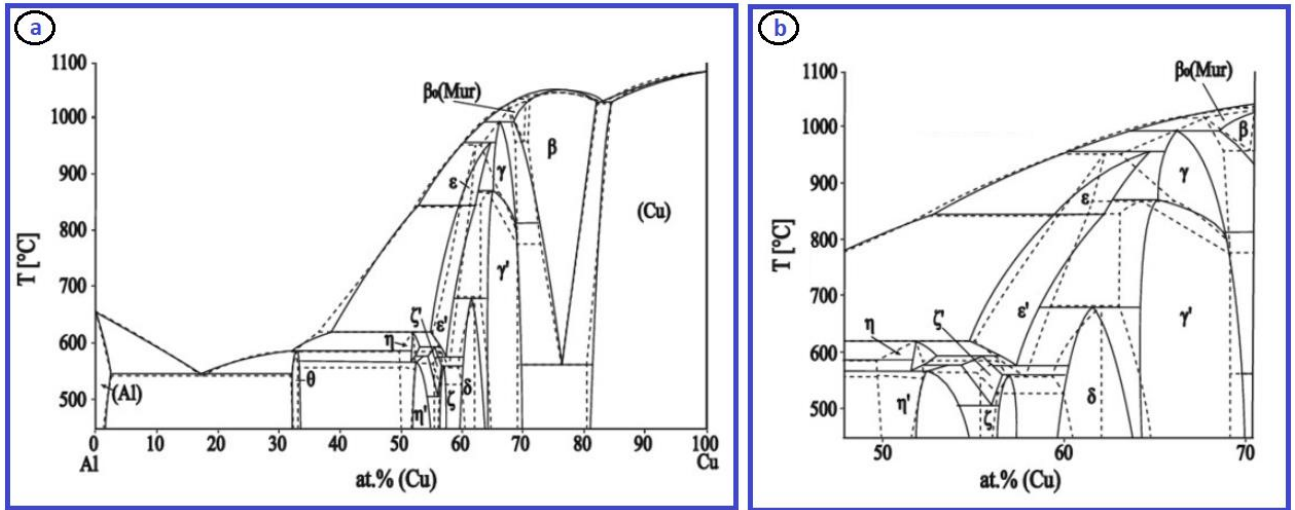
Al alaşımları sahip oldukları özellik bakımından endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanım alanına sahiptir. Al alaşımları demir dışı malzeme türlerine kıyasla uygun ilk üretim maliyeti, nispeten kolay tedarik ve işleme kolaylığı gibi endüstriyel açıdan oldukça elverişli üretim ve işleme avantajları sunmaktadır. Al 'un diğer elementler ile alaşımlamaya uygun olması endüstriyel avantajları ile uygulama alanlarında istenilen ürün özelliklerinde yüksek performans sergilemektedir. Al malzemesinin alaşım elementine bağlı olarak Al'nin baskın özelliklerinin daha yüksek seviyelere iyileştirilmesi veya az baskın durumunda olan özelliklerin ise kabul edilebilir seviyelere iyileştirilmesi sağlanmıştır (Songmene 2011).

Al alaşım elementleri;

- Bakır (Cu)
- Mangan (Mn)
- Silisyum (Si)
- Magnezyum (Mg)
- Çinko (Zn)
- Krom (Cr)
- Demir (Fe)
- Nikel (Ni)
- Titanyum (Ti)

2.10.1 Cu Elementi

Cu elementi düşük yoğunluk, iyi işleme özellikleri ve alaşım elementi olarak Al ile iyi bir alaşım kombinasyonu oluşturması genel itibari ile dövme Al yaygın kullanılan alaşım elementlerindendir. Yapı içerisinde %4-6 oranında Cu takviyesi ısıtılabilir Al alaşımlarını oluşturmaktadır. Cu yapı içerisinde ısıtılabilir uygulanarak aşırı doymuş katı faz ve devamında uygulanan farklı sıcaklıklardaki ısıtılabilir işlemler ile yapı içerisinde oluşan aşırı doymuş katı fazdan kararlı ve yarı kararlı fazların çökmesi ile Cu elementi Al'nin mekanik özelliklerinde artış meydana getirmektedir (Zobac ve diğ. 2019). Cu'nun Al içerisinde Cu oranına ve sıcaklığa bağlı fazlar ve faz geçiş noktaları Şekil 2.3'te verilmektedir.



Şekil 2.3: Al-Cu faz diyagramı a) Al-Cu alaşımasının genel faz diyagramı, (b) Al-Cu faz diyagramı orta bölüm ayrıntılı gösterimi(Murray 1985).

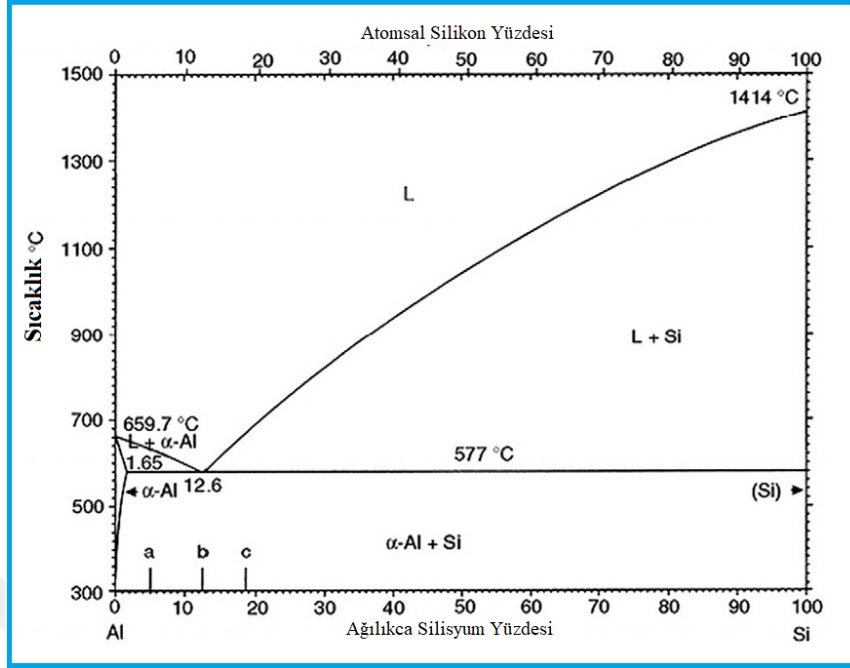
Isıl işlem sonrası Cu'nun Al içerisinde maksimum çözünürlük %2,5 oranına eşittir. %2,5 noktasından ve ötektik sıcaklık olarak tabir edilen 550°C sıcaklıkta ısıl işlem ve su verme sonrası Şekil-2.3'te θ fazı olarak gösterilen Al_2Cu fazı oluşumu gözlenmektedir. n' fazı düşük sıcaklıkta ve %51,9-54,8 aralığında meydana gelen $\text{Al}_{48}\text{Cu}_{52}$ fazı olarak belirtilmiştir. n fazı ise stabil olduğu sıcaklık 574 ile 625 °C aralığındadır ve n fazı peritektik reaksiyon ile meydana gelir (Ponweiser ve diğ. 2011).

2.10.2 Mangan (Mn)

Al alaşımlarına mangan ilavesi ile çekme mukavemeti ve nispeten malzemenin yorulma direnci üzerinde olumlu katkı sağlamaktadır. Mukavemet özelliklerinde iyileştirme sağlarken aynı zamanda korozyon direncinde düşmeye neden olmaz. Al-Mn alaşımları ile alaşımanın erime sıcaklığında artış gözlenir (Nam ve diğ. 2000).

2.10.3 Silisyum (Si)

Si elementi Al ile alaşımlandığında erime sıcaklığını düşüş meydana getirirken akışkanlığı artırmaktadır. Si ana alaşım elementi olarak kullanıldığında döküm özellikleri yanı sıra alaşımanın mekanik, fiziksel ve korozyon direnci gibi özellikleri iyileştirmektedir (Singh ve diğ. 2001). Tek başına Si elementi ile alaşımlanan Al alaşımına ısıl işlem uygulanamazken az miktarda Mg ilavesi ile ısıl işlem uygulanabilir Al alaşımları arasına girmektedir (Kumar ve diğ. 2015). Si elementinin Al ile alaşım oranı ve sıcaklığa bağlı olarak bileşim oranı, faz oluşumları ve denge durumları Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4: Al-Si ikili faz diyagramı (Murray 1985).

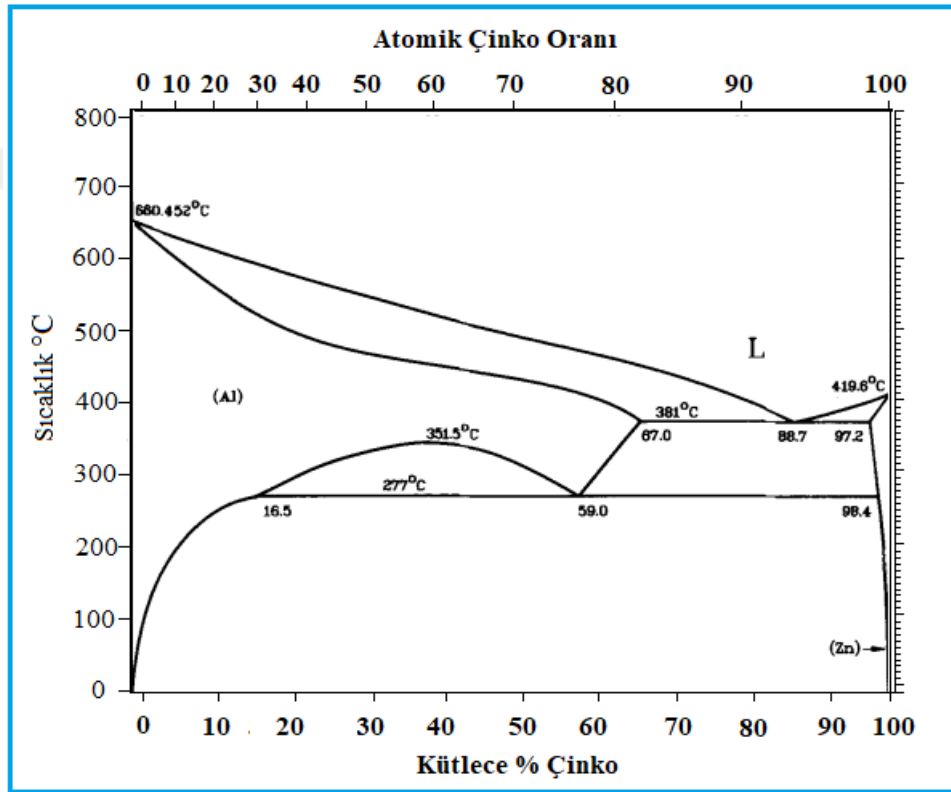
Al ve Si ikili faz diyagramları incelendiğinde, erime noktası alaşım yüzdesine bağlı olarak 659,7 °C ila 1414 °C aralığındadır. Si elementinin yapı içerisinde tamamen çözünürlüğü ötektik noktada meydana gelmektedir. Ötektik reaksiyon ağırlıkça 12,6 ‘da meydana gelmekte ve Si’nin alaşım içerisinde çözünürlüğü meydana gelmektedir. Alaşımlama sonucunda elementel Si parçaları içeren Alca zengin katı faz oluşumu gözlemlenir (Asensio ve diğ. 2009).

2.10.4 Magnezyum (Mg)

Al elementine Mg ilavesi ile döküm özelliklerinde düşme meydana getirmektedir. Mg ilavesi ile cüruf oluşumu gözlenmektedir. Oluşan bu sorun ise farklı element takviyeleri ile kontrol edilebilmektedir. Mg elementi Al içerisinde %6 orana kadar takviye edilebilmektedir. Al-Mg alaşımları ısıtılma işlemi uygulanamaz alaşımlar arasında yer alır. Mg elementinin yapı içerisinde %3 oranının altında ilave edilmesi ile yapı içerisinde kaynaklanabilirlik özellikleri ve mekanik özelliklerinde düşüş etkisi oluşturmaktadır. Bu düşüşe karşın yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklıklarda malzeme yapısı kararlı halde olması nedeni ile %3 Mg oranının altında düşen malzeme özelliklerine rağmen farklı sıcaklıklarda kararlı yapı sergilemesi nedeni ile yaygın kullanım alanına sahiptir. %3 oranında Mg ilavesi aksine yapı içerisinde %3,5 ve üzeri oranlarda Mg ilavesi ile işlenebilirlik, kaynaklanabilirlik ve mekanik özelliklerinde yüksek özellik göstermektedir.

2.10.5 Çinko (Zn)

Zn elementinin Al ile alaşımlaması ile alaşım oranına bağlı olarak dökülebilirlik özelliklerinde akışkanlığın artması yönünde katkı sağlamaktadır. Diğer alaşım elementlerine kıyasla Zn elementi Al ile alaşımlaması alaşımın sertlik, aşınma direnci ve işlenebilirlik özelliklerinde iyileştirme yapmakla birlikte alaşımdan elde edilen yüze kalitesi diğer alaşım elementlerine kıyasla oldukça iyi olarak kabul edilmektedir (Hekimoğlu ve Turan 2019). Zn elementinin Al içerisinde çözünürlük oranı, çözünürlük sıcaklığı ve faz oluşumları Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5: Al-Zn ikili faz diyagramı (Muray 1985).

Zn elementinin Al içerisindeki çözünürlük oranı diğer alaşım elementlerinden oldukça fazladır. Maksimum çözünürlük oranı %67 ve çözünürlük sıcaklığı 381°C'dir. Alaşım içerisinde Zn oranının artışı ile alaşımın erime sıcaklığı düşmektedir. Yapı içerisinde artan Zn oranı ile oluşan monotektoid, ötektoid, peritektik ve ötektik faz dönüşümleri meydana gelmektedir (Merkley 2016). Zn elementinin Al içerisinde çözünürlük oranının fazla olması nedeni ile yapı içerisinde ikincil faz çökmesi meydana gelmektedir. Bu neden ile ısıtılabilir uygulanabilir alaşımlar sınıfında yer almaktadır.

2.10.6 Krom (Cr)

Al içerisine Cr elementi oldukça az oranda bulunmaktadır (%0,10-0,60). Cr ilavesi yapı içerisinde tane küçülmesinde rol oynamaktadır. Farklı Al alaşımlarına belirli oranda ilavesi ile gerilim çatlaklarında azalma ve korozyon direncinde özelliklerinde iyileştirme yapmaktadır. Cr elementinin Al içerisindeki çözünürlük oranı azdır bu nedenle alaşım içerisinde ikincil faz çökmesi meydana gelmez ve Al-Cr alaşımları ısıtıl işlem uygulanamaz alaşımlar sınıfında yer almaktadır (Neto ve diğ. 1992).

2.10.7 Demir (Fe)

Fe elementi Al içerisinde genellikle empürite olarak bulunmaktadır. Al ile alaşımlanan Fe döküm sırasında sıcak çatlama etkilerini azaltmakta ve alaşımın mekanik özelliklerinde kısmi iyileştirmeye neden olmaktadır. Diğer alaşım elementlerine kıyasla korozyon direnci ortalamanın altında etki göstermektedir (Krasnowski ve Kulik 2010).

2.10.8 Titanyum (Ti)

Al içerisine yaklaşık %0,05-0,20 oranında Ti ile alaşım oluşturulmasıyla alaşım içerisinde tane küçültücü etki göstermektedir. Al-Ti alaşımlarında Ti elementi bor ile takviye edilmektedir. Ti ve bor elementleri ile takviye yapılan Al alaşımlarında süneklik ve çekme mukavemetlerinde artış gözlenirken döküm özeliği arasında yer alan akışkanlığı düşürmekte ayrıca ısı iletkenliğini azaltmaktadır (Cissi, Kerr ve diğ. 1974).

2.10.9 Nikel (Ni)

Ni elementi Al içeresine az miktarda takviye edilmesiyle alaşımın dayanım ve mukavemet özelliklerini iyileştirmektedir. Al alaşımlarında Ni genellikle yüksek çalışma sıcaklığında sertlik ve dayanım özelliklerini koruyabilmesi için takviye edilmektedir. Bununla birlikte Ni elementi içeren Al alaşımları olarak parlaklık ve yüksek yüzey kalitesi elde etmek içinde takviye edilmektedir.

Alaşım Elementi	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Cr	Fe	Ti	Ni
Yoğunluk	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑
Akışkanlık	↓	↓	↑	↑	=	-	↓	↓	-
Mukavamet	↑↑	↑	↑	↑	↑↑↑	-	↑	↑↑	↑
Sertleşme	↑↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑↑	↑	↑	↑	-
Korozyon Mukavemeti	↓	↑↑	↑	↑↑↑	↓	-	-	-	↓
Elektrik İletkenliği	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓	↓↓↓	↓	↓↓↓	↓
Isıl Genleşme Katsayısı	↓	↓	↓	↓	↑	↓	-	↓	↓
↑ : Artma ↓ : Azalma = : Değişmez - : Bilinmiyor									

Şekil 2.6: Alaşım elementlerinin Al üzerinde etkileri.

Alaşım elementlerinin Al üzerinde etkileri genel olarak incelendiğinde, alaşımlama işlemi ile saf Al'nin sahip olduğu düşük mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Alaşım elementlerinin genel olarak saf Al içerisinde belirli miktarda takviyesi ile malzemenin sertlik ve mukavemet özelliklerinde artış gözlemlenirken, elektrik iletkenliği ve ısıl genleşme özelliklerinde düşüş meydana gelmektedir. Bazı takviye alaşımlarının saf Al'nin önemli özellikleri arasında yer alan düşük yoğunluk değerinde eser miktarda artış meydana getirmektedir. Al'nin farklı elementler ile alaşım oluşturmasıyla- etkilenen diğer özellik ise Al'nin döküm özellikleri arasında yer alan akışkanlık özelliğinin Cu, Mn, Fe ve Ti alaşım elementlerinin ilavesi ile azaldığı, Si ve Mn gibi elementlerin ilavesi ile akışkanlık değeri yükselmektedir. Alaşım elementlerinin Al üzerinde etkileri ayrıntılı olarak Şekil 2.6'da verilmektedir.

2.11 Dövme ve Döküm Al Alaşımları

Al metalinin mekanik özellikleri farklı alaşım elementleri ve ısıl işlem ile değişmesinin yanı sıra malzemenin üretim yöntemiyle de mekanik özelliklerinde değişim söz konusudur. Al alaşımlarım imal yöntemlerine göre döküm ve haddeleme yöntemleri olarak

sınıflandırılmaktadır. Başlıca imal yöntemine göre Al'nin mekanik özellikleri Tablo 2.4' de yer almaktadır.

Tablo 2.3: İmal yöntemine göre Al'nin mekanik özellikleri.

<i>İmal Yöntemi</i>	<i>Mekanik Özellikleri</i>				
	Çekme Mukavemeti (kg/mm ²)	Akma mukavemeti (kg/mm ²)	Uzama (%)	Büzülme (%)	Sertlik (HB)
<i>Dökme Al</i>	9-12	3-4	18-25	40-55	24-32
<i>Hadde Al</i>	18-28	16-24	3-5	60-85	45-60
<i>Isıl İşlemli Al</i>	7-11	5-11	30-40	80-95	45-150

Saf Al metali belirli oranda çeşitli elementler ile alaşımlama sonucu döküm yöntemi ile alaşımlı Al alaşımları üretilmektedir. Al dökme işlemi sonrasında malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen parametre sayısı oldukça fazladır. Bu parametreler döküm öncesi alaşım oranı, döküm sıcaklığı ve soğuma sıcaklığına bağlı olarak iç yapı modifikasyonlarını içermektedir. Döküm sonrası soğuma süre ve ortamına bağlı olarak yapının homojenliği tam olarak sağlanamadığı durumda ise malzeme ilave ısıl proseslere tabi tutularak kararlı yapının elde edilmesi sağlanabilmektedir. Döküm ile imal edilen Al alaşımları içerisinde belirli miktarda Si elementi barındırmaktadır. Si elementi içeren alaşım ötektik oranda olmasından dolayı alaşımın döküm özelliklerinde yüksek oranda iyileştirme sağlamaktadır(Wang 2003). Döküm aşamasında Al ve alaşım serisine göre takviye alaşım elementlerin ilavesi sonrası erimiş Al üretilmek istenen şekilde hazırlanmış çeşitli malzemeler (metal, ahşap vb.) ile yapılan kalıp içerisine dökülerek üretim gerçekleştirilmektedir (Otarawanna 2011).

Hadde ile imal yönteminde Al ve alaşımına uygulanan deformasyon işlemi sonrası yapı içerisinde eş eksenli tanelerin hadde yönüne doğrultusunda uzaması ve uzamayla birlikte kuvvetin artırılması ile doğru orantılı olarak yapı içerisinde şekil değişim olanağı sağlayan dislokasyonun tane sınırlarındaki sayısının artması sonucu malzemenin şekil değişimini kısıtlayarak yapı içerisinde gerilim sertleşmesi meydana getirir. Gerilim sertleşmesi ile malzemenin mukavemet özelliklerinde artış gözlemlenir (Wang ve diğ. 2015).

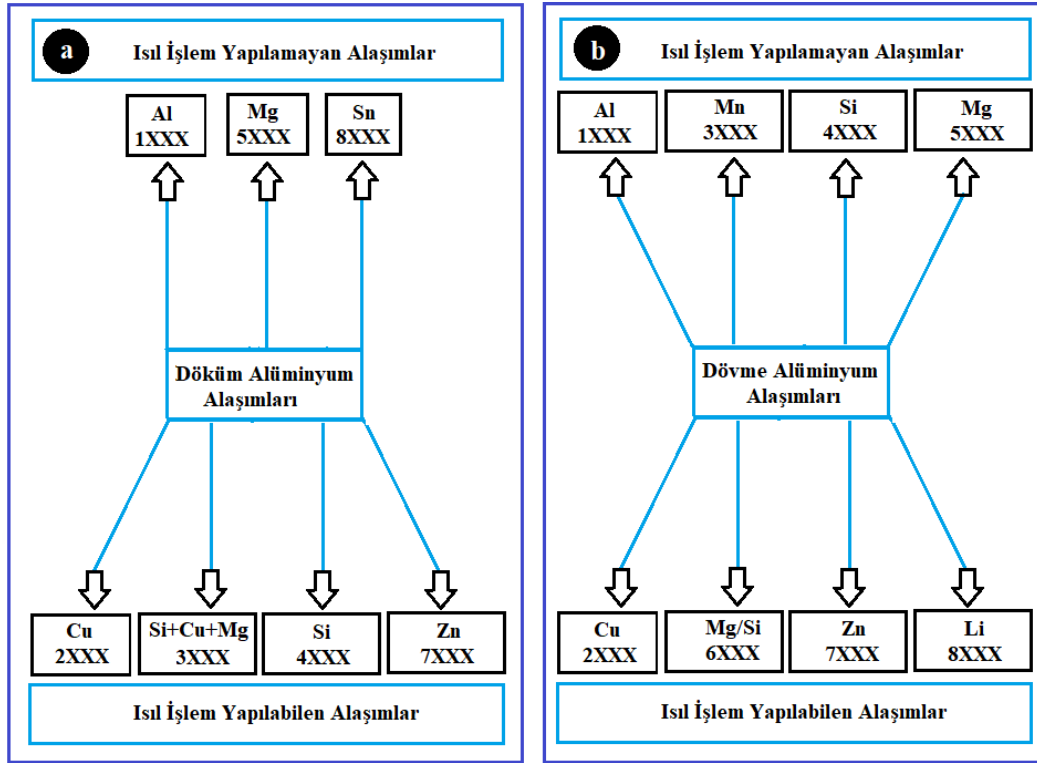
Dövme sınıfına giren Al alaşım element grubu içerisinde Zn, Cu, Si, Mg, Mn ve Fe elementleri yer almaktadır. Dövme ile üretimin başlangıç aşamasında döküm ile üretilen blok yapılar döküm sonrası homojenleştirme ısıl işlemine tabi tutulmaktadır. Homojenleştirme işlemi

sonrasında blok yapıdan farklı formlarda Al üretimini gerçekleştirmek amacıyla dövme yöntemi ile üretim aşamasına aktarılmakta ve şekil verme işlemi gerçekleştirilmektedir (Yaşar ve diğ. 2019).

Ekstrüzyon ile Al ve alaşımları malzeme özelliklerinin sistem için uygunluğundan dolayı oldukça tercih edilen üretim yöntemleri arasındadır. Üretim aşamasında ilk olarak üretimi gerçekleştirmek istenilen parçanın kalıp tasarım ve üretimi gerçekleştirilmektedir. Kalıp üretimi sonrası ekstre edilecek malzeme erime sıcaklığı üzerine çıkarılarak sıvı faza geçişi sağlanmaktadır. Sıvı fazda bulunan malzeme daha sonra basınç ile kalıba doğru itilerek katılaşması sağlanmaktadır (Sönmez 1989).

2.12 Al Alaşımlarında Isıl İşlem Özellikleri

Isıl işlem metallerin belirli sıcaklıklara çıkarılıp tekrardan soğutulması aşamalarını içeren malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile uygulanan işlem basamakları olarak adlandırılmaktadır. Isıl işlem uygulanan malzemelerin genel olarak sertlik, mukavemet vb. mekanik özelliklerinde iyileştirmeler amaçlanmaktadır. Isıl işlem ile ötektik sıcaklığın üzeri bir sıcaklığa ısıtılarak bu sıcaklıkta tavlama işlemi uygulanmaktadır. Tavlama işlemi, malzemenin ötektik sıcaklık üzerinde bekletilerek istenilen faza getirme işlemidir. Malzemeye uygulanan bu işlem basamaklarının sonunda oluşan fazın malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirme yaparak mekanik özelliklerinde artış etkisi oluşturabilecek fazın yapı içerisinde oluşması beklenmektedir. Al alaşımlarına uygulanan ısıl işlem aşamalarının, malzemenin mekanik özelliklerine etkisi yanı sıra elektrik iletkenliği ve korozyon özelliklerinin belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır. Al alaşımlarına yapılan ısıl işlem ile malzeme özelliklerinde bulunan fakat yeterli seviyede olmayan özelliklerin artırılması ve belirli bir değer üzerine çıkarılması sağlanmaktadır (Güven ve diğ. 2012.). Üretim yöntemine göre Al alaşımlarının ısıl işlem uygulanan ve uygulanamayan Al alaşımlarının sınıflandırılması Şekil 2.7’de verilmektedir. Dövme Al alaşımlarında 1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serisi Al alaşımları ısıl işleme uygun olmayan Al alaşımları sınıfında yer almaktadır. Isıl işlem uygulanamayan Al alaşımlarında mekanik özelliklerinde iyileştirme işlemi malzemeye deforme (sıcak-soğuk) uygulanarak şekil değiştirme yolu ile mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. 2XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi dövme Al alaşımları ise ısıl işlem uygulanabilir Al alaşımları sınıfında yer almaktadır. Bu tür alaşım serilerinde mekanik özelliklerde iyileştirmeler ısıl işlem etkisi ile gerçekleştirilmektedir (Kvande 1999)(Jimenez 1974).



Şekil 2.7: Al alaşımları ısıtılabilirlik özellikleri a) Dövme Al alaşımlarında ısıtılabilirlik özellikleri, b) Dökme Al alaşımlarında ısıtılabilirlik özellikleri.

2.13 Isıl İşlem Aşamaları

Al alaşımlarının mekanik özelliklerinde iyileştirme etkisi oluşturmak amacıyla çeşitli alaşım elementlerine ve bu elementlerin yapı içerisindeki oranına bağlı olarak ısıtılabilirlik etkisi ile mekanik özelliklerinde iyileştirme mümkündür. Al alaşımlarında ısıtılabilirlik işlem aşaması olarak malzeme erime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılması sonrası çeşitli ortam koşullarında (su, yağ, hava vb.) soğutulması işlemi ile başlatılmaktadır. Bu işlem basamağı çözündürme işlemi olarak adlandırılmaktadır. Çözündürme ısıtılabilirlik işlemine takriben malzemeye yeniden çözündürme işleminde olduğu gibi fakat daha düşük sıcaklıklarda ısıtılabilirlik ve soğutma işlemine tabi tutularak yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Çözündürme ve yaşlandırma aşamaları uygulanan Al alaşımlarının sertlik ve dayanım gibi mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Uygulanan ısıtılabilirlik aşamaları ve sembolik gösterimleri Tablo 2.5'te verilmektedir (Demir ve diğ. 2020)(Pabel ve diğ 2011).

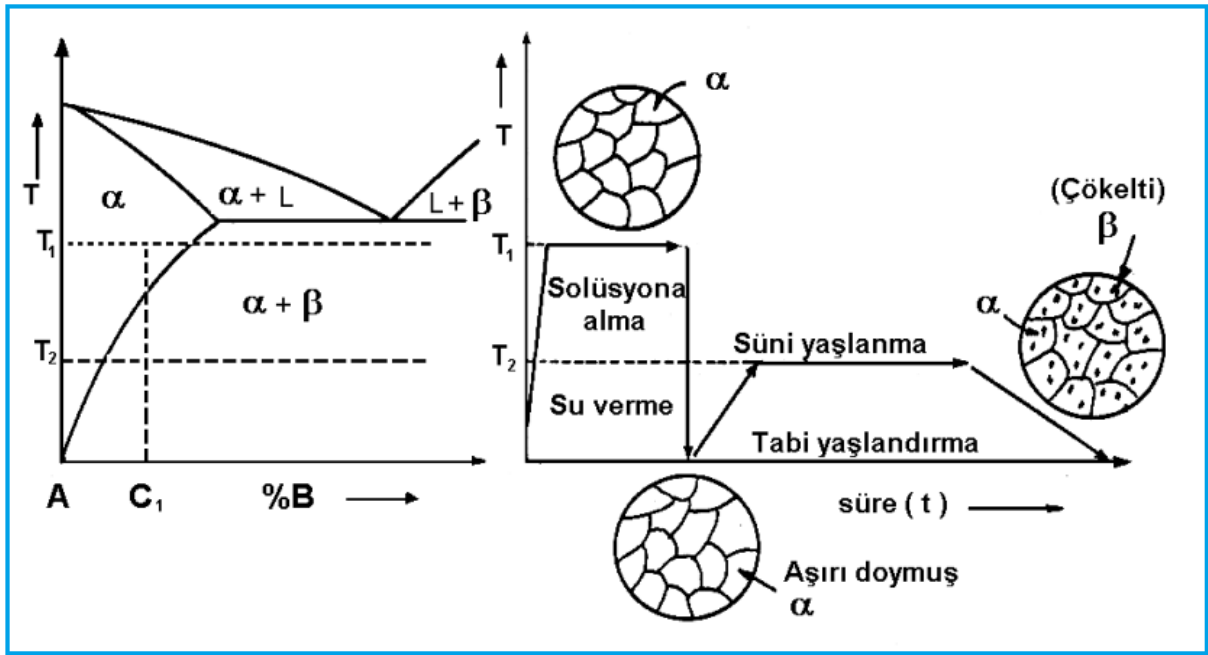
Tablo 2.4: Uygulanan ısıt işlemler basamakları ve sembolik gösterimleri

Sembol	Uygulanan İşlem Basamakları
F	İmal sonrası işlem görmemiş grup
0	Sıcak şekillendirme sonrası tavllanmış grup
T1	Yüksek sıcaklıkta işleme sonrası soğutulmuş doğal yaşlandırılmış grup
T2	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme ve soğutma + soğuk şekillendirme sonrası doğal yaşlandırılmış grup
T3	Çözündürme ısıt işlemi sonrası soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırılmış grup
T4	Çözümlü ısıt işlemi sonrası doğal yaşlandırılmış grup
T5	Yüksek sıcaklıkta işlem sonrası soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözündürme ısıt işlemi sonrası yapay yaşlandırılmış grup
T7	Çözündürme ısıt işlemi sonrası yapay olarak aşırı yaşlandırılmış grup

Al alaşımlarında ısıt işlem uygulanabilirlik şartlarının sağlanması ile ısıt işleme uygun Al alaşım serilerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanabilmektedir. Isıt işlem uygulanmak istenilen Al serilerinin faz diyagramları incelendiğinde diyagram verilerine göre maksimum katı çözünürlüğün gerçekleştirilebildiği sınır eğrisi olan solvüs eğrisi bulunan alaşımlara ısıt işlem uygulanabilmektedir. Bu alaşımlara uygulanan ısıt işlem sıcaklığının artması ile katı çözünürlük oranının artması, tersi işlemde ise ısıt işlem sıcaklığının düşmesine bağlı olarak katı çözünürlük oranının azalması beklenmektedir (Savaşkan 1999).

Çözündürme su verme ve yaşlandırma su verme aşamaları uygulanan alaşımlarda mekanik özelliklerin iyileştirilmesi çökelti sertleşmesi ile meydana gelmektedir. Çözündürme ısıt işlemi uygulanan Al alaşımları faz diyagramlarında yer alan solvüs çizgisi üzerinde erime sıcaklığının altında bir sıcaklık değerine ısıtılarak belli bir süre bu sıcaklıkta bekletilmektedir. Çözündürme

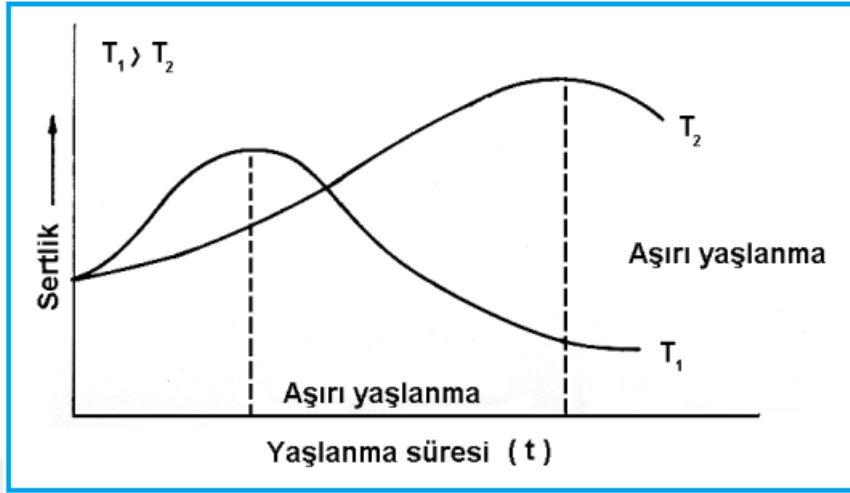
işleminin gerçekleşmesinde 3 önemli aşama bulunmaktadır. Bu aşamaların ilki Al elementinin yapı içerisinde çözünmesi ve ana fazı oluşturmaları, ikinci aşamada ise çözünmeyen alaşım elementlerinin küreselleşmesi ve üçüncü aşama ise mikroyapının homojenleşmesi ile verimli bir çözündürme ısısal işlemi gerçekleştirilmektedir. Belirtilen aşamaların gerçekleşmesi ile malzemeye su verme işlemi uygulanmaktadır. Su verme işlemi ile uygulanan çözündürme işleminde, çözünen fazların ani soğutma ile konumlarını koruması sağlanmaktadır. Isıl işlem aşamaları ve mikro yapı gösterimi Şekil 2.8’de verilmektedir (Güven ve Delikanlı 2012).



Şekil 2.8: Isıl işlem aşamaları ve mikro yapı özellikleri (Soboyejo 2002).

Çözündürme işlemi sonrasında belirtilen basamakların uygulanmasıyla yapı içerisinde tek faz şeklinde çözünen fazların oluşturduğu aşırı doymuş katı faz oluşumu gerçekleşmektedir. Aşırı doymuşluk yapı için istenilen bir özellik değildir. Optimum sıcaklık ve yaşlandırma süresi üzerinde bir duruma maruz bırakılan yapılarda tane büyümesinin aşırı artması ve çökelti miktarının azalması nedeni ile aşırı doymuş yapılarda alaşımın mekanik özelliklerinde düşüş meydana gelmektedir. Uygun şartlarda verimli bir ısısal işlem aşamasında çözündürme sonrası uygulanan yaşlandırma işleminde taneler sıcaklık ve zamana bağlı olarak yapı içerisinde çökeltme ve çökelen fazlar büyüme etkisi oluştururlar. Optimum sıcaklık ve sürede uygulanan yaşlandırma işleminde çökelen faz miktarı eşit boyut ve homojen dağılım gösterdiğinde dislokasyon hareketlerini engelleyerek mekanik özelliklerde artış etkisi yaratmaktadır. Aşırı yaşlandırma işleminde ise optimum ortam şartlarının üzerine çıkılarak çökelen fazların yapı içerisinde aşırı büyümesi ve buna bağlı olarak yapı içerisindeki çökelti miktarında azalma

gözlemlenmektedir. Farklı sıcaklık ve uzun sürelerde yaşlandırılan malzemelerin aşırı yaşlanma sonucu mekanik özelliklerinde oluşan etki Şekil 2.9'da verilmektedir (Savaşkan 1999).

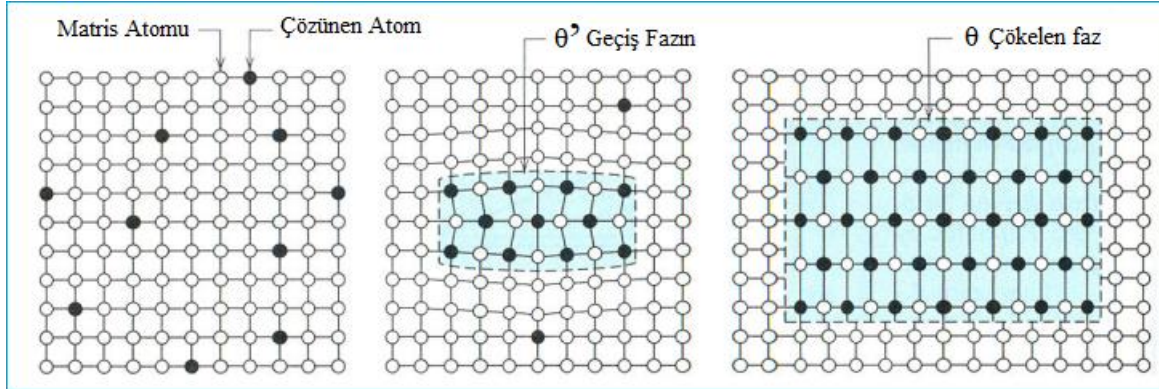


Şekil 2.9: Aşırı yaşlanmanın sertlik özelliklerine etkisi şematik gösterimi (Kayalı 1991).

Isıl işlem basamağında faz diyagramında yer alan solvüs eğrisinin üzeri bir sıcaklıkta çözündürme işlemi ve su verme ile elde edilen aşırı doymuş katı faz elde edilmesi ile ilk aşamada tamamlanmaktadır. Bir diğer aşama olan malzemenin mekanik özelliklerinin çökelti sertleşmesi ile iyileştirildiği yaşlandırma ısıl işlemidir. Yaşlandırma ısıl işlemi ile çözündürme aşamasında elde edilen aşırı doymuş katı faz içerisinde bulunan çözünmüş fazların solvüs eğrisi altında, çözündürme işlemi için gerekli olan sıcaklık değerine göre oldukça düşük sıcaklıkta malzemenin belirli süre bekletilmesi ve su vermesi sonrası yapı içerisinde çökelen ikincil fazların elde edilmesi sağlanmaktadır (Al-Saadı ve Tunay 2017).

Çözündürme ve su verme işlemleri sonunda oda sıcaklığında beklemeye bırakılan malzemeler çözündürme işlemi sonrası yapıca kararsız ve çözünmüş olan fazların belli bir süre sonra yapı içerisinde çökerek kararlı bir faza dönüşümü gözlemlenebilmektedir. Kararsız olan fazların yapı içerisinde oda sıcaklığında çökmesi oldukça uzun zaman alabilmektedir. Bu işleme doğal yaşlandırma etkisi denmektedir. Bu işlemin hızlandırılabilmesi ve malzemelerin sıcaklık ve zamana bağlı değişimlerinin gözlemlenebilmesi bir diğer deyiş ile malzemelerin doğal ortamlarında uzun süreli iç yapı değişimlerinin hızlandırıldığı işlemlere ise yapay yaşlandırma etkisi denmektedir. Yapay yaşlandırma ile çözündürme ve su verme işlemi sonrası malzemelerin belli süre ve sıcaklıklarda (Al için 90°C ila 260°C) bekletilmesi ve yapı içerisinde çözündürme işlemi sonunda elde edilen aşırı doymuş katı faz içerisinde çözünen kararsız fazların yapı içerisinde çökerek kararlı faz oluşturmaları sağlanmaktadır. Bu işlem sonunda yapı

içerine çökelen kararlı fazların elde edilmesi ile çökelti sertleşmesi meydana gelmektedir (Yılmaz ve diğ.2012). Çökelti oluşumu öncesi yapı içerisinde aşırı doymuş durumda bulunan matris atomu ve takviye element atomu yaşlandırma işlemi sonunda çökelti sertleşmesi oluşturmada önce yapı içerisinde θ' geçiş fazı meydana getirir bu aşamada alaşımın mekanik özelliklerine geçiş fazının özelliklerinden eklenmektedir. Geçiş fazından sonra θ kararlı yapısı oluşarak çökelti sertleşmesi Şekil 2.10'da belirtilen aşamalar ile tamamlanmaktadır (Dilmeç ve diğ. 2015).



Şekil 2.10: Çökelti sertleşmesinde faz oluşum aşamaları (William ve Callister 2003).

Çökelti sertleşmesindeki ana prensip, alaşım içerisinde matris malzemesinden daha sert ikincil alaşım elementlerin yapı içerisine çökelerak malzemenin dislokasyon hareketlerini kısıtlayıcı etki oluşturmaktır. Çökelti sertleşmesi elde edilen yapılar, deformasyon etkisine maruz kaldıklarında dislokasyon hareketlerinin çökelen fazlar nedeni ile kısıtlanması bu nedenle kısıtlanan deformasyon, çökelen fazların etrafında yığılması ile dislokasyon sayısında artış meydana gelir ve çökelti sertleşmesi elde edilir. Çökelti sertleşmesi ile kısıtlanan dislokasyon hareketi sonrası yığılan dislokasyon ve çökelen fazların miktarına bağlı olarak malzemelerin sertlik ve mukavemet özelliklerinde artış gözlemlenmektedir (Yıldırım ve diğ. 2018)(Aksöz ve diğ. 2013).

2.13.1 Kriyojenik soğutma İşlemi

Al ve alaşımlarının mekanik özelliklerinde iyileştirmeler meydana getirmek için uygulanan ısı işlemler malzemenin belli sıcaklıklara ısıtılıp bu sıcaklıklarda belirli süre bekletilmesi ve su verilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Isıl işlem uygulanan parçaların üretim aşamasında malzeme içerisinde kalan gerilmelere artık gerilme olarak bilinmektedir. İç yapıda var olan artık

gerilmeler ısıtıl işlem sonrası malzemelerin soğuma ortamı ve sıcaklığına bağlı olarak yapı içerisindeki durumunu koruyabilmektedir. Yapı içerisinde yer alan artık gerilmeler çökelti sertleşmesi sonrası malzemede meydana gelen mukavemet artışını düşük oranda dahi olsa etkilemektedir (Araghchi ve diğ. 2017). Çözündürme ve yaşlandırma aşamalarından oluşan ısıtıl işlem aşamalarının sonunda malzeme yapısında var olan artık gerilmelerin yapıya etkilerinin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılabilmesi için malzemeler ısıtıl işlem sonrası 0°C sıcaklıkların altında belirli süre bekletilerek oluşan artık gerilmelerin azalması veya ortadan kaldırılması sağlanmaktadır. Bu işleme kriyojenik soğutma denmektedir. Kriyojenik soğutma işlemi, sıfır derece altında malzemelerin belirli süre bekletilmesi ve iç yapıda atomsal boyutta var olan kalıntı ve gerilmelerin giderilmesi işlemidir. Kriyojenik işlem ile iç yapıda oluşan kalıntı gerilmelerinin azaltılması veya giderilmesi ile malzemelerin aşınma direnci ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır (Reed ve diğ.2007)(Aydın ve Bayram 2010)(Zhao ve Hong 1992).

0°C altı sıcaklıklarda yapılan soğutma işlemlerine kriyojenik soğutma işlemi olarak bilinmektedir. Sığ-kriyojenik soğutma işlemi 2 grup olarak ayrılmaktadır. Bu gruplardan ilki 0°C derece ile -80°C aralığında bulunan sıcaklıklarda gerçekleştirilen Sığ-kriyojenik soğutma işlemidir. İkinci grup ise -80°C derece ile -196 °C aralığında uygulanan dip Sığ-kriyojenik soğutma işlemidir. Belirtilen gruplar arasından ihtiyaç duyulan soğutma ortamı Sığ-kriyojenik soğutma işleminde kuru buz kullanılabilirken dip kriyojenik soğutma işlemi için ise sıvı nitrojen kullanımı gerçekleştirilmektedir. Kuru buz ve sıvı azot görselleri Şekil 2.11’de yer almaktadır (Zhao ve Hong 1992)(Eapen ve diğ. 2017)(Akhbarizadeh ve diğ. 2009).



Şekil 2.11: Kuru buz (Sığ-kriyojenik) ve sıvı azot (Dip Kriyojenik) (Spur ve diğ. 1999).

2.13.1.1 Kriyojenik işlemin Etkileri

Kriyojenik soğutma sonrası malzemelerin hem iç hem dış yapılarının etkilendiği ve tesir altında kalan bölgelerde atomsal ölçekte etkilere neden olduğu bilinmektedir. Kriyojenik soğutma üretim kaynaklı veya uygulanan farklı ısıl prosesler sonunda oluşan iç yapıdaki gerilim ve kalıntıların giderilmesinde oldukça yaygın kullanılan bir yöntem olarak bilinmektedir. Kriyojenik soğutma işleminin malzemelere kazandırdığı özellikler Şekil 2.12’de verilmektedir.

- **Kalıntı Östenit Fazının Martenzite Dönmesi**

Malzemelere uygulanan ısıl işlem aşamalarında malzemeler ilk olarak östenit faza geçişi sağlanır ve sonrasında soğutma işlemi uygulanarak martenzit faz oluşumu sağlanmaktadır. Uygulanan ısıl işlem sonrası iç yapının tamamının martenzit faza geçişi gerçekleşmemektedir. Bu durumda uygulanan kriyojenik soğutma ile kalıntı durumunda bulunan östenit fazların martenzite fazına geçişi sağlanmaktadır.

- **Karbür formlarını Değiştirme**

Malzemelerde üretim sonrası veya uygulanan ikincil ısıl işlemlerin etkisi altında iç yapıda bulunan karbürler kristal yapı içerisine girerek iç yapıda gerilmeler oluşturmaktadır. Bu tür yapılara uygulanan kriyojenik soğutma işlemi ile kristal yapı içine girmiş karbür yapıların olabildiğince dağılması sağlanmaktadır. Bu işlem sonucunda malzemenin aşınma direncinde artış meydana gelmektedir.

- **Tane Yapısında İncelme**

Matris atomları ve takviye element atomları yapı içerisinde yüksek kararlılık gösterdikleri bölgelerde dizilme eğilimi göstermektedir. Malzemelere uygulanan kriyojenik soğutma ile atomsal dizilimler yeniden şekillenerek tane incelmesi oluşturmaktadır.

- **İç gerilmelerin Giderilmesi**

Kriyojenik soğutma işlemi sonunda atomsal dizilimlerin yeniden düzenlenerek kararlı oldukları yapıya geçiş sağlaması malzeme içinde atom hareketliliğinden kaynaklı oluşan boşlukların oluşturduğu gerilme etkisini giderilmesi amacıyla yapılmaktadır.

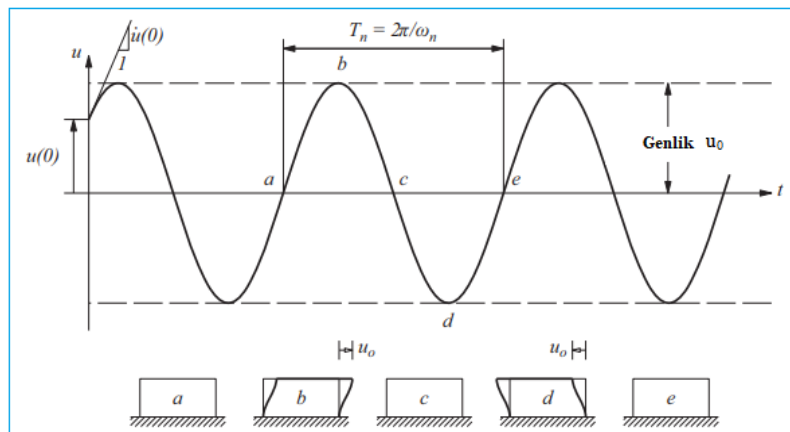


Şekil 2.12: Kriyojenik soğutma sonrası kazanılan özellikler.

3. Doğal Titreşim Frekansı

Tasarımlarda tercih edilen malzemeler, üretim sonrası kullanım alanlarında maruz kalabileceği doğal ve yapay dış etkiler ile karşılaşabilmektedir. Malzeme tercihinde ise maruz kalabileceği bu etkilere karşın göstermiş olduğu dayanım özelliklerine göre tercih ön planda tutulmaktadır. Bu etkiler arasında malzemelerin iç yapısal boşluk hataları, üretim kaynaklı hatalar, işleme hataları ve değişen kuvvetler altında malzemelerin yorulma davranışı gibi özellikler bulunmaktadır. Bu özellikler dışında malzemelerin kullanım alanlarında maruz kalabileceği doğal etkilerin de incelenmesi ve bu etkilerde mekanik etkiler gibi önce malzemede sonrasında ise ürünün genelinde hasara neden olabilmektedir. Malzemelerin kullanım alanlarında maruz kalabileceği doğal dış etkilerin başında korozyon etkisi gelmektedir. Yapılan çalışmalar sonucundan korozyona karşın etkin ve kalıcı önlemler alınabildiği bilinmektedir. Bir diğer doğal etki ise malzemelerin doğal frekans etkileridir. Kütle ile orantılı olarak değişim gösterebilen doğal frekans değeri sistemleri hafıflemesi ile araştırılması ciddi önem arz etmektedir (Ghalim ve diğ. 2007) (Reda ve diğ. 2008).

Doğal frekans, malzemelere özgü özellikler arasında yer almaktadır. Malzemeler üretim ve işleme aşamaları sonrasında bir sistem elemanı olarak tasarım ve ürünlere entegre edilmektedir. Malzemeler sistemlerin pasif durumdan aktif duruma geçilmesiyle sistemin çalışma prensibine bağlı olarak bulunduğu ortamda sürekli olarak titreşime maruz kalmaktadır. Pasif durumdan aktif duruma geçilmesiyle statik denge durumundan uzaklaşma buna bağlı olarak titreşim etkisi oluşmaktadır. Sistemin çalışma standartlarında oluşan dış ortamdan bağımsız olarak malzemelerin sürekli olarak titreşme etkisine serbest titreşim denilmektedir. Şekil 3.1’te serbest titreşimin yer değiştirme-zaman eğrisi verilmektedir.



Şekil 3.1: Sönümsüz bir sistemin serbest titreşiminin yer değişimi-zaman eğrisini şematik gösterimi (Dagdelen ve Ruhani 2018).

Şekil 3.1’te yer alan a-b-c-d-e ile belirtilen durumlar serbest titreşimin bir tam döngüsünü oluşturmaktadır. Sistem a noktasında denge durumunda iken dış kuvvet uygulanması ile sağa doğru eğilim göstermektedir ve b noktasından pozitif yönde en büyük yer değişme oranı olan (u_0) değerine ulaşmaktadır. Bu noktada hız sıfırlanır ve buna bağlı olarak yer değiştirme oranında yavaş olarak azalma etkisi oluşmaktadır. Zamana bağlı olarak sistem b noktasındaki şekilde c noktasında belirttiği şekilde tekrardan denge durumuna geçmektedir. Denge noktasına ulaşma esnasında tekrardan hızlanma etkisi oluşmaktadır. Oluşan hızlanma etkisi ile negatif yönde en yüksek yer değiştirme değerine ulaşılmaktadır ($-u_0$). Bu anda hız yeniden sıfırlanır ve sistem yer değiştirmesi azalmaya başlayarak e noktasındaki gibi denge konumuna geri dönmektedir. Şekil’13’te yer alan a noktasından e noktasına kadarki geçen süre $2\pi/\omega_n$ saniyedir. Sönümsüz sistemlerde bir titreşim döngünün tamamlanması için geçen süreye doğal titreşim periyodu (T_n) denmektedir. Sistem periyodu ve titreşimin doğal açısal frekansı (ω_n) arasındaki bağlantı denklem 1’de belirtilmektedir (Dağdelen ve Ruhani 2018).

$$T_n = 2\pi/\omega_n \quad (1)$$

Malzemelerin bir kuvvet altında göreceli dayanımı ve kütesine bağlı olarak yüksek genliklerde ve sönüm etkisi olmadan sürekli olarak titreştiği frekans değerine doğal frekans denmektedir (Avison 1989). Malzemeler sistem içerisinde aktif çalışma durumunda doğal frekans genliğinde titreşmekte iken çalışma ortamına bağlı olarak farklı malzemeler sürekli olarak farklı genlik değerlerine sahip frekanslara maruz kalmaktadır. Çalışma ortamı koşullarında malzemenin maruz kaldığı farklı frekans genlikleri malzemenin doğal frekans değerinin altında olması durumunda malzeme üzerinde etkisi olmamaktadır. Maruz kalınan farklı frekans genliklerinin malzemenin doğal frekans değerine eşit olması durumunda ise malzemenin genliği sonsuza kadar artma eğilimi gösterecektir. Bu duruma rezonans etkisi denmektedir. Rezonans etkisine maruz kalan parçalar katlamalı olarak titreşmeye devam edeceği ve önce malzemeye sonrasında ise sistemin tümüne hasar oluşturabilmektedir (Pala ve Beyçimen 2020).

3.1 Al ve Alaşımlarında Doğal Frekans İncelenmesi

Al alaşımları düşük yoğunluk, korozyon direnci gibi önemli özelliklere sahip olması nedeni ile havacılık ve uzay, ulaşım sanayi, İmalat sanayi ve inşaat sanayi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Al ve alaşımlarının keşfi öncesinde birçok alanda kullanılan yoğunluğu yüksek malzemeler kullanılmaktadır. Yoğunluğu yüksek malzemelerin tercih nedeni sistemlerin dayanım özelliklerini artırmak ve doğal olarak oluşabilecek etkilerin önüne geçebilmektedir. Tercih edilen malzemelerin yoğunluğunun yüksek oluşu ve buna bağlı olarak dayanım özelliklerin yüksek olması üretilen ürünlere olumlu yönde etki katmakla birlikte birçok olumsuz durumda ortaya çıkarmaktadır. Tasarım ve üretilen ürünlerin yoğunluğu yüksek malzemeler ile dayanım özelliklerinin yüksek tutulması ve kütlesinin büyük kesitli olması nedeni ile gerek ilk üretim maliyetinin yüksek olması gerek ise tasarımsal kriterler kısıtlayıcı etki oluşturması nedeniyle olumsuz durumlar oluşturmaktadır. Al ve alaşımlarının keşfi ve seri üretim aşamasına geçilmesiyle birlikte birçok alanda tercih edilen malzeme türlerinin yerini almıştır. Al farklı elementler ile alaşımlamaya uyum olması nedeni ile mevcut özelliklerin iyileştirilme ve baskın olmayan özelliklerin ise baskınlığının artırılması Al alaşımları düşük yoğunluk özelliğine yüksek dayanım özellikleri de eklenmektedir. Yaygın kullanım alanına göre aktif kullanım alanı bulunan elementlerin yoğunluk, erime ve kaynama noktaları Tablo-5'te verilmektedir

Tablo 3.1: Elementlerin yoğunluk, erime ve kaynama noktaları (James 1992)(Lide, 1998.).

Element	Sembol	Yoğunluk (gr/cm ³)	Erime/Kaynama Noktası
Alüminyum	Al	2,7	660°C /2060°C
Bakır	Cu	8,96	1083°C/2600°C
Demir	Fe	7,87	1539°C/2740°C
Kurşun	Pb	11,34	327,4°C/1740°C
Altın	Au	19,32	1063°C/2970°C
Nikel	Ni	8,90	1455°C/2730°C
Titanyum	Ti	4,54	1730°C/-°C
Gümüş	Ag	10,49	960,5°C/2210°C

Al sahip olduğu özellikler nedeni ile birçok alanda yaygın kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır. Geleneksel malzemeler yerine tercih edilen Al ve alaşımları tasarım ve ürünlerin

büyük kesitli yapılardan küçük kesitli yapılara geçişine olanak sağlamaktadır. Bu geçiş ile kesit alının küçülmesi, sistemlerin hafiflemesi gibi olumlu etkiler oluştursa da dayanım özellikleri açısından ve doğal dış kuvvetlerin etkilerinin sistemler üzerindeki oluşturabileceği durumların incelenmesi önem arz etmektedir. Al ve alaşımları ile havacılık ve uzay sanayi, ulaşım sanayi ve inşaat sanayi gibi önemli ticaret alanlarında sistemlerin hafifletilmesi ile gerek ilk üretim maliyetlerinde gerek ise tasarımların hafiflemesi ile oluşan maliyet aşamasında ciddi tasarruf elde edilmektedir. Geleneksel yapılarda kütleli büyüklük nedeni ile doğal etkilere karşı malzeme davranışları göz ardı edilebilir seviyelerdedir. Sistemleri hafiflemesi ile bu etkilerin malzeme üzerinde oluşturabileceği etkiler tasarım ve üretim aşamalarında malzeme tercihi açısından etkin rol oynamaktadır.

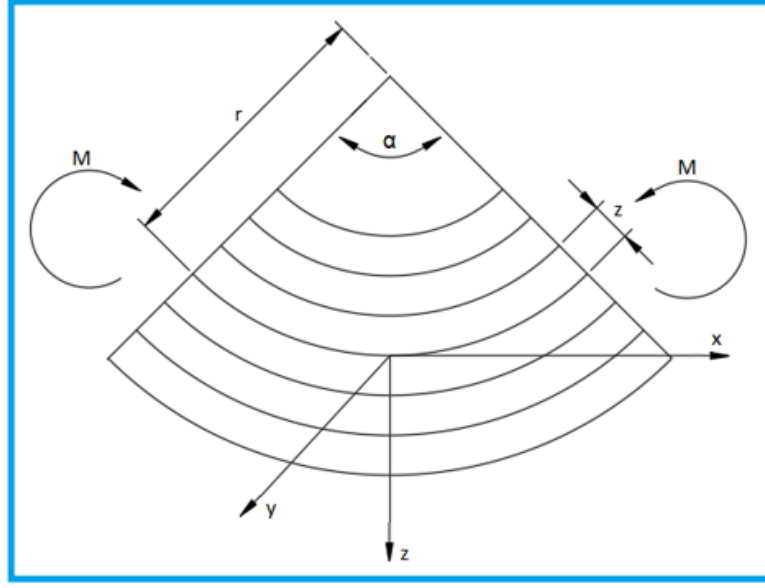
3.2 Kirişlerin Analitik Titreşim Analizleri

AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarının farklı kesit alanın sahip numunelerin doğal frekans değerlerinin analizi sonrası malzemelerin sahip olduğu doğal frekans değeri aşağıda yer alan denklem ile hesaplanmaktadır.

Düzeneğe bağlı kiriş numune serilerinde meydana gelen normal gerilme ilişkisi denklem 2’de verilmektedir.

$$\sigma_x = E_x \cdot \varepsilon_x \quad (2)$$

Kiriş kuvvet sonrası eğilme durumunda oluşan moment etkisi Şekil 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.2: Kirişin eğilme durumunda oluşan moment.

Bernoulli-Euler hipotezine göre nötr yüzeyden belirli bir mesafedeki deformasyon denklem 3'te verilmiştir.

$$\varepsilon_x = \frac{(r+z)\alpha - r\alpha}{r\alpha} = \frac{z}{r} \quad (3)$$

Burada r eğrilik yarıçapıdır.

Eğilme momenti ile normal gerilme arasındaki ilişki denklem 4'te verilmiştir (Çallıoğlu ve diğ. 2012).

$$M = \frac{EI}{r} = EI \frac{d^2\omega}{dx^2} \quad (4)$$

Yüke maruz kalan bir kiriş için yük moment ilişkisi;

$$\frac{d^2M}{dx^2} = \frac{dV}{dx} = p(x) \quad (5)$$

Denklem 5 şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2\omega}{dx^2} \right) = p(x) \quad (6)$$

Dinamik yük için d'Alembert prensibi kullanılır. Kütle ve ivme denklem 6'e eklenmelidir.

Böylece aşağıdaki denklem 6 elde edilmiş olur.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2(\omega, t)}{dx^2} \right) = p(x, t) - \rho_m A \frac{d^2 \omega(x, t)}{dt^2} \quad (7)$$

Burada ρ_m malzemenin yoğunluğu, A kirişin kesit alanını, I kirişin atalet momentini göstermektedir. Kirişin doğal frekansı uygulanan kuvvete bağlı değil malzeme özelliklerine ve geometrisine bağlıdır. Böylece $p(x, t)$ sıfır kabul edilebilir ve denklem 8 elde edilir.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2(\omega, t)}{dx^2} \right) + \rho_m A \frac{d^2 \omega(x, t)}{dt^2} = 0 \quad (8)$$

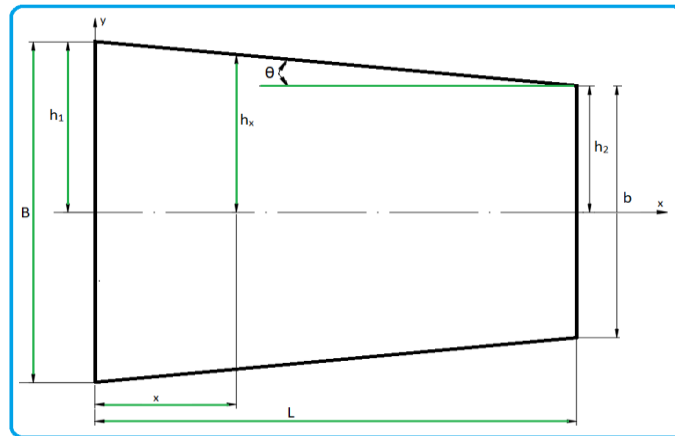
Bu homojen bir denklemdir. Koordinat ve sınır koşullarını zamana bağlı harmonik bileşeni olarak denklem 9 yazılabilir.

$$\omega(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \frac{n\pi x}{L} \cos \omega_n t \quad (9)$$

Burada A_n genliktir ve n ise doğal frekansın modunu göstermektedir. Denklem 9 denklem 8 ile çözüldüğünde değişken kesitli kirişin frekansı (ω_n) denklem 10 bulunur. Değişken kesitli kirişin doğal frekansı denklem 11 ile bulunmaktadır (Atlihan ve Ergene 2018).

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{A\rho}} \quad (10)$$

$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (11)$$



Şekil 3.3: Değişken kesitli kiriş.

Kiriş değişken bir kesite sahip olduğundan Şekil 3.3'te değişken kesit $f(x)$ işlevi tarafından tanımlanır. θ Konik açısını, β değişken kesit parametresidir. h_x x'e bağlı yarı kalınlık h_1 maksimum yarı kalınlık ve h_2 minimum kalınlıktır (Gibson 1994.).

$$h_x = h_1[1 - \beta f(x)] \quad (11)$$

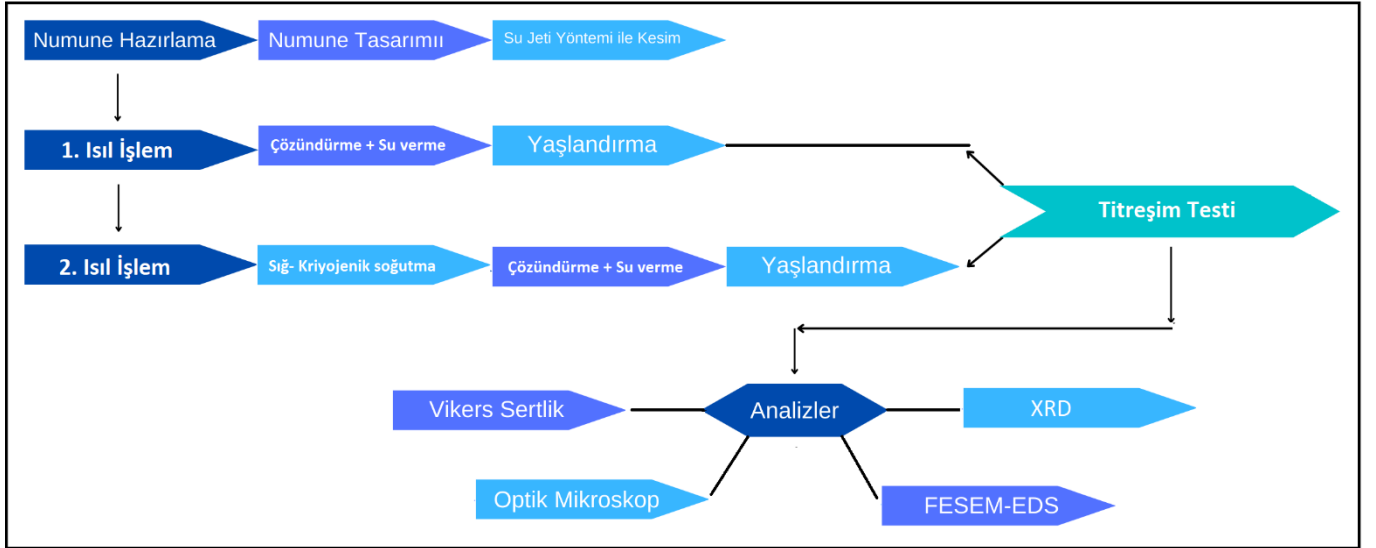
$$\beta = \left(1 - \frac{h_2}{h_1}\right) \quad (12)$$

$$f(x) = \frac{x}{L} \quad (13)$$

Seçilen fonksiyona göre eylemsizlik momenti (I) hesaplanır.

4. MATERYAL METOT

Bu çalışmada ticari olarak yaygın kullanım alanına sahip AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımları iki farklı bölümde incelenmiştir. Birinci Bölüm AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımları çözündürme + su verme + yaşlandırma ısıt işlem aşamaları uygulanmıştır. Uygulanan ısıt işlem aşamalarının malzemelerin mekanik özellik, mikroyapı ve doğal titreşim özelliklerine etkileri incelenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarına çözündürme + su verme + ≈ -75 °C sıcaklık değerinde 168 saat sıg-kriyojenik soğutma ve yaşlandırma ısıt işlemleri uygulanmıştır. Çözündürme + su verme sonrası uygulanan sıg kriyojenik soğutma ve yaşlandırma işlemlerinin malzemelerin mekanik özelliğine etkileri, mikro yapısal değişimleri ve malzemelerin doğal titreşim frekansına etkileri araştırılmıştır. Her iki aşamada da incelenen numuneler uygulanan ısıt işlem ve sıg-kriyojenik soğutma işlemlerinin malzemelerin doğal titreşim frekans değerlerine etkilerini incelemeye uygun olarak tasarlanmıştır. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise malzemelere uygulanan ısıt prosesler ve soğutma işlemlerinin doğal frekans değerine etkilerinin incelenmesi yanı sıra malzeme formundaki farklı kesit alanlarının malzemenin doğal titreşim değerlerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma aşamaları ve uygulanan yöntemler Şekil 4.1’de yer almaktadır.



Şekil 4.1: Çalışma aşamaları grafiksel gösterimi.

4.1 Malzeme Seçimi

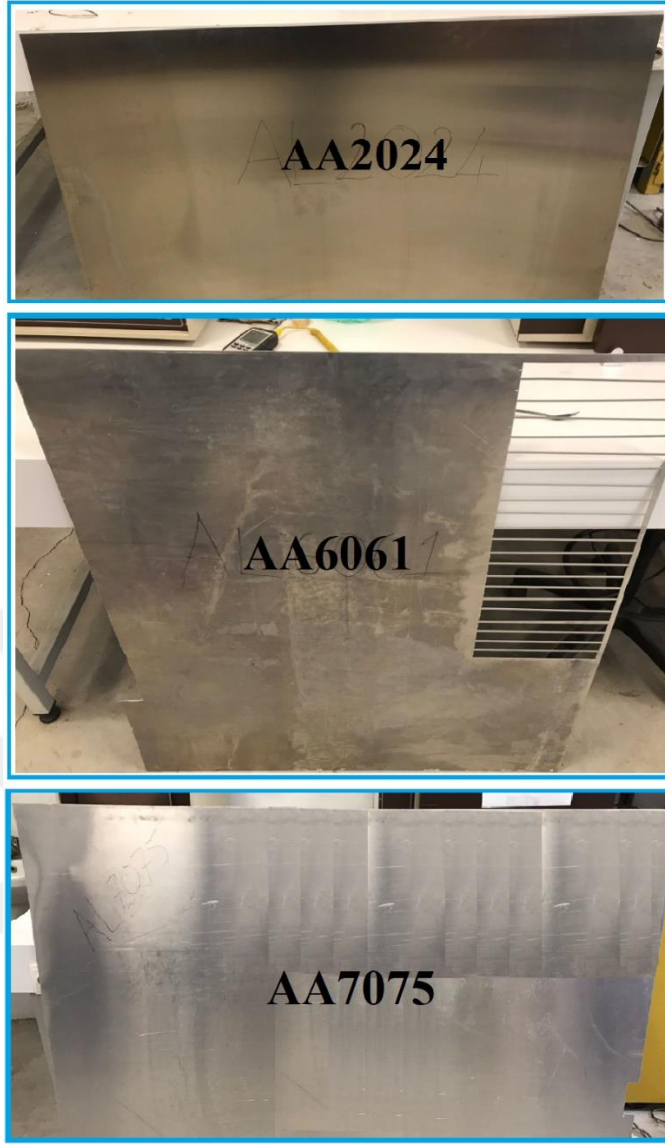
Çalışmada AA2024, AA6061 ve AA7075 serisi 2 mm et kalınlığına sahip Al alaşımlı levhalar incelememiştir. Çalışmada kullanılan AA2024 levha Üçen Alüminyum Paz. İth. İhr. San. ve Tic.Ltd.Şti., AA6061 ve AA7075 levhalar ise, Avas Metal San. ve Tic.Ltd.Şti şirketinden temin edilmiştir.. Al levhalar ticari kullanıma uygun olup fabrikasyon çıkışlı levha formunda temin edilmiştir. Temin edilen Al alaşımları fabrikasyon çıkışlı T0 ısıt işlemsiz, T3 çözündürme ısıt işlemi sonunda soğuk şekillendirilmiş ve oda sıcaklığında doğal yaşlandırılmış ve T6 Çözündürme sonrası suni yaşlandırılmış olmak üzere 3 farklı ısıt işlem koşuluna sahiptir. Çalışmada kullanılan AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarına ait fabrika çıkışlı uygulanan işlemler Tablo 2.7’de verilmektedir.

Tablo 4.1: Çalışmada kullanılan Al alaşımlarının fabrikasyon ısıt işlem türleri,

Malzeme Türü	Isıt İşlem Kodu
AA 2024	T0 Isıt İşlem
AA 6061	T3 Isıt İşlem
AA 7075	T6 Isıt İşlem

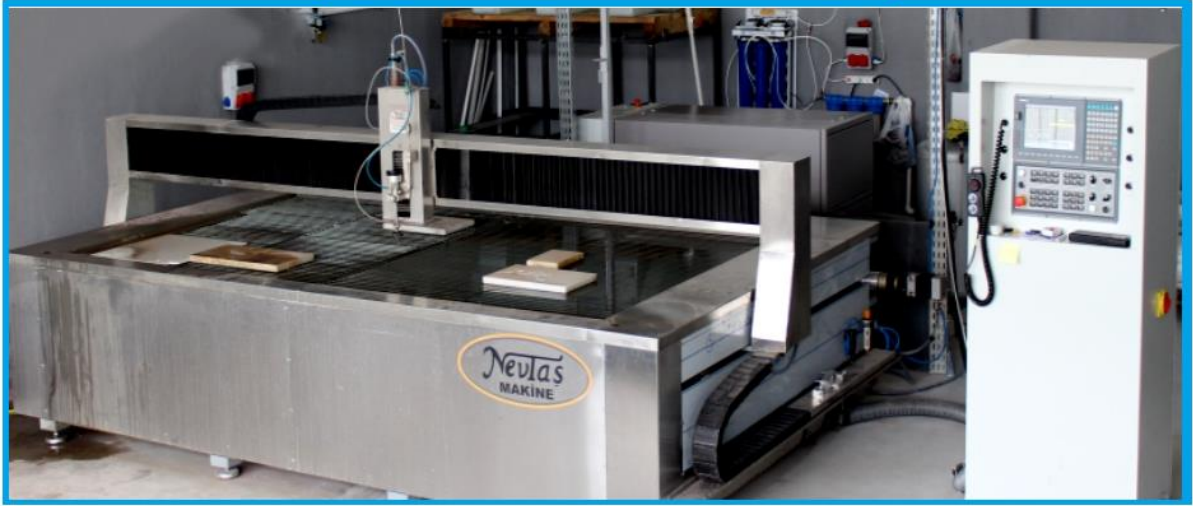
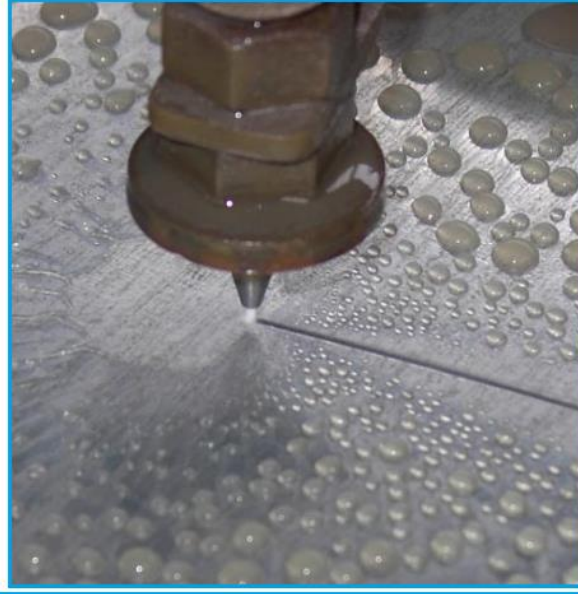
4.2 Numune Hazırlama

AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarının sıg-kriyojenik soğutma ve ısıt işlem aşamalarının uygulanması ve uygulanan işlemlerim malzemenin mekanik özellikleri, mikro yapısal özellikleri ve doğal titreşim değerlerindeki etkilerin incelenmesi yanı sıra analizi gerçekleştirilen Al alaşımlarının doğal titreşim değerinin farklı kesit alanlardaki değişimlerinin de incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Şekil 4.2’de yer alan 2mm et kalınlığa sahip AA2024, AA6061 ve AA7075 Al levhalardan farklı kesit alana sahip numune serileri üretilmiştir.



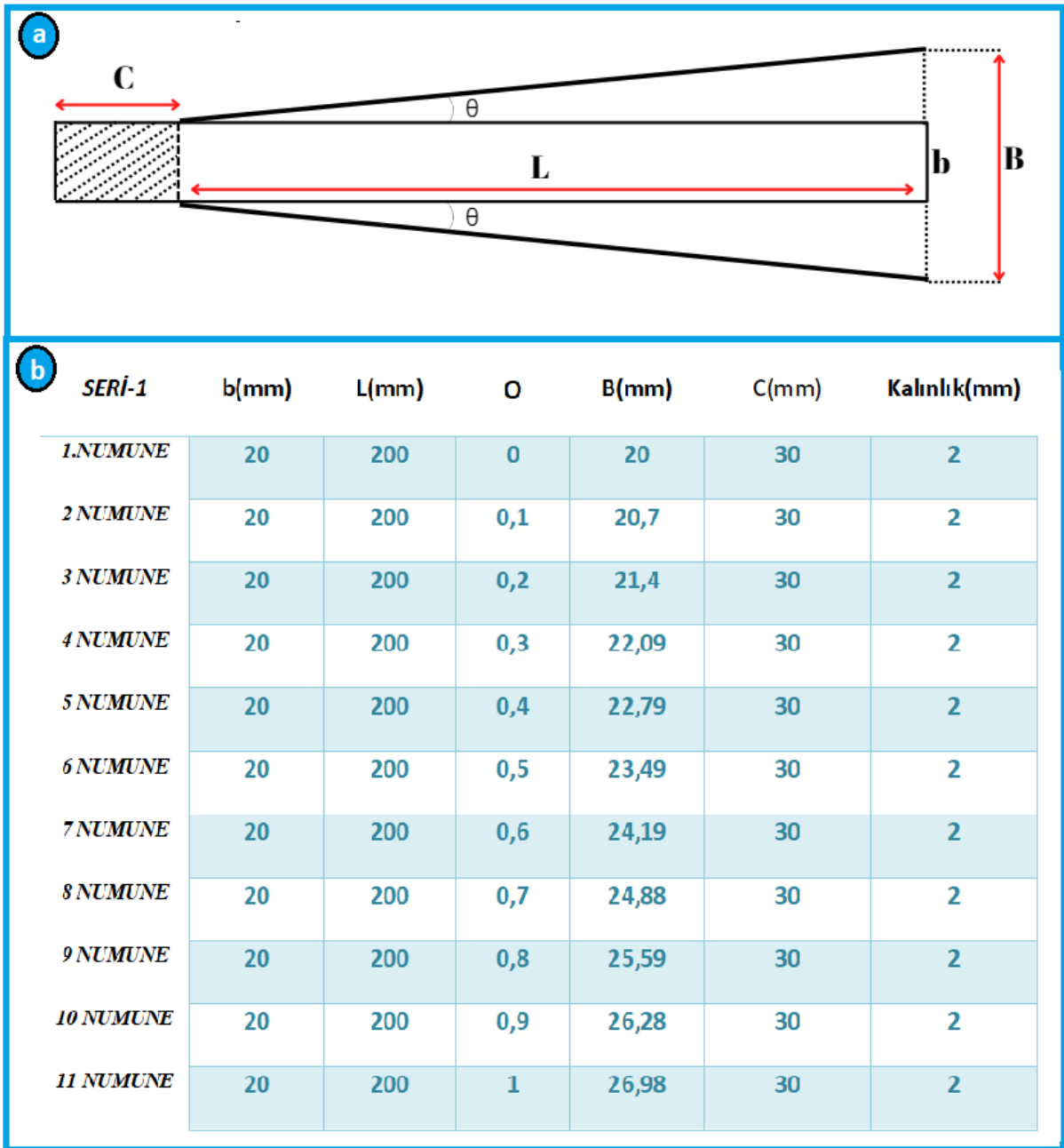
Şekil 4.2: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al levhalar.

Kesit alanda açısal olarak değişiklik gösteren numune boyutlarının hassas kesim işlemi ile açısal değer korunarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Levhaların kesim işleminde Majet Su Jeti Kesme San. ve Tic.Ltd. şirketi bünyesinde yer alan Nevtaş marka su jeti makinesi kullanılmıştır. Kesim işleminde kullanılan su jeti makinası temsili görseli Şekil 4.3'te yer almaktadır.



Şekil 4.3: Su jeti makine ve kesim temsili görüntüsü.

AA2024, AA6061 ve AA7075 2mm et kalınlığına sahip Al alaşımlarının ısıtılma ve sıgkriyojenik soğutma prosesleri uygulanmıştır. Uygulanan işlem basamaklarının malzemelerin mekanik, doğal frekans değerlerine etkileri ve malzemenin kesit alanda oluşturulan farklılıkların malzeme doğal frekans değerine etkilerinin araştırılabilmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan numune serileri 0° ila 1° derece aralığında açı değeri verilerek üretimi gerçekleştirilmiştir. Açı değeri sırasıyla 0°, 0,1°, 0,2°, 0,3°, 0,4°, 0,5°, 0,6°, 0,7°,0,8°, 0,9° ve 1° olmak üzere her Al serisi için 11 farklı açı değeri ile üretilen numunelerin kesit alandaki değişimlerin doğal titreşim değerine etkilerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri boyut ve açı bilgileri Şekil 4.4'te belirtilmiştir.

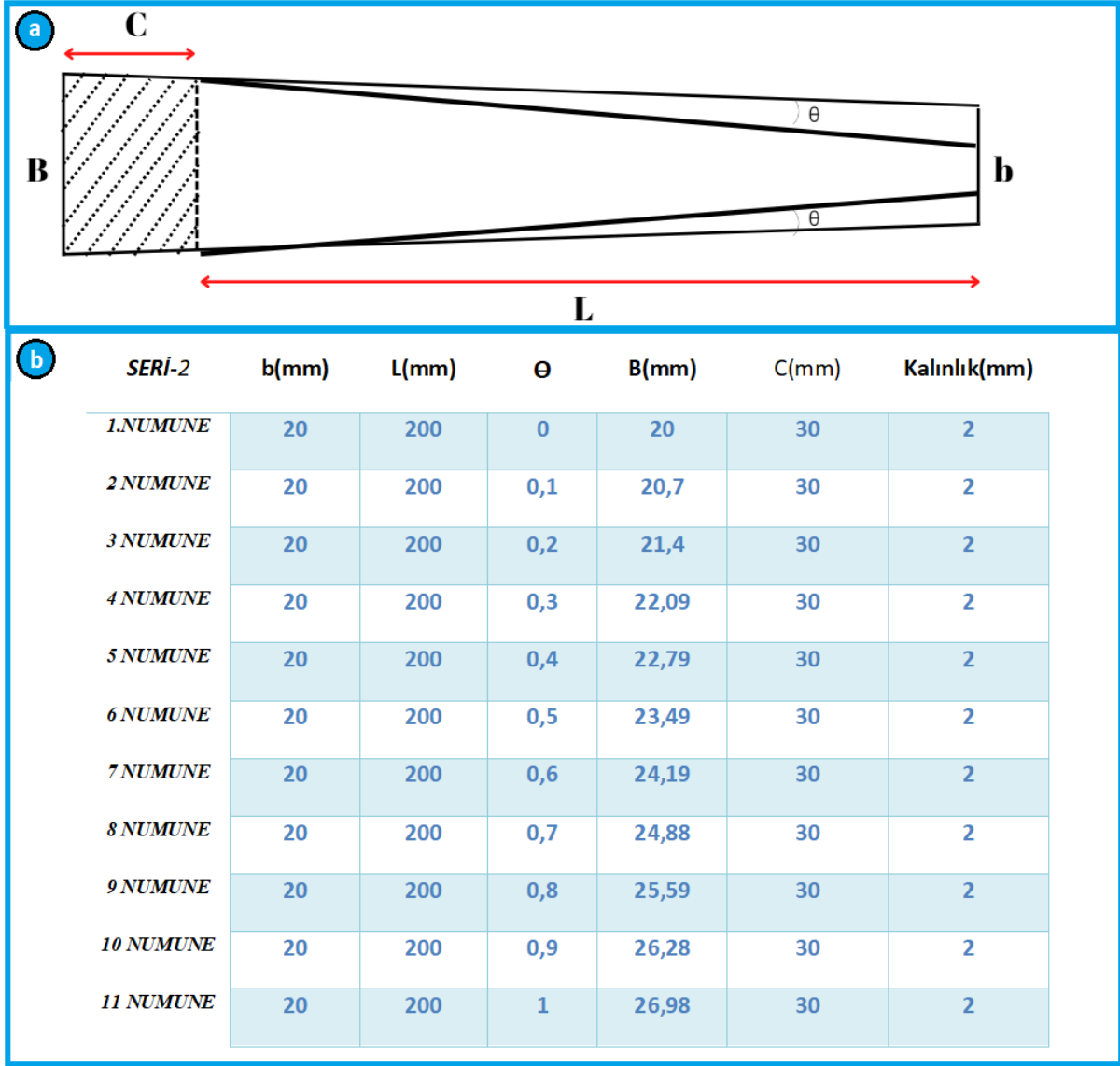


Şekil 4.4: Dar kenar test numune serisi, a) Numune şematik gösterimi, b) Numune boyut bilgisi.

Şekil 4.4'te belirtilen numune boyut özelliklerinde uygulanan ısıtılma prosesleri sonucunda elde edilen verilerin yanı sıra kesit alandaki düşük ölçekli açı değerlerinden büyük ölçekli açı değerine ulaşıldığında elde edilen numune kesit alan değişimlerinin malzemenin doğal frekansına etkileri ayrıntılı olarak inceleyebilme imkânı sağlamaktadır. Şekil 4.4.a'da Çalışmada kullanılacak numunelerin kesit alan değişimleri ve doğal frekans testinde sabitleme kenarı gösterilmektedir. Şekil 4.4.b'de kesit alanlarına göre numune boyut bilgileri belirtilmektedir. Doğal titreşim analiz testleri iki bölüm olarak ele alınmıştır. 1. bölümde Şekil 4.4.a'da yer alan iki boyutlu numune çiziminde siyah taralı bölge ile belirtilen nokta malzemenin titreşim analiz

cihazına bağlandığı bölge olarak belirlenmiştir. Şekil 4.4.b’de yer alan numune boyut bilgilerinde 0° açığa sahip numune et kalınlığı 2 mm genişliği 20 mm ve uzunluğu 230 mm olan dikdörtgen formuna sahip numunenin 200 mm ölçüm aralığı 30 mm titreşim düzeneğine sabitlenen kenarını temsil etmektedir. 1. Bölüm numunelerde kesit farklılıkları kesit alanda 0° ’den 1° aralığında $0,1^\circ$ ’de kesit alanda genişleme yönünde oluşturulmuştur.

Şekil 4.5.a’da çalışmanın 2.aşamasında kullanılacak numunelerin kesit alan değişimi ve doğal frekans testinde sabitleme kenarı, Şekil 4.5.b’de 2. Aşamada kesit alan farklılıklarına göre numune boyut bilgileri yer almaktadır. Doğal titreşim analiz testinin 2. Aşamasında Şekil 4.5’te belirtilen numune çizimlerinde kırmızı ile belirtilen kenar bölgeleri doğal titreşim test cihazına bağlanma kenarı olarak belirlenmiştir. 1. Bölümden farklı olarak titreşim analiz cihazına sabit ölçülü kenarların aksine açısız olarak farklı kesit alanına sahip numune kenarları bağlanmıştır. 1. bölümde sabit ölçülerde dikdörtgen formuna sahip numune köşesi cihaz içerisinde kalarak açısız farklılıklardan kaynaklı numune kesit alandaki artış etkisinin doğal titreşime etkisi incelenmiştir. 2. Bölümde ise doğal titreşim cihazı içerisinde numunenin açısız olarak değişim gösteren kesit alanı farklı numune kenarlarından bağlanmış ve kesit alandaki açısız olarak azalmaların malzemelerin doğal titreşim değerlerine etkilerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Çalışmaya uygun numune tasarım ve çizimleri AUTOCAD 2020 programı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5: Geniş kenar numune serisi, a) Numune şematik gösterimi, b) Numune boyut bilgisi.

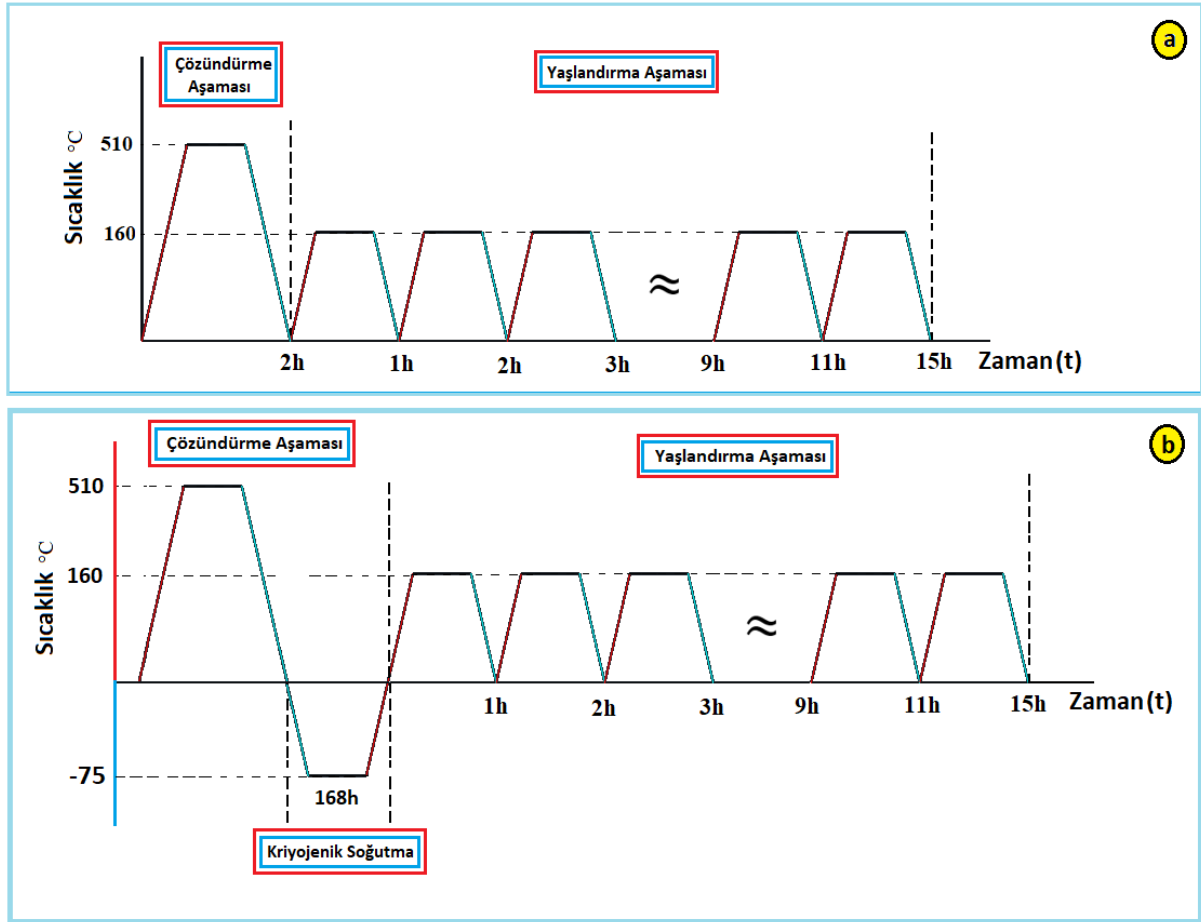
AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarından numuneler su jeti ile kesme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Numune serilerinin düz ve 0° ile 1° aralığında $0,1^\circ$ ’luk derece artış oranı ile farklı kesit alanına sahip numune serilerinin üretim sonrası gösterimi Şekil 4.6’da belirtilmektedir.



Şekil 4.6: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarının su jeti ile kesim sonrası kesim açısı ve kesim yönü görüntüleri.

4.3 Isıl İşlem Aşaması

Çalışmada kullanılan Al serileri için oluşturulan numuneler fabrikasyon çıkışlı ısıtıl işlem uygulanmış olması nedeni ile malzeme özelliklerinin eşit ısıtıl işlemli duruma getirmek amacıyla çözündürme ısıtıl işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem uygulamaları Pamukkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Döküm laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada uygulanan ısıtıl işlem analizleri 2 bölümde ele alınmıştır. Çalışmanın 1. bölümünde çözündürme ve yaşlandırma ısıtıl işlemi uygulanmış numune serileri incelenmiştir. Çalışmanın 2. bölümünde Çözündürme sonrası sıg-kriyojenik soğutma uygulanan numuneler yaşlandırılmıştır Uygulanan ısıtıl işlem basamakları Şekil 4.7’de belirtilmiştir.



Şekil 4.7: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarına uygulanan ısıtım işlem basamakları, (a) Çözündürme sonrası yaşlandırma işlemi, (b) Çözündürme sonrası sıf-kriyojenik soğutma ve yaşlandırma ısıtım işlem basamakları.

AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serisine tek fazdan oluşan homojen bir çözeltiye sahip mikroyapının elde edilmesi için 510°C sıcaklıkta 2 saat çözündürme ısıtım işlemi uygulanmıştır. Çözündürme ısıtım işlemine takriben numunelere aşırı doymuş katı eriyik yapının elde edilmesi için su verme işlemi uygulanmıştır. Çözündürme ve su verme işlemlerine takriben Al alaşım serilerinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile yaşlandırma ısıtım işlemi uygulanmıştır. Çözündürme + su verme ısıtım işlemi ile elde edilen aşırı doymuş katı faz durumunda olan yapı çözündürme ısıtım işleminde uygulanan sıcaklık değerinin altında bir sıcaklık değerinde belirli süre ve periyotlarda bekletilmesi ile Al alaşım serilerinin sertlik değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. Yaşlandırma ısıtım işlemi her Al alaşım serisi için 160°C sıcaklık değeri uygulanmıştır. Her numune serisi için 1'er saatlik periyotlar aralığında fırından alınarak suda soğutma yöntemi ile soğutulmuş ve sertlik değerleri analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7.a'da belirtilen ısıtım işlem basamakları çalışmanın 1. bölümünü oluşturmaktadır. Bu bölümde çözündürme sonrası kontrollü yaşlandırma ısıtım işlem basamaklarının malzemenin sertlik,

mikroyapı ve doğal titreşim değerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada numunelere uygulanan ısıtma işlemi için Nüve FN 500 ısıtma fırını kullanılmıştır.

1. Bölüm Uygulanan işlem basamakları;

- Çözündürme Isıtma İşlemi

AA2024, AA6061 ve AA 7075 Al alaşım serilerinden elde edilen numunelere 510°C sıcaklıkta 2 saat çözündürme ısıtma işlemi uygulanmıştır.

- Su Verme İşlemi

Numunelere aşırı doymuş katı eriyik elde edilebilmesi su verme işlemi uygulanmıştır.

- Yaşlandırma Isıtma işlemi

AA2024, AA6061, AA7075 Al alaşım serilerinden elde edilen numunelere çözündürme + su verme ısıtma işlemine takiben 160°C sıcaklıkta 1'er saatlik periyotlar ile yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmıştır.

Şekil 4.7.b'de yer alan ısıtma işlem parametreleri çalışmanın 2. bölümüne aittir. 1. Bölümde uygulanan çözündürme sonrası yaşlandırma ısıtma işlemine ilave olarak çözündürme sonrası AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlı numunelere sıg-kriyojenik soğutma işlemi uygulanmıştır. Sıg-kriyojenik soğutma sonrası Al serilerine yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmıştır.

2. Bölüm Uygulanan işlem basamakları;

- Çözündürme Isıtma İşlemi

AA2024, AA6061 ve AA 7075 Al alaşım serilerinden elde edilen numunelere 510°C sıcaklıkta 2 saat çözündürme ısıtma işlemi uygulanmıştır.

- Su Verme İşlemi

Numunelere aşırı doymuş katı eriyik elde edilebilmesi su verme işlemi uygulanmıştır.

- Sıg-kriyojenik soğutma

AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerinden elde edilen numuneler çözündürme sonrası $\approx -75^{\circ}\text{C}$ 'de 168 saat sıg-kriyojenik soğutma işlemi uygulanmıştır.

- Yaşlandırma Isıtma işlemi

AA2024, AA6061, AA7075 Al alaşım serilerinden elde edilen numunelere çözündürme ısıtma işlemi ve sıg-kriyojenik soğutma işlemlerine takiben 160°C sıcaklıkta 1'er saatlik periyotlar ile yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmıştır.

Çözündürme ve yaşlandırma ısıtma işlemine aşamalarına ait görüntüler Şekil 4.8'da belirtilmektedir.

Çözündürme ısıtma işlem aşaması (510°)

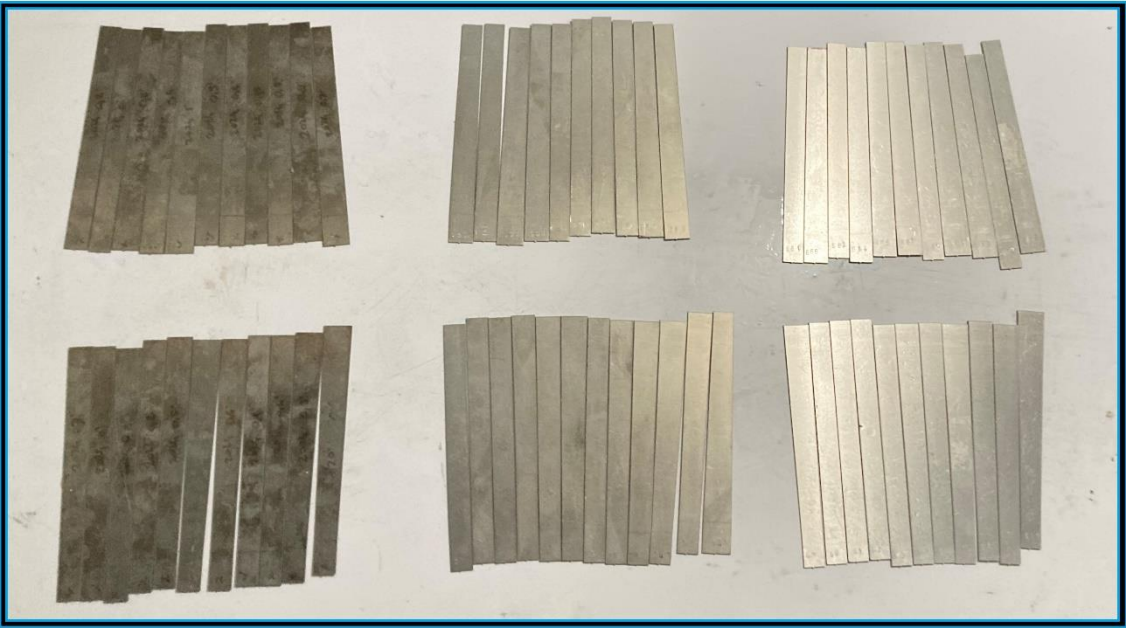
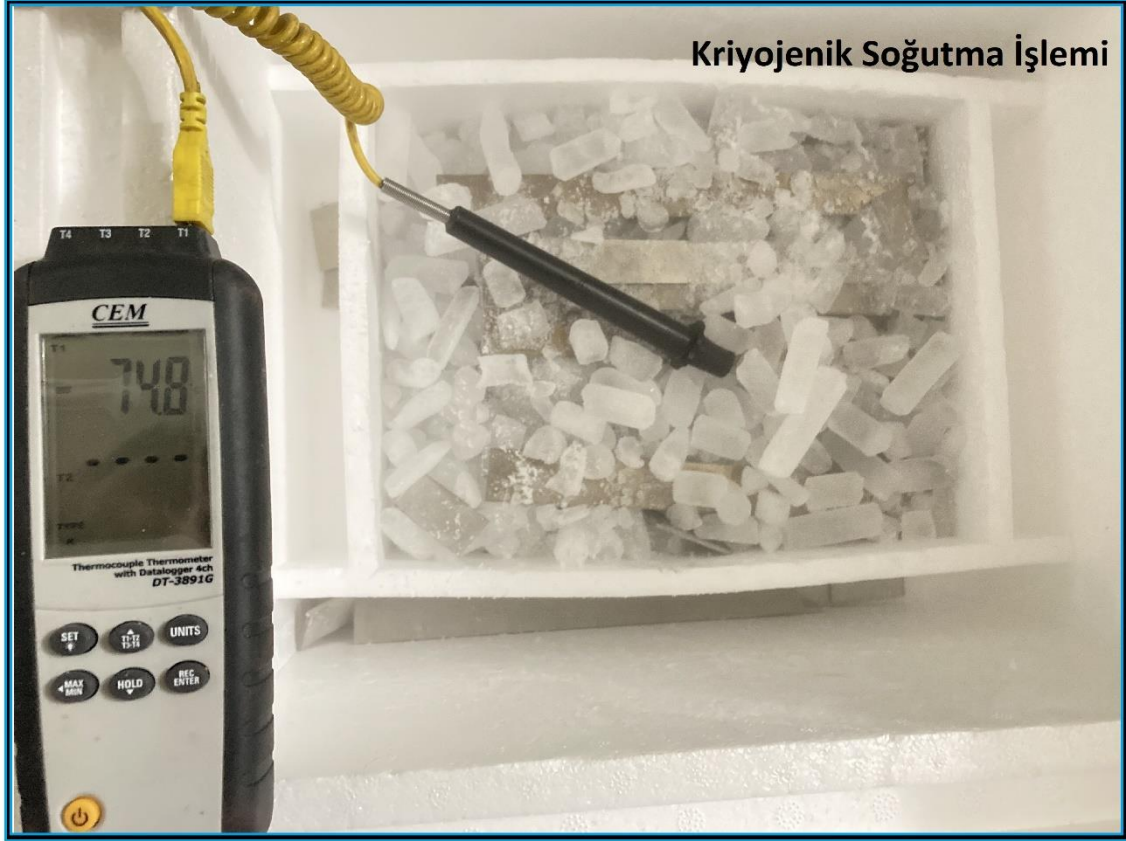


Yaşlandırma ısıtma işlem aşaması (160°)



Şekil 4.8: Isıl işlem uygulama aşamaları.

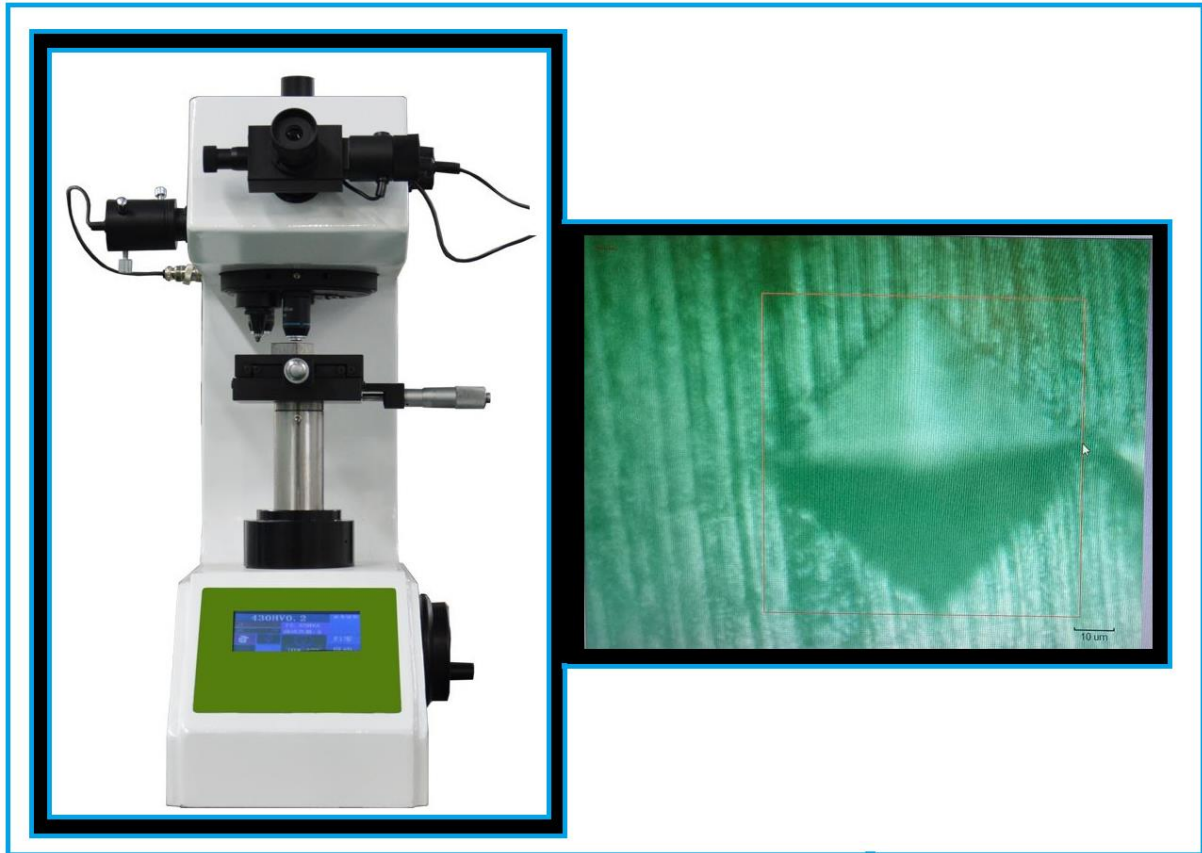
Soğutma işleminde soğutucu kaynak olarak kuru buz ile soğutma yöntemi kullanılmıştır. Sığ-kriyojenik soğutma işlemine ait uygulama verileri Şekil 4.9'da belirtilmektedir.



Şekil 4.9: Sığ-kriyojenik soğutma işlemi uygulama aşaması.

4.3.1 Sertlik Analizi

AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine uygulanan ısıl proseslerin Al alaşım serilerinin mekanik özelliklerden sertlik değerine etkilerinin incelenebilmesi amacı ile Al alaşım serilerine uygulanan her işlem basamağı sonunda 100 gram yük altında 10 saniye inme hızında her bir numune için 5 noktadan Vickers sertlik testi uygulanmıştır. Vickers sertlik analizleri Pamukkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan Hardway Marka DV-1AT-4.3 model Vickers sertlik ölçüm cihazından yararlanılmıştır. Al alaşım serilerinin sertlik analizi iki bölüm altında değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde 510°C çözündürme ve 160°C yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanmış Al alaşım serilerinin her işlem süresi sonunda vickers sertlik değerleri analiz edilmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde 510°C’de çözündürme ısıl işlemi sonunda $\approx -75^{\circ}\text{C}$ ’de sığ-kriyojenik soğutma işlemi ve 160° C’de yaşlandırılmış Al alaşım serilerinin her işlem basamağı sonunda Vickers sertlik değerleri analiz edilmiş ve yorumlanmıştır. Vickers sertlik analizlerinin gerçekleştirildiği cihaz şekil 4.10’da verilmektedir.



şekil 4.10: Vickers sertlik analiz cihaz görüntüsü.

4.3.2 Metalografik Analiz

Çalışmada Al alaşımlarına uygulanan ısıl işlem basamaklarının malzemelerin karakteristik özelliklerinin incelenmesi numune yüzeyleri Pamukkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarında yer alan METKON marka otomatik zımpara cihazı ve yüzey dağlama işlemlerinde kullanılan çeker ocak kullanılmıştır. Şekil 4.11’de otomatik zımpara cihazı ve çeker ocak belirtilmiştir.



Şekil 4.11: Numune hazırlama ekipmanları, a) Otomatik zımpara parlatma makinesi, b) dağlama işleminde kullanılan çeker ocak.

Numune karakterizasyon işlemleri öncesinde numune hazırlama işlemleri zımparalama, parlatma ve dağlama süreçleri ile gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işleminde yüzeyde üretim ve uygulanan işlemlerden kaynaklı matlık ve çiziklerin giderilme işleminde kademeli zımparalama işlemi yapılmıştır. Zımparalama işlemi sırasıyla 180, 240, 400, 600, 800, 1000 mesh zımparalama işlemi, 3 mikron parlatma keçesi ve 3 mikron elmas parlatma solüsyonu ile parlatma işlemi gerçekleştirmiştir. Zımpara ve parlatma işlemi sonunda malzeme yüzeyinde tane sınırlarının belirgin hale getirilmesi amacı ile %2 HF + %3 HCl + % 5HNO₃ + %90 saf su birleşimine sahip KELLER çözeltisi kullanılmıştır.

Çalışmada AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine uygulanan ısıl işlem ve sığ-kriyojenik soğutma işlemlerinin malzemenin yüzeySEL ve iç yapı etkilerinin belirlenebilmesi amacı ile Al serilerine sırasıyla optik mikroskop ve FESEM analizi gerçekleştirilmiştir.

Analiz uygulanan Al alaşım serilerinin optik mikroskop analizinde elde edilmesi amaçlanan veriler;

- Isıl ve soğutma işlemleri sonrasında iç yapıda yer alan tane özelliklerinin incelenmesi.
- Malzemenin üretim ve kesme kaynaklı olarak yüzey özelliklerinde kırılma, çatlak vb. durumların tespiti.
- Malzemenin üretim yöntemi ve geçmiş döneme ait malzemeye uygulanan işlemler hakkında incelemeler.

Uygulama analizlerinde kullanılan cihaz görsel ve bilgileri Şekil 4.12’de belirtilmektedir. Şekil 4.12 (b)’de yer alan yüzeysel analiz işlemi için X50 ile X1000 büyütme oranına sahip Nikon Eclipse Marka LV150NL optik mikroskop cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.12 (b)’da yer alan ayrıntılı yüzey analizi için Pamukkale Üniversitesi İleri Araştırma ve Teknolojiler Merkezi bünyesinde yer alan ZEISS FESEM marka Supra 40 VP model cihazı çalışmada kullanılmıştır.



Şekil 4.12: Yüzey analiz işlemlerinde kullanılan cihazlar, a) 50X – 1000X büyütme oranına sahip optik mikroskop cihaz görüntüsü, b) Ayrıntılı yüzey analizi işleminde kullanılan FESEM analiz cihazı.

Yüzey analizleri yanı sıra malzemeye uygulanan ısıl işlem süreçlerinin malzeme yapısına etkilerinin belirlenmesi, yapı içerisinde bulunan veya ısıl işlem süreçleri sonunda yapı içerisine çökelen fazların belirlenmesinde numunelere X-Ray diffraction (XRD) analizi uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan XRD analizi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme

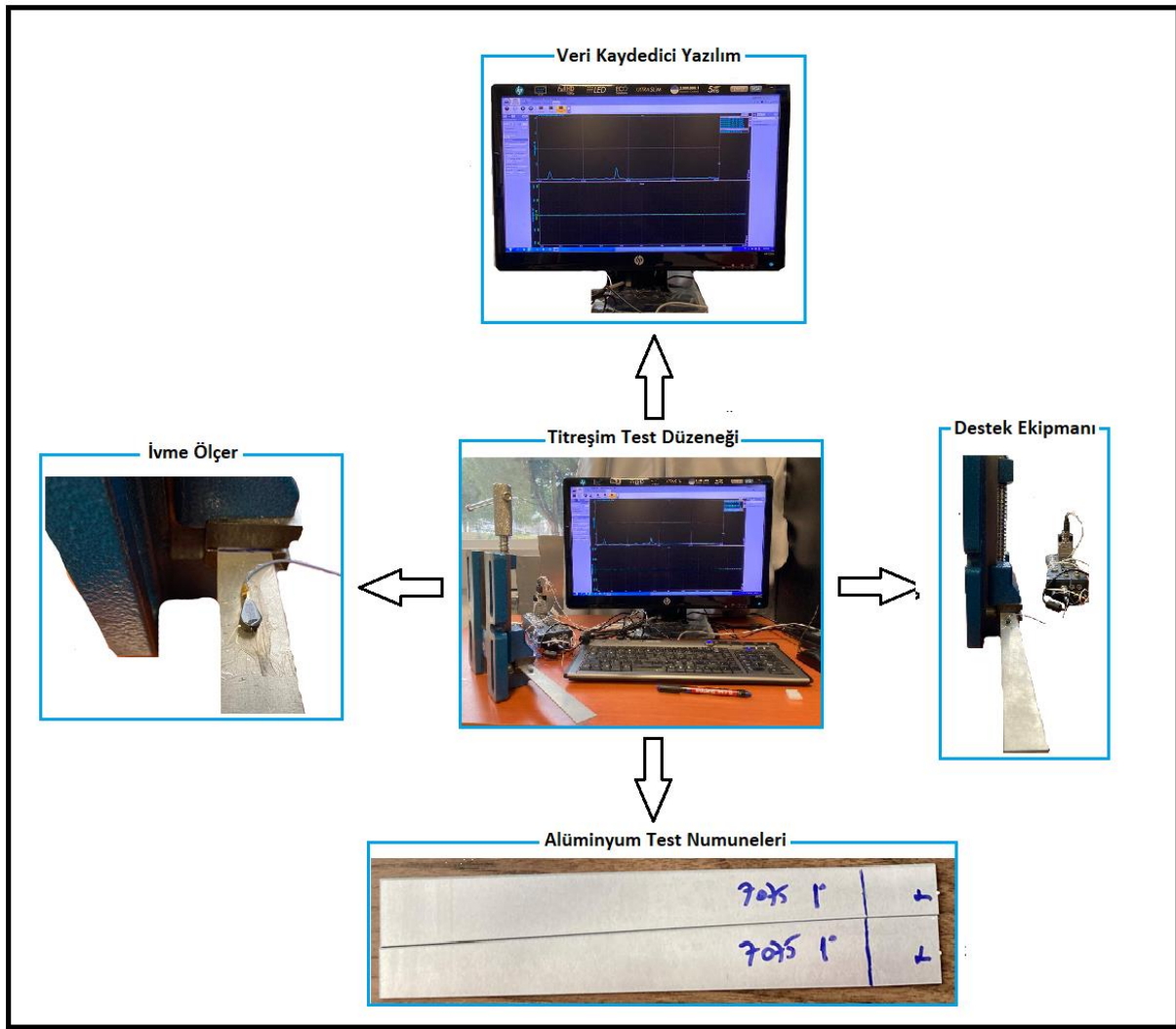
Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında yer BRUKER marka D8 model XRD cihazı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan XRD cihaz görseli Şekil 4.13'te yer almaktadır.



Şekil 4.13: XRD analiz cihazı.

4.3.3 Doğal Frekans Analizi

Çalışma kapsamında AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine uygulanan 0° ile $0,1^\circ$ derece aralığında $0,1^\circ$ artış oranıyla ($0,1^\circ, 0,2^\circ, 0,3^\circ \dots 1^\circ$) açısal kesim işlemi uygulanarak farklı kesit alanına sahip numuneler üretilmiştir. Farklı kesit alanına sahip Al alaşım serilerine iki farklı kademe ısıt işlem uygulanmıştır. Farklı kesit alanına sahip Al alaşım serilerine uygulanan iki farklı ısıt işlem parametrelerinin malzemenin doğal titreşim değerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan doğal frekans değer ölçümlerinde kullanılan test düzeneği Şekil 4.14'te yer almaktadır.



Şekil 4.14: Doğal titreşim frekansı test düzeneği ve birleşenleri.

Şekil 4.14’te belirtilen doğal titreşim test düzeneğini oluşturan birleşenler incelendiğinde sinyal alan bir PCB35C22 model ivme ölçer, PCB35C22 model Piezoelectric ICP Accelerometer, ivme ölçerden gelen sinyalleri toplamaya yarayan DEWE 43A veri toplama cihazı, veri toplama cihazından gelen sinyalleri almaya ve okumaya yarayan DEWESOFT X titreşim programı ve programdan gelen sinyalleri grafiğe aktaran analiz arayüzü fast fourier transform (FFT)’den oluşmaktadır. Test numunesi olarak kısa ve uzun kanar olarak tabir edilen açılı ve açısız kesim uygulanmış Al alaşım serileri kullanılmıştır.

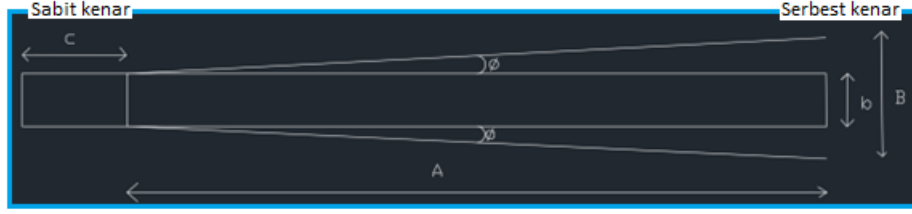
Çalışmada doğal frekans analizi uygulanan numune serileri ısıtma soğutma özelliklerine sahip iki farklı ısıtma maruz bırakılmış ve uygulanan her bir işlem basamağı sonunda Al numunelerin doğal frekans değeri ölçümü gerçekleştirilmiştir. Doğal titreşim ölçüleri uygulanan numunelere uygulanan ısıtma basamaklarına göre iki grupta incelenmiştir. Bu gruplar;

- 1- Ham numune doğal frekans analizi, 510°C sıcaklıkta çözündürme sonrası doğal frekans analizi, 160°C sıcaklıkta 1'er saatlik periyotlarla yaşlandırma işlemi sonunda her 1'er saat sonunda doğal frekans analizi uygulanmış numune serisi.
- 2- Ham numune doğal frekans analizi, 510°C sıcaklıkta çözündürme sonrası doğal frekans analizi, $\approx -75^{\circ}\text{C}$ 'de 168 saat sıg-kriyojenik soğutma sonrası doğal frekans analizi, 160°C sıcaklıkta 1'er saatlik periyotlarla yaşlandırma işlemi sonunda her 1'er saat sonunda doğal frekans analizi uygulanmış numune serisi.

Al alaşım serilerine uygulanan yukarıda belirtilen iki farklı ısıtma işlem başmaklarında kullanılan test numuneleri 0° ile 1° açı değerlerinde kesilmiş farklı kesit alanına sahip Al alaşımlarının her biri için uygulanmış ve doğal titreşim testine tabi tutulmuştur. Numuneler test düzeneğinde yer alan destek ekipmanına bir ucu sabit diğer ucu boşta kalacak şekilde destek ekipmanına yerleştirilerek ankastre düzen elde edilmiştir. Her bir Al serisi için destek ekipmanına sabitlenen kenar uzun (açılı) ve kısa (açısız) kenar olacak şekilde düzeneğe yerleştirilmiştir. Test düzeneği sabitlenen kenar uzun kenar ise titreşim için gerekli kuvvetin uygulandığı ve titreşim etkisinin başladığı nokta kısa kenar, sabitlenen kenar kısa kenar ise titreşim için gerekli kuvvetin uygulandığı ve titreşim etkisinin başladığı nokta uzun kenar olacak şekilde oluşturulmuştur. Bu işlem ile amaçlanan 0° ile 1° derece arası açılar ile farklı kesit alanına sahip üretilen numunelerin kesit alandaki açısal değişime bağlı olarak boyutsal değişimin numunenin doğal frekans değerine etkileri incelenmiştir.

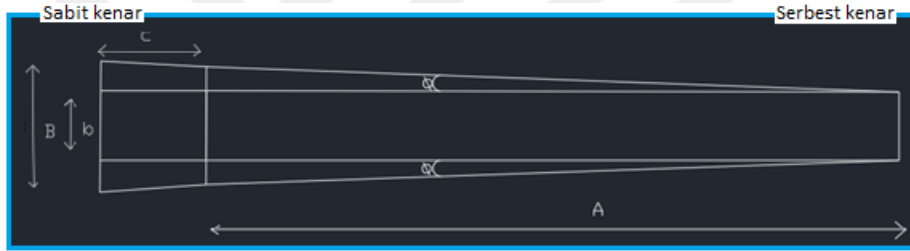
AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerinden elde edilen numunelerin kesit alandaki değişimin ve uygulana ısıtma işlemlerin doğal frekans değerine etkilerinin araştırılmasında hazırlanan test numunelerinin oluşturalar ankastre düzeneğinde bağlanma kenarına göre numune serileri 2'ye ayrılmıştır.

1.Seri Ankastre düzeneğinde destek ekipmanına sabitlenen kenar kısa, titreşim etkisinin başlangıç noktası uzun kenar olan numune serisini oluşturmaktadır.1. seri numune kenar bilgileri Şekil 4.15’te verilmektedir.



Şekil 4.15: 1. Seri test numunesinin ankastre test düzeneğine bağlanma konumu.

2. Seri Ankastre düzeneğinde destek ekipmanına sabitlenen kenar uzun, titreşim etkisinin başlangıç noktası kısa kenar olan numune serisini oluşturmaktadır. 2. seri numune kenar bilgileri Şekil 4.16’te verilmektedir.



Şekil 4.16: 2. Seri test numunesinin ankastre test düzeneğine bağlanma konumu.

5. Bulgular

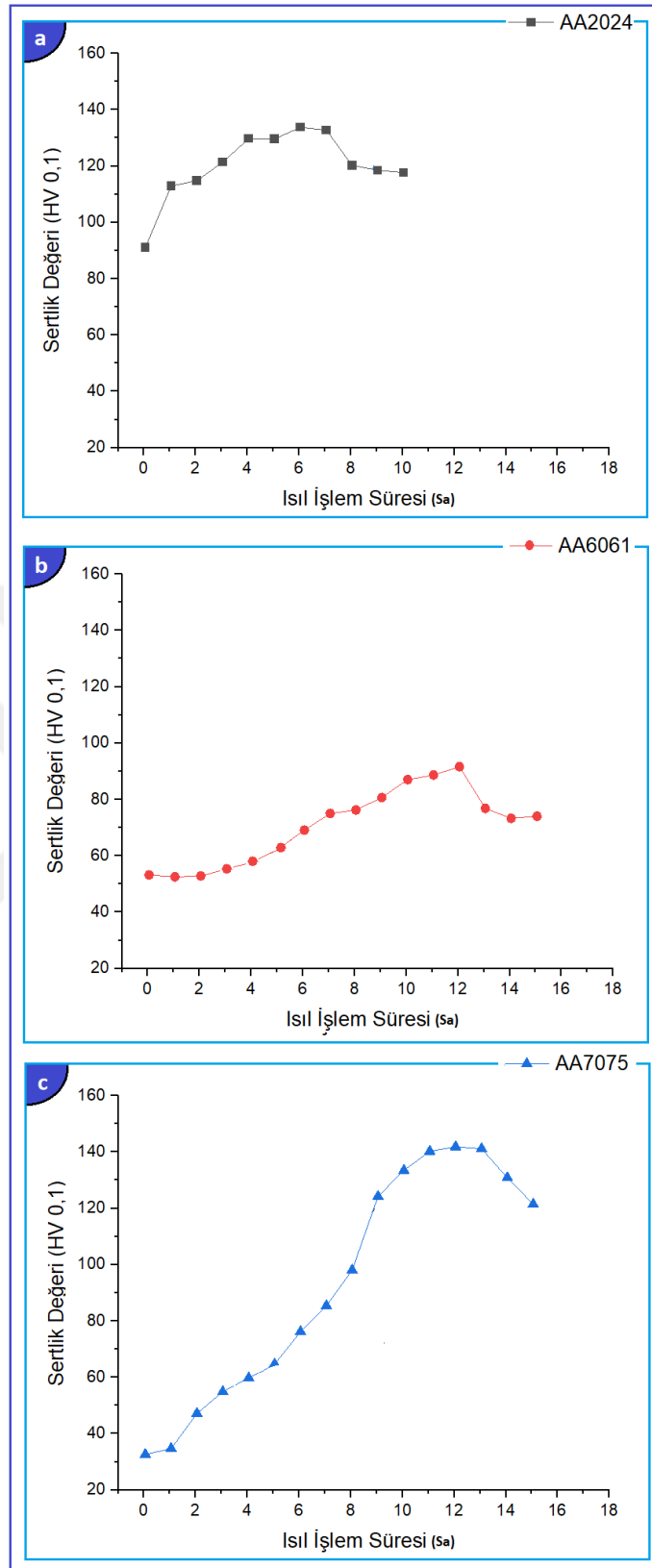
Çalışmada çeşitli kesit alanına sahip AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait 2 mm kalınlığa sahip numune serilerinin üretimi gerçekleştirmiştir. Hazırlanan numunelerin ısıtma işlem etkilerinin incelenmesi ve uygulanan işlemlerin malzemelerin doğal titreşim değerlerinin etkilerinin incelenmesi amacı ile çözündürme ve yaşlandırma ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Çözündürme ve yaşlandırma aşamalarına ek olarak Al alaşımlarının düşük sıcaklık altındaki etkilerin incelenmesi amacı ile numunelere 510°C sıcaklıkta 2 saat çözündürme ısıtma işlemi sonunda $\sim -75^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 168 saat sıg-kriyojenik soğutma işlemi ve 160°C sıcaklıkta her bir Al alaşım serisi için maksimum sertlik değerini elde edildiği süre boyunca yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmıştır. Sıg-kriyojenik işlem sürecinde kullanılan soğutmalarda oluşturulan ortama bağlı olarak farklı soğutma sıcaklık ve sürelerinin olduğu görülmektedir (Enes ve diğ. 2021)(Gül ve diğ. 2022).

Sıg-kriyojenik işlem öncesinde numunelere çözündürme ısıtma işlemi uygulanarak malzeme üzerine uygulanan işlem etkilerinin sıfırlanması sağlanmıştır. Çözündürme sonrası sıg-kriyojenik işlem ve yaşlandırma işlemine uygulanmıştır. Çözündürme, yaşlandırma ve sıg-kriyojenik işlemlerin malzemelerin mekanik, karakteristik ve doğal titreşim özelliklerine etkileri incelenmiştir. Uygulanan her ısıtma ve soğutma işlemleri sonunda numunelerin sertlik özellikleri ve doğal titreşim özellikleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

5.1.1 Sertlik Analizi

Çalışmada Al alaşım serilerine uygulanan çözündürme, sıg-kriyojenik soğutma ve yaşlandırma ısıtma işlemlerinin Al alaşım serilerinin sertlik değeri üzerindeki etkileri incelememiştir. Yapılan inceleme sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.1’de belirtilmiştir.

Şekil 5.1’de yer alan AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarına ait sertlik verileri incelendiğinde uygulanan ısıtma işlem aşamalarının malzemelerin sertlik değerlerine etkisinin olduğu belirlenmiştir. Al alaşım serilerine uygulanan 510°C sıcaklıkta 2 saat çözündürme sonrası su verme ısıtma işlemi ile iç yapıda oluşan aşırı doymuş katı yapı elde edilmiş, uygulanan ısıtma işlem aşamasında süre ve sıcaklık değerlerinin AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serileri için uygun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.1: Al alaşımlarına uygulanan ısıt işlem sonrası sertlik değerleri, a) AA2024 Al alaşıma ait sertlik değerleri, b) AA6061 Alaşıma ait sertlik değeri, c) AA7075 Al alaşıma ait sertlik değeri.

Şekil 5.1.a'da AA2024 Al alaşım serisine ait ısıtıl işlem aşamalarına bağlı olarak sertlik değişimleri belirtilmektedir. Grafikte belirtilen başlangıç sertliği malzemelerin çözündürme ısıtıl işlemi ardından ölçülen değeri 73HV Vickers sertlik değerinin temsil etmektedir. Çözündürme + su verme sonrası 160°C sıcaklık değerinde 1'er saatlik periyotlar ile uygulanan yaşlandırma ısıtıl işlemi malzeme sertlik değerinin maksimum değere ulaşması ve ardından tekrar sertlik değerinde düşüşün gözlemlendiği süre aralığında işlem uygulanmıştır. AA2024 Al alaşım serisi için yaşlandırma ısıtıl işlemine bağlı maksimum sertlik değeri 7 saat sonunda 131HV olarak ölçülmüştür. 7 saat sonunda devam edilen yaşlandırma işlemi ile malzeme sertlik değerinin azalmaya başladığı görülmüştür. Sertlik değerlerinde yaşlandırma süresine bağlı olarak oluşan çökeltinin boyutlarındaki artış ve sayılarındaki azalmadan kaynaklı olarak sertlik değerinin artış ve azalına etkisi olduğu düşünülmektedir. Yaşlandırma ısıtıl işleminin 8. ve 9. saatlerde sertlik değeri 117HV değerine düşmüştür (Wang ve diğ. 2006).

Şekil 5.1.b'de AA6061 Al alaşım serisi için grafikte yer alan başlangıç değeri olarak çözündürme sertliği alınmıştır. 510°C sıcaklıkta 2 saat uygulanan ve su verme ile soğutulan AA6061 Al alaşım serisi için Vickers sertlik değeri 42HV olarak ölçülmüştür. Çözündürme sonrası uygulanan 160°C sıcaklıkta 1'er saatlik periyotlar ile maksimum sertliği gözlemlendiği ve devamında sertlik düşüşünün gözlemlendiği noktaya kadar yaşlandırma ısıtıl işlemi sürdürülmüştür. AA6061 serisi Al alaşımı için maksimum sertlik değeri 12. Saatte 93HV olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu değer sonrasında yaşlandırma işlemi devam edilmiş ve 13-15 saat uygulanan yaşlandırma işleminde sertlik değerinin 93HV'den 74HV değerine gerilediği gözlemlenmiştir ve AA6061 Al alaşımı için yaşlandırma işlemi tamamlanmıştır.

Şekil 5.1.c'de AA7075 serisi Al alaşımı için çözündürme sonrası alınan sertlik analizinde elde edilen veri 31HV olarak ölçülmüştür. Çözündürme işlemi sonrası uygulanan 1'er saatlik periyotlar halinde uygulanan yaşlandırma ısıtıl işlemi ile malzemenin çözündürme sonrası yaşlandırma ısıtıl işlemi ile sertlik özelliklerinin değişimleri incelenmiştir. Buna bağlı olarak AA7075 Al alaşım serisi için maksimum sertlik değeri 13. Saatte 143HV olarak ölçülmüştür. 13 saat sonunda yaşlandırma ısıtıl işlemine devam edilmiştir. 14 ve 15. saatlerde sertlik değerinde kademeli olarak düşüşler gözlenmiştir. 15. Saat sorusunda ölçülen sertlik değeri 143HV değerinden 120HV değerine düşmüştür. Uygulanan işlem basamakları sonunda AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait sertlik değerlerinin karşılaştırılması Şekil 5.2'de belirtilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, benzer alaşımlar için uygulanan çözündürme

+ su verme + yaşılandırma ısıı işlemleri ile sertliklerin arttığı görülmüştür (Aksöz ve diğ. 2007)(Aksöz ve diğ. 2013)

AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşıım serilerine ait Vickers sertlik değeri incelenğinde 0. Saat olarak belirtilen noktada 3 Al alaşıım serisi için 510°C 2 saat çözündürme ısıı işleminde sonunda elde edilen Vickers sertlik değeri belirtmektedir. Çözündürme + su verme sonrası uygulanan 1'er saatlik periyotlar ile 160°C sıcaklıkta uygulanan yaşılandırma ısıı işlem basamaklarını belirtmektedir. Al alaşıım serilerine ait çözündürme + su verme sonrası elde edilen sertlik değeri incelenğinde en yüksek sertlik değeri AA2024 en düşük sertlik değeri AA 7075 Al alaşıımına ait olduğu görülmektedir. 1'er saatlik periyotlarla uygulanan ve her saat sonunda sertlik analizi uygulanan Al alaşıım serileri 160°C sıcaklıkta uygulanan yaşılandırma ısıı işlemi sonunda en yüksek sertlik değeri AA7075 Al alaşıım serisi en düşük sertlik değeri ise AA6061 Al alaşıım serisine ait olduğu görülmektedir.

Al alaşıım serilerine uygulanan ısıı işlem parametrelerinin belirlenmesinde çözündürme ısıı işlemi ve yaşılandırma ısıı işlemi için farklı sıcaklık değerlerinde ve farklı ısıı işlem sürelerinde ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonunda Al serileri için optimum mukavemet özelliklerinin sağlanabildiği ortak ısıı işlem sıcaklığı ve süresi belirlenmiştir. Hazırlık aşamasında her Al alaşıım serisi aynı çözündürme sıcaklığı 490°C sıcaklıktan 560°C sıcaklığa 10'ar derecelik artışlar ile sırasıyla 490°C, 500°C, 510°C, 510°C, 530°C, 540°C, 550°C, 560°C sıcaklıklarda 1,2 ve 3 er saatte sürelerde eşit ortam şartlarında çözündürme ısıı işlemi uygulanmış uygulanan işlem basamakları sonunda malzemelerin Vickers sertlik değeri incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşıım serileri için optimum çözündürme sıcaklığı 510°C çözündürme süresi 2 saat olarak belirlenmiştir. Farklı ısıı işlem sürelerine sahip Al alaşıım serilerinin yaşılandırma ısıı işlem parametrelerinin belirlenmesinde 90°C sıcaklık değerinden 190°C sıcaklık aralığına 10'ar derecelik ısı artışları ile 1,2 ve 3 saatlik sürelerde ön çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yaşılandırma ısıı işlemi ile yapı içerisinde ikincil fazların homojen olarak çökmesi ve Al alaşıım serilerinin sertlik özelliklerinde iyileştirme etkisinin gözlenmesi amaçlanmıştır. Üç farklı Al alaşıım serisi için optimum yaşılandırma sıcaklığı 160°C sıcaklıkta 1' saatlik periyotlar halinde maksimum sertlik değeri ulaşıldığı yaşılandırma parametresi olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.1'de belirtildiği üzere AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşıım serileri için çözündürme sonrası elde edilen sertlik değeri ile yaşılandırma ısıı işlemi sonunda elde edilen sertlik değerlerinde AA7075 Al alaşıım serisi için 112HV 0,1, AA2024 Al alaşıım serisi için 58HV 0,1,

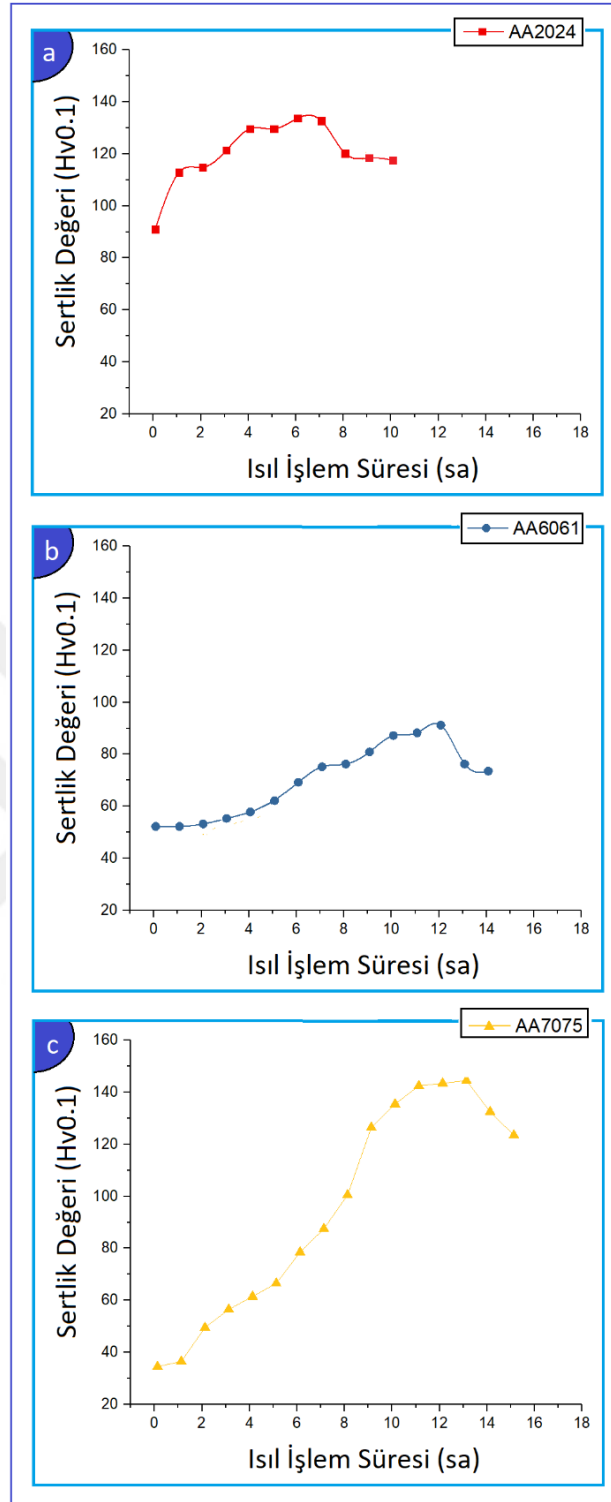
AA6061 Al alaşım serisi için 50HV 0,1 değerinde sertlik artışı gözlenmiştir. AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarında meydana gelen farklı srelerdeki sertlik artışı değerlendirildiğinde üç seri içinde ortak ısıt ışlem koşulları tercih edildiği, yapılan ön çalışmalar sonucunda belirlenen optimum ısıt ışlem koşulunun Al alaşımları üzerindeki etkisinin farklı olduğu gözlenmiştir. n alışma ile yapılan denemeler sonunda belirlenen 510°C zndrme + su verme sonrası uygulanan 160°C sıcaklık değerinde uygulanan yaşlandırma ısıt ışlemin AA6061 ve AA7075 Al alaşım serileri için optimum ısıt ışlem parametrelerine daha yakın sıcaklık aralığında olduğu ve bu durumun AA2024 Al alaşım serilerine kıyasla sertlik değişimlerinin daha yavaş olduğu belirlenmiştir.

Bu bölümde AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine uygulanan Sığ-kriyojenik soğutma ($\approx -75^{\circ}\text{C}$) ışlemi sonunda zndrme (510°C) ısıt ışlemi ve yaşlandırma (160°C) ısıt ışleminin Al alaşım serilerinin mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bir nceki bölümde yer alan çözündürme ve yaşlandırma ısıt ışleminin malzemenin mekanik özelliklerine etkileri incelenmiş ve uygulanan ışlem basamakları sonunda yapılan Vickers sertlik analizlerinde Al alaşım serilerinin mekanik özelliklerinde artış gözlenmiştir (Maryam ve diğ. 2019)(Feng ve diğ. 2021). Malzemeye uygulanan ısıtma ışleminin etkileri yanı sıra soğutma ışleminin Al alaşım serilerinin sertlik özelliklerindeki etkileri şekil 5.3'te verilmektedir.

şekil 5.2.a'da AA2024 Al alaşım serisi için yaşlandırma ısıt ışlemine bağlı maksimum sertlik değeri 6 saat sonunda 134HV olarak ölçülmüştür. 6 saat sonunda devam edilen yaşlandırma ışlemi ile malzeme sertlik değerinin azalma eğilimi verdiği belirlenmiştir ve ısıt ışlem durdurulmuştur. 8. ve 9. saatlerde sertlik değeri 116HV değerine düşmüştür.

şekil 5.2.b'de AA6061 serisi Al alaşımı için maksimum sertlik değeri 12. Saatte 92HV olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu değer sonrasında yaşlandırma ışlemi devam edilmiş ve 13-15 saat uygulanan yaşlandırma ışleminde sertlik değerinin 92HV'den 74HV değerine gerilediği gözlenlenmiştir ve AA6061 Al alaşımı için yaşlandırma ışlemi tamamlanmıştır.

şekil 5.2.c'de AA7075 Al alaşım serisi için maksimum sertlik değeri 12. Saatte 142HV olarak ölçülmüştür. 12 saat sonunda yaşlandırma ısıt ışlemine devam edilmiştir. 14 ve 15. saatlerde sertlik değerinde kademeli olarak düşüş gösterdiği gözlenmiştir. 15. Saat sorusunda ölçülen sertlik değeri 142HV değerinden 121HV değerine düşmüştür.



Şekil 5.2: Çözündürme, sığ-kriyojenik ve yaşlandırma işlemi uygulanmış Al alaşım serilerine ait sertlik değerleri, a) AA2024 Al alaşım serisi sertlik değerleri, b) AA6061 Al alaşım serisi sertlik değeri, c) AA7075 Al alaşım serisi sertlik değeri.

5.2 Doğal Titreşim Analizi

Her Al alaşım serisi için uygulanan ısıtma işlem aşamaları ve ankastre düzeneğine bağlanma konumuna göre numune kesit alandaki değişimin doğal frekans değerine etkileri incelenmiş ve elde edilen veriler test numunelerine uygulanan işlem basamaklarına uygun olarak iki bölümde incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ile bölüm 3.1.1’de belirtilen kirişin analitik titreşim analizi bölümünde belirtilen işlem basamakları ile analitik ve deneysel veriler kıyaslanmıştır.

1. Bölüm AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait ham, çözündürme ve yaşlandırma ısıtma işlem uygulanmış numune serileri ile 0-1° kesim açılarına sahip farklı kesit ölçülerinin doğal titreşim değerleri her basamak sonunda analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda kesit farklılıkları ve uygulanan ısıtma işlem basamaklarının Al alaşım serilerinin doğal titreşim değerine etkileri incelenmiştir.

Tablo 5.1: AA2024 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlem basamakları ve deneysel doğal titreşim frekans değerleri

Numune	Ham Numune	Çözündürme	Yaşlandırma								
İşlem Süresi	İşlemsiz	2 saat	1 Saat	2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	6 saat	7 saat	8 saat	9 saat
Kesim Açısı	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
0	36,62	36,62	39,06	36,62	36,362	34,18	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62
0,1	36,62	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62
0,2	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62
0,3	36,62	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62
0,4	34,18	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62
0,5	34,18	34,18	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	36,62	36,62	34,18	36,62
0,6	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18
0,7	34,18	34,18	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18	36,62	36,62	34,18	34,18
0,8	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18
0,9	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18
1	34,18	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18

Tablo 5.2: AA2024 Al alaşım serisi için ankastre düzeneginde sabit kenar uzun kenar, serbest kenar kısa bağlanan numune serilerine uygulanan işlem basamakları ve doğal titreşim frekans değerleri.

Numune	Ham Numune	zndrme	Yaşlandırma								
işlem Süresi	işlemsiz	2 saat	1 Saat	2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	6 saat	7 saat	8 saat	9 saat
Kesim Açısı	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
0	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62
0,1	36,62	36,62	39,06	36,62	39,06	36,06	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62
0,2	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62	36,06	39,06	36,62	39,06	39,06	36,62
0,3	36,62	39,06	36,62	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06
0,4	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06
0,5	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06
0,6	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	41,5	39,06	39,06	39,06	39,06
0,7	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06
0,8	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	41,5	39,06	39,06	41,5
0,9	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06
1	39,06	39,06	41,5	39,06	41,5	41,5	41,5	41,5	39,06	39,06	41,5

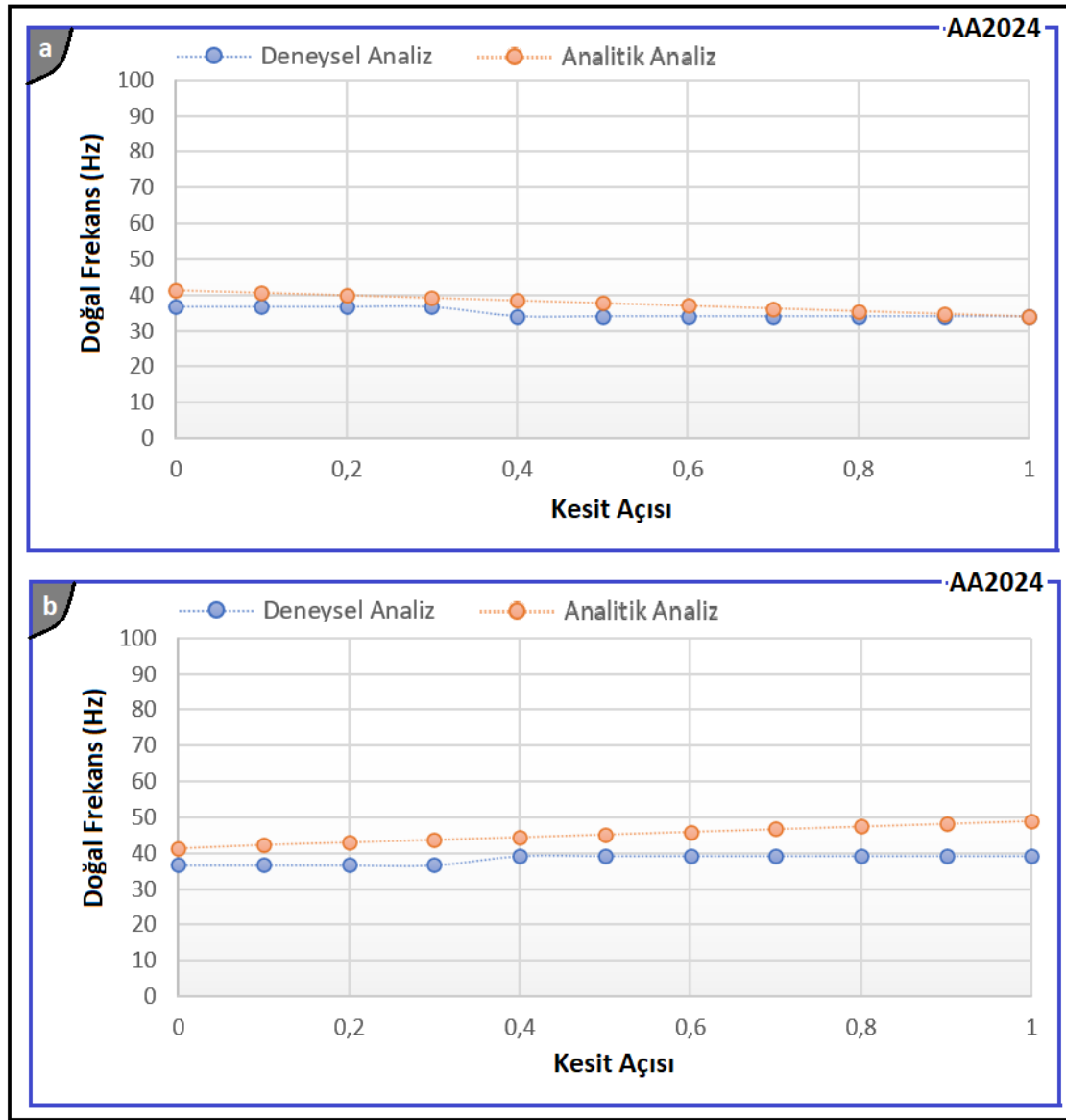
Tablo 5.1’de AA2024 Al alaşım serisine ait kısa kenarından sabitlenmiş uzun kenardan titreşim etkisi uygulanmış ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en yüksek frekans değeri 0⁰ kesit alanına sahip numune serisinde 36,62Hz olarak ölçülmüştür. En düşük frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1⁰’de 34,18Hz olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.2’de sabit kenar uzun serbest kenar kısa olarak analiz edilen ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en düşük frekans değeri 0⁰ kesit alanına sahip numune serisinde 36,62Hz olarak ölçülmüştür. En yüksek frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1⁰’de 39,06Hz olarak ölçülmüştür. Ankastre test düzeneginde uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest durumda olan ve uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest AA2024 alaşım serisine numunelere ait deneysel verilerden elde edilen doğal titreşim değeri ve teorik olarak hesaplanan analitik doğal frekans değeri şekil 5.3’te verilmektedir.

şekil 5.3.a’da Kısa kenarı sabit uzun kenarı serbest durumda olan AA2024 Al alaşım serisi için deneysel ve analitik doğal frekans değerleri analizde kesit açısının 0⁰ olduğunda en büyük frekans değerleri deneysel olarak 36.62Hz ve analitik olarak 41.46Hz olarak elde dilmştir. Yine

kesit açısı 1° olduğunda en küçük değerler deneysel olarak 34.18 ve analitik olarak 33.87 olarak elde edilmiştir. Kısa kenarından tutturulmuş ankastre kirişin kesit frekans değerleri kesit açısının artması ile hem deneysel analizde hem de analitik analizde düştüğü görülmüştür.

Şekil 5.3.b’de AA2024 Al alaşımı için deneysel ve analitik analizde kesit açısının 0° olduğunda en küçük frekans değerleri deneysel olarak 36.62Hz ve analitik olarak 41.16Hz olarak elde edilmiştir. Yine kesit açısı 1° olduğunda en büyük değerler deneysel olarak 39.06Hz ve analitik olarak 49,05Hz olarak edilmiştir. Uzun kenarından tutturulmuş ankastre kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile hem deneysel analizde hem de analitik analizde artışı görülmüştür. Deneysel ve analitik analizler birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 5.3: AA2024 Al alaşım serisine ait deneysel ve analitik doğal frekans değerleri (a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi. (b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.

Tablo 5.3: AA6061 Al alaşım serisi için ankastre düzenğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlem başmıkları ve doğal titreşim frekans değerleri.

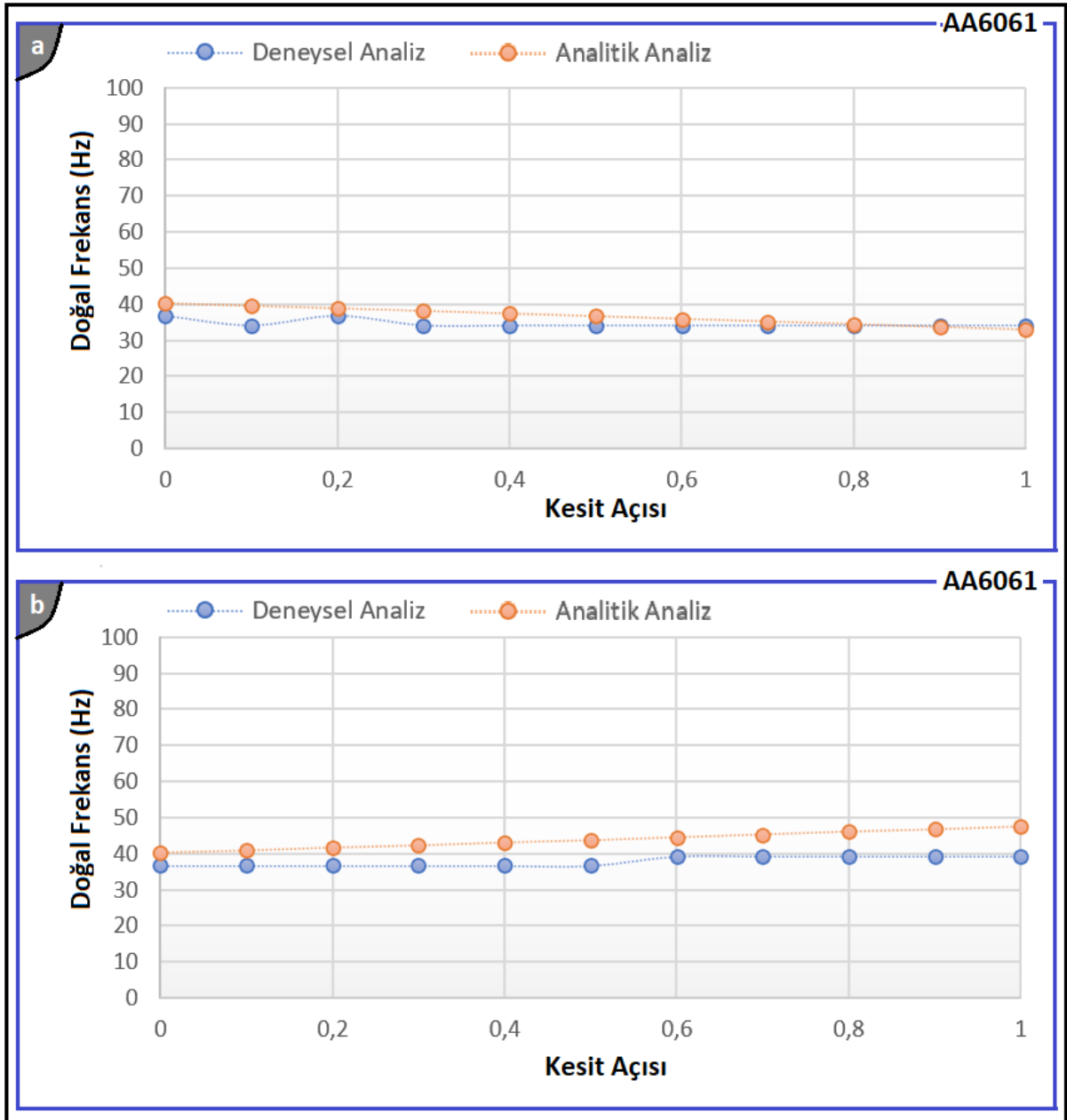
Numune		Ham Numune	Yaşlandırma														
İşlem Süresi	İşlemsiz	2 saat	1 Saat	2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	6 saat	7 saat	8 saat	9 saat	10 saat	11 saat	12 saat	13 saat	14 saat	15saat
Kesim Açısı	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
	0	36,62	36,62	39,06	39,06	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62	34,18	36,62
	0,1	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	36,62	34,18	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18
	0,2	36,62	36,62	36,62	39,06	34,18	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18	36,62	39,06	34,18	34,18	36,62	34,18
	0,3	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	39,06	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	39,06	34,18	34,18
	0,4	36,62	39,06	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	36,62	36,62	34,18	34,18	36,62	34,18
0,5	36,62	39,06	34,18	34,18	34,18	34,18	36,62	39,06	34,18	34,18	34,18	36,62	36,62	34,18	34,18	34,18	
0,6	39,06	39,06	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18	34,18	
0,7	39,06	39,06	34,18	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	39,06	36,62	34,18	34,18	34,18	
0,8	39,06	39,06	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	
0,9	39,06	39,06	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	
1	39,06	39,06	31,74	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	31,74	31,74	34,18

Tablo 5.3'te AA6061 Al alaşım serisine ait kısa kenarından sabitlenmiş uzun kenardan titreşim etkisi uygulanmış ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en yüksek frekans değeri 0^0 kesit alanına sahip numune serisinde 36,62Hz olarak ölçülmüştür. En düşük frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1^0 'de 34,18Hz olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.4'te AA6061 Al alaşım serisine ait sabit kenar uzun serbest kenar kısa olarak analiz edilen ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en düşük frekans değeri 0^0 kesit alanına sahip numune serisinde 36,62Hz olarak ölçülmüştür. En yüksek frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1^0 'de 39,06Hz olarak ölçülmüştür.

Ankastre test dzenegnde uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest durumda olan ve uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest AA6061 alaşım serisine numunelere ait deneysel verilerden elde edilen doğal titreşim değeri ve teorik olarak hesaplanan analitik doğal frekans değeri şekil 5.4.a'da verilmektedir. şekil 5.4.a'da Kısa kenarı sabit uzun kenarı serbest durumda olan AA6061 Al alaşım serisi için deneysel ve analitik doğal frekans değerleri kıyaslandığında kesit açısının 0^0 olduğunda en büyük frekans değerleri deneysel olarak 36.62Hz ve analitik olarak 40.25Hz olarak elde dilmiştir. Yine kesit açısı 1^0 olduğunda en küçük değerler deneysel olarak 34.18Hz ve analitik olarak 32.88Hz olarak elde edilmiştir.

şekil 5.4.b'de deneysel ve analitik analizde kesit açısının 0^0 olduğunda en küçük frekans değerleri deneysel olarak 36.62Hz ve analitik olarak 40.25Hz olarak elde dilmiştir. Yine kesit açısı 1^0 olduğunda en büyük değerler deneysel olarak 39.06Hz ve analitik olarak 47.50Hz olarak elde edilmiştir. Deneysel ve analitik analizler birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 5.4: AA6061 Al alaşım serisine ait deneysel ve analitik doğal frekans değerleri, a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.

Tablo 5.5: AA7075 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlem başmıkları ve doğal titreşim frekans değerleri

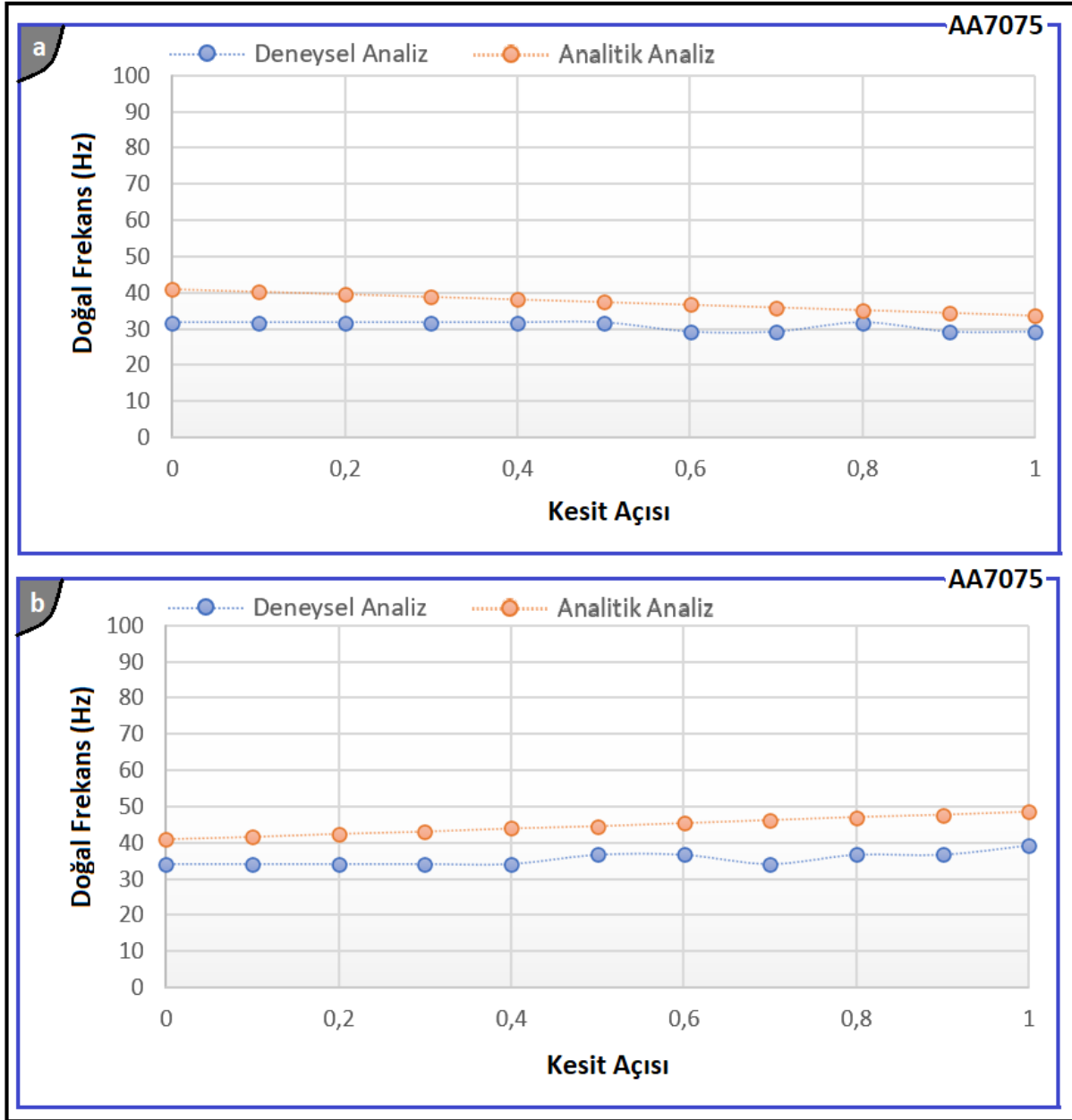
Numune	Ham Numune	Çözündürme	Yaşlandırma														
İşlem Süresi	İşlemsiz	2 saat	1 Saat	2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	6 saat	7 saat	8 saat	9 saat	10 saat	11 saat	12 saat	13 saat	14 saat	15saat
Kesim Açısı	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
0	31,74	31,74	31,74	34,19	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	31,74
0.1	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	34,18	31,74	31,74	31,74
0.2	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	34,18	34,18	31,74	31,74	31,74	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74
0.3	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74
0.4	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	34,18	31,74	31,74	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74
0.5	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	34,18	31,74	31,74	31,74
0.6	29,3	34,18	31,74	31,74	31,74	29,3	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74
0.7	29,3	31,74	31,74	29,3	29,3	31,74	31,74	31,74	31,74	29,3	31,74	31,74	31,74	31,74	29,3	31,74	31,74
0.8	31,74	31,74	29,3	31,74	31,74	29,3	29,3	29,3	31,74	29,3	31,74	31,74	31,74	31,74	29,3	31,74	31,74
0.9	29,3	31,74	29,3	31,74	31,74	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	31,74	31,74	31,74	31,74	29,3	31,74	31,74
1	29,3	31,74	31,7	31,74	31,74	29,3	29,3	29,3	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	29,3	29,3	29,3

Tablo 5.5'te AA7075 Al alaşım serisine ait kısa kenarından sabitlenmiş uzun kenardan titreşim etkisi uygulanmış ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en yüksek frekans değeri 0^0 kesit alanına sahip numune serisinde 31.74Hz olarak ölçülmüştür. En düşük frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1^0 'de 29.03Hz olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.6'te sabit kenar uzun serbest kenar kısa olarak analiz edilen ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en düşük frekans değeri 0^0 kesit alanına sahip numune serisinde 34.18Hz olarak ölçülmüştür. En yüksek frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1^0 'de 39.06Hz olarak ölçülmüştür.

Ankastre test dzenegnde uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest durumda olan ve uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest AA7075 alaşım serisine numunelere ait deneysel verilerden elde edilen doğal titreşim değeri ve teorik olarak hesaplanan analitik doğal frekans değeri şekil 5.5'de verilmektedir. şekil 5.5.a'da Kısa kenarı sabit uzun kenarı serbest durumda olan AA7075 Al alaşım serisi için deneysel ve analitik doğal frekans değerleri kıyaslandığında analizde kesit açısının 0^0 olduğunda en büyük frekans değerleri deneysel analizde 31.74Hz ve analitik 41.06Hz olarak elde dilmiştir. Yine kesit açısı 10 olduğunda en küçük değerler deneysel analiz olarak 29.03Hz ve analitik analiz olarak 33.55Hz olarak elde edilmiştir.

şekil 5.5.b'de deneysel ve analitik analizde kesit açısının 0^0 olduğunda en küçük frekans değerleri deneysel analiz 34.18Hz ve analitik 41.06Hz olarak elde dilmiştir. Yine kesit açısı 1^0 olduğunda en büyük değerler deneysel olarak 39.06 ve analitik olarak 48.45Hz olarak elde edilmiştir. Deneysel ve analitik analizler birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 5.5: AA7075 Al alaşım serisine ait deneysel ve analitik doğal frekans değerleri, a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.

2. Bölüm Ham numune doğal frekans analizi, 510°C sıcaklıkta çözündürme sonrası doğal frekans analizi, $\approx -75^{\circ}\text{C}$ 168 saat Sığ-kriyojenik soğutma sonrası doğal frekans analizi, 160°C sıcaklıkta 1'er saatlik periyotlarla yaşlandırma işlemi sonunda her 1'er saat sonunda doğal frekans analizi uygulanmış numune için doğal titreşim test verileri.

Tablo 5.7:6 AA2024 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlem başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.

Numune	Ham Numune	zndrme	Kriyojenik	Yaşlandırma								
İşlem Süresi	İşlemsiz	2 saat	168 saat	1 Saat	2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	6 saat	7 saat	8 saat	9 saat
Kesim Açısı	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
0	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	39,06	36,62	34,18
0.1	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18
0.2	36,62	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18
0.3	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74
0.4	39,06	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18
0.5	39,06	34,18	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	31,74
0.6	39,06	34,18	39,06	36,62	34,18	34,18	34,18	31,74	31,74	34,18	34,18	34,18
0.7	39,06	34,18	39,06	36,62	34,18	36,62	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74
0.8	39,06	34,18	39,06	34,18	34,18	36,62	34,18	31,74	31,74	31,74	34,18	31,74
0.9	39,06	34,18	39,06	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74
1	39,06	31,74	39,06	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	31,74	34,18	34,18	34,18

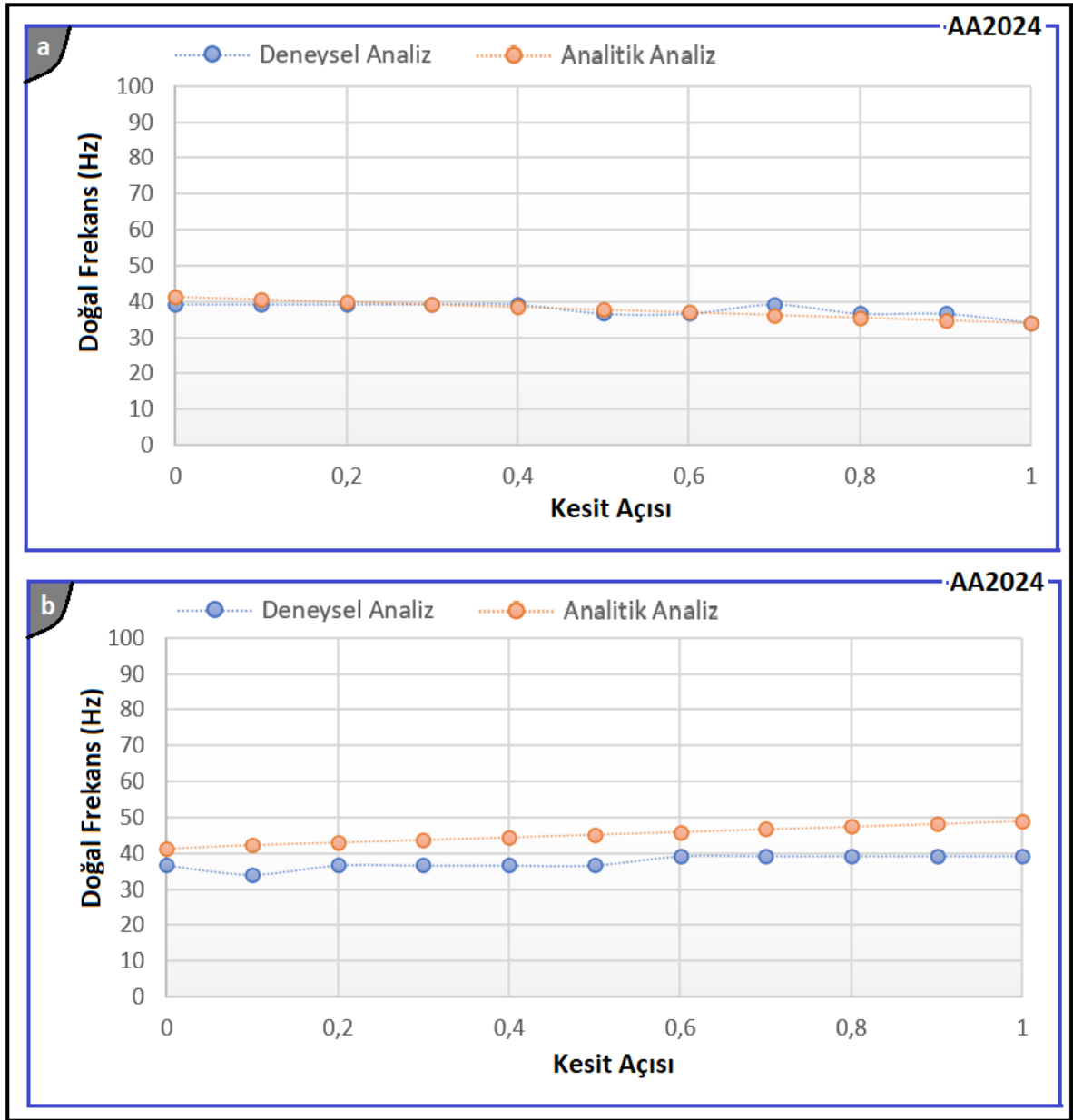
Tablo 5.8: AA2024 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar uzun kenar, serbest kenar kısa bağlanan numune serilerine uygulanan işlem başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.

Numune	Ham Numune	zndrme	Kriyojenik	Yaşlandırma								
İşlem Süresi	İşlemsiz	2 saat	168 saat	1 Saat	2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	6 saat	7 saat	8 saat	9 saat
Kesim Açısı	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
0	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18
0.1	36,62	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	34,18	36,62	36,62
0.2	36,62	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	34,18	36,62
0.3	36,62	39,06	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62
0.4	34,18	39,06	36,62	36,62	41,5	39,06	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	36,62
0.5	34,18	39,06	36,62	36,62	39,06	39,06	39,06	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62
0.6	34,18	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	36,62	36,62	36,62	34,18	36,62
0.7	34,18	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	36,62	36,62	39,06	39,06	39,06
0.8	34,18	39,06	39,06	39,06	39,06	34,18	39,06	36,62	36,62	39,06	36,18	36,18
0.9	34,18	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	39,06	36,62	36,62	36,62	36,18	36,18
1	34,18	39,06	39,06	39,06	39,06	41,5	39,06	39,06	36,62	36,62	36,18	36,18

Tablo 5.7’de Sığ-kriyojenik soğutma ve ısıl işlem sonunda AA2024 Al alaşım serisine ait kısa kenarından sabitlenmiş uzun kenardan titreşim etkisi uygulanmış ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en yüksek frekans değeri 0⁰ kesit alanına sahip numune serisinde 39.06Hz olarak ölçülmüştür. En düşük frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1⁰’de 34,18Hz olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.8’de sabit kenar uzun serbest kenar kısa olarak analiz edilen ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en düşük frekans değeri 0^0 kesit alanına sahip numune serisinde 36,62Hz olarak ölçülmüştür. En yüksek frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1^0 ’de 39,06Hz olarak ölçülmüştür.

Ankastre test düzeneğinde uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest durumda olan ve uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest AA2024 alaşım serisine numunelere ait deneysel verilerden elde edilen doğal titreşim değeri ve teorik olarak hesaplanan analitik doğal frekans değeri Şekil 5.6’de verilmektedir. Şekil 5.6.a’da Kısa kenarı sabit uzun kenarı serbest durumda olan AA2024 Al alaşım serisi için deneysel ve analitik doğal frekans değerleri kıyaslandığında kesit açısının 0^0 olduğunda en büyük frekans değerleri deneysel olarak 39.06Hz ve analitik olarak 41.46Hz olarak elde edilmiştir. Yine kesit açısı 1^0 olduğunda en küçük değerler deneysel olarak 34.18Hz ve analitik olarak 33.87Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 5.6.b’de deneysel ve analitik analizde kesit açısının 0^0 olduğunda en küçük frekans değerleri deneysel olarak 36.62Hz ve analitik olarak 41.16Hz olarak elde edilmiştir. Yine kesit açısı 1^0 olduğunda en büyük değerler deneysel olarak 39.06Hz ve analitik olarak 49,05Hz olarak 1^0 ’de edilmiştir. Deneysel ve analitik analizler birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 5.6: AA2024 Al alaşım serisine ait sıg-kriyojenik soğutma ve ısıt işlem sonrası deneysel ve analitik doğal frekans değerleri, a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.

Tablo 5.10: AA6061 Al alaşım serisi için ankastre düzenğinde sabit kenar uzun, serbest kenar kısa numune serilerine uygulanan işlem başmıkları ve doğal titreşim frekans değerleri.

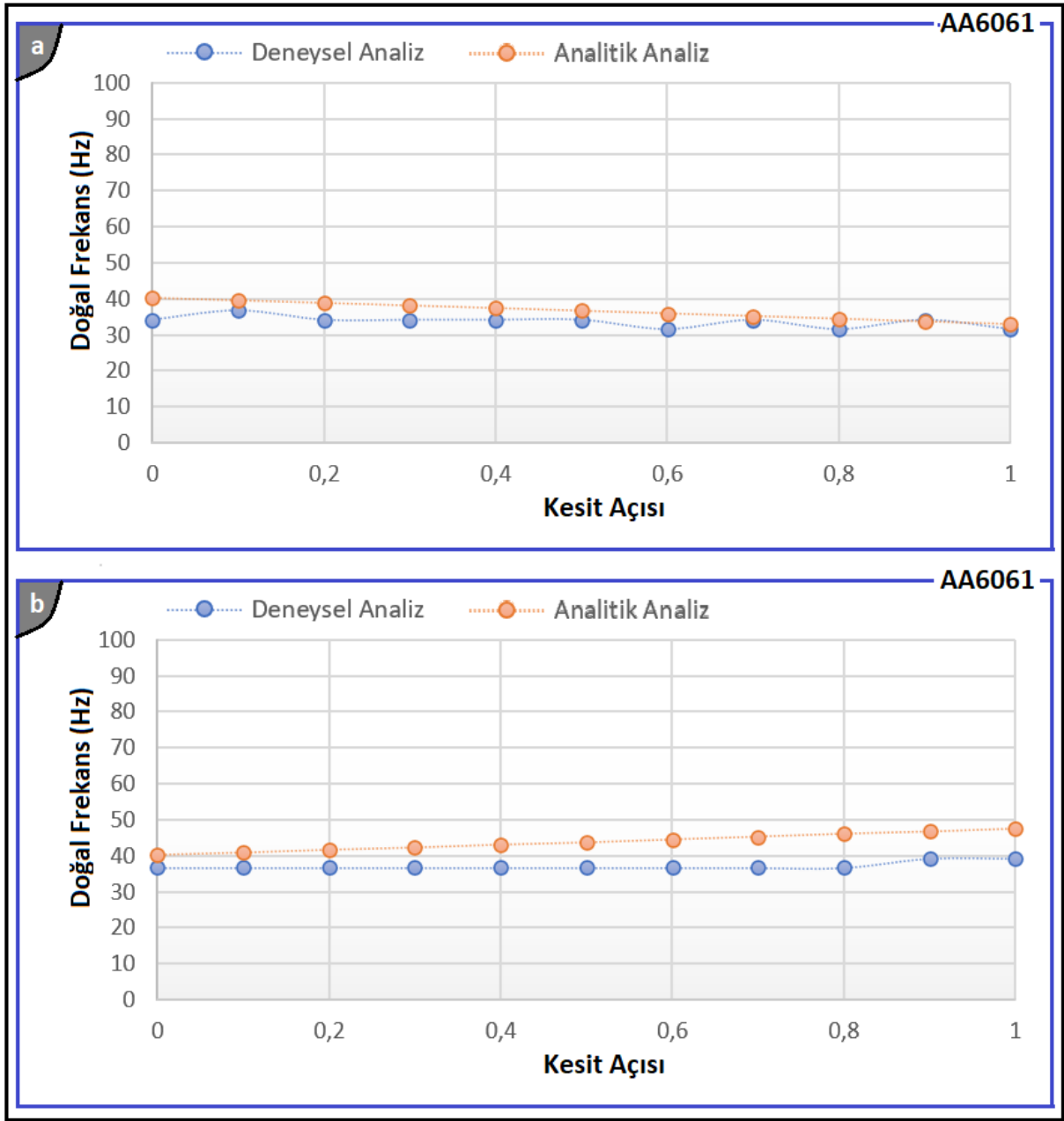
Numune	Ham Numune	Gözünürtme	Krityolenik	Yaşlandırma														
İşlem Süresi	İşlemsiz	2 saat	168 saat	1 Saat	2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	6 saat	7 saat	8 saat	9 saat	10 saat	11 saat	12 saat	13 saat	14 saat	15 saat
Kesim Açısı	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
	0	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	34,18	36,62	34,18	36,62	34,18	34,18	36,62	36,62	34,18	34,18	34,18
	0.1	34,18	36,62	36,62	41,5	36,62	36,62	36,62	36,62	34,18	39,06	34,18	36,62	34,18	36,62	34,18	34,18	34,18
	0.2	36,62	36,62	36,62	34,18	36,62	36,62	34,18	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62	34,18	36,62	34,18	34,18	34,18
	0.3	34,18	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18
	0.4	34,18	39,06	36,62	39,06	39,06	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18
0.5	34,18	39,06	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	34,18	31,74	34,18	31,74	34,18	
0.6	34,18	39,06	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	39,06	39,06	39,06	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74
0.7	34,18	39,06	36,62	39,06	39,06	36,62	39,06	36,62	36,62	39,06	39,06	39,06	34,18	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74
0.8	34,18	39,06	36,62	39,06	39,06	36,62	39,06	36,62	39,06	39,06	39,06	39,06	31,74	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74
0.9	34,18	39,06	39,06	39,06	39,06	36,62	39,06	36,62	39,06	39,06	39,06	39,06	31,74	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74
1	34,18	39,06	39,06	41,5	39,06	39,06	39,06	36,62	39,06	39,06	39,06	39,06	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74

Tablo 5.9’da Sıg-kriyojenik soğutma ve ısıt işlemlerinde AA6061 Al alaşımlarına ait kısa kenarından sabitlenmiş uzun kenardan titreşim etkisi uygulanmış ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarını kıyasla en yüksek frekans değeri 0^0 kesit alanına sahip numune serisinde 34.18Hz olarak ölçülmüştür. En düşük frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1^0 ’de 31.74Hz olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.10’da sabit kenar uzun serbest kenar kısa olarak analiz edilen ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarını kıyasla en düşük frekans değeri 0^0 kesit alanına sahip numune serisinde 36,62Hz olarak ölçülmüştür. En yüksek frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1^0 ’de 39,06Hz olarak ölçülmüştür.

Ankastre test düzeneğinde uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest durumda olan ve uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest AA6061 alaşım serisine numunelere ait deneysel verilerden elde edilen doğal titreşim değeri ve teorik olarak hesaplanan analitik doğal frekans değeri Şekil 5.7’de verilmektedir. Şekil 5.7.a’da Kısa kenarı sabit uzun kenarı serbest durumda olan AA6061 Al alaşım serisi için deneysel ve analitik doğal frekans değerleri kıyaslandığında kesit açısının 0^0 olduğunda en büyük frekans değerleri deneysel olarak 34.18Hz ve analitik olarak 40.25Hz olarak elde edilmiştir. Yine kesit açısı 1^0 olduğunda en küçük değerler deneysel olarak 31.74Hz ve analitik olarak 32.88Hz olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.7.b’de deneysel ve analitik analizde kesit açısının 0^0 olduğunda en küçük frekans değerleri deneysel olarak 36.62Hz ve analitik olarak 40.25Hz olarak elde edilmiştir. Yine kesit açısı 1^0 olduğunda en büyük değerler deneysel olarak 39.06Hz ve analitik olarak 47.50Hz olarak elde edilmiştir. Deneysel ve analitik analizler birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 5.7: AA6061 Al alaşım serisine ait sığ-kriyojenik soğutma ve ısıt işlem sonrası deneysel ve analitik doğal frekans değerleri, a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.

Tablo 5.11: AA7075 Al alaşım serisi için ankastre düzenğinde sabit kenar kısa, serbest kenar uzun numune serilerine uygulanan işlem başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.

Numune	Ham Numune	Çözündürme	Kıryojenik	Yaşlandırma														
İşlem Süresi	İşlemsiz	2 saat	168 saat	1 Saat	2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	6 saat	7 saat	8 saat	9 saat	10 saat	11 saat	12 saat	13 saat	14 saat	15 saat
Kesim Açısı	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
	0	31,74	31,74	31,74	31,74	34,19	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	34,18	31,74	31,74	31,74
	0.1	31,74	31,74	31,74	34,18	34,19	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,18	31,74	31,74	31,74
	0.2	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	34,18	31,74	29,3	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,18	31,74	31,74	34,18
	0.3	31,74	31,74	31,74	34,18	34,19	34,19	31,74	31,74	31,74	31,74	29,3	31,74	31,74	31,18	31,74	31,74	34,18
	0.4	31,74	31,74	31,74	31,74	34,19	34,19	31,74	31,74	29,3	31,74	31,74	31,74	34,18	31,74	31,74	31,74	31,74
0.5	31,74	31,74	31,74	29,3	34,19	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,74	31,18	31,74	31,74	31,74	
0.6	29,3	34,18	31,74	31,74	34,19	31,74	29,3	31,74	29,3	29,3	31,74	29,3	31,74	31,18	31,74	31,74	29,3	
0.7	29,3	31,74	29,3	31,74	34,19	31,74	29,3	29,3	29,3	29,3	31,74	29,3	31,74	31,18	31,74	29,3	29,3	
0.8	31,74	31,74	29,3	29,3	31,74	31,74	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	31,74	31,18	31,74	29,3	29,3	
0.9	29,3	31,74	29,3	29,3	31,74	31,74	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	31,74	31,18	31,74	29,3	29,3	
1	29,3	31,74	29,3	31,7	31,74	31,74	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	31,74	29,3	29,3	31,74	29,3	29,3

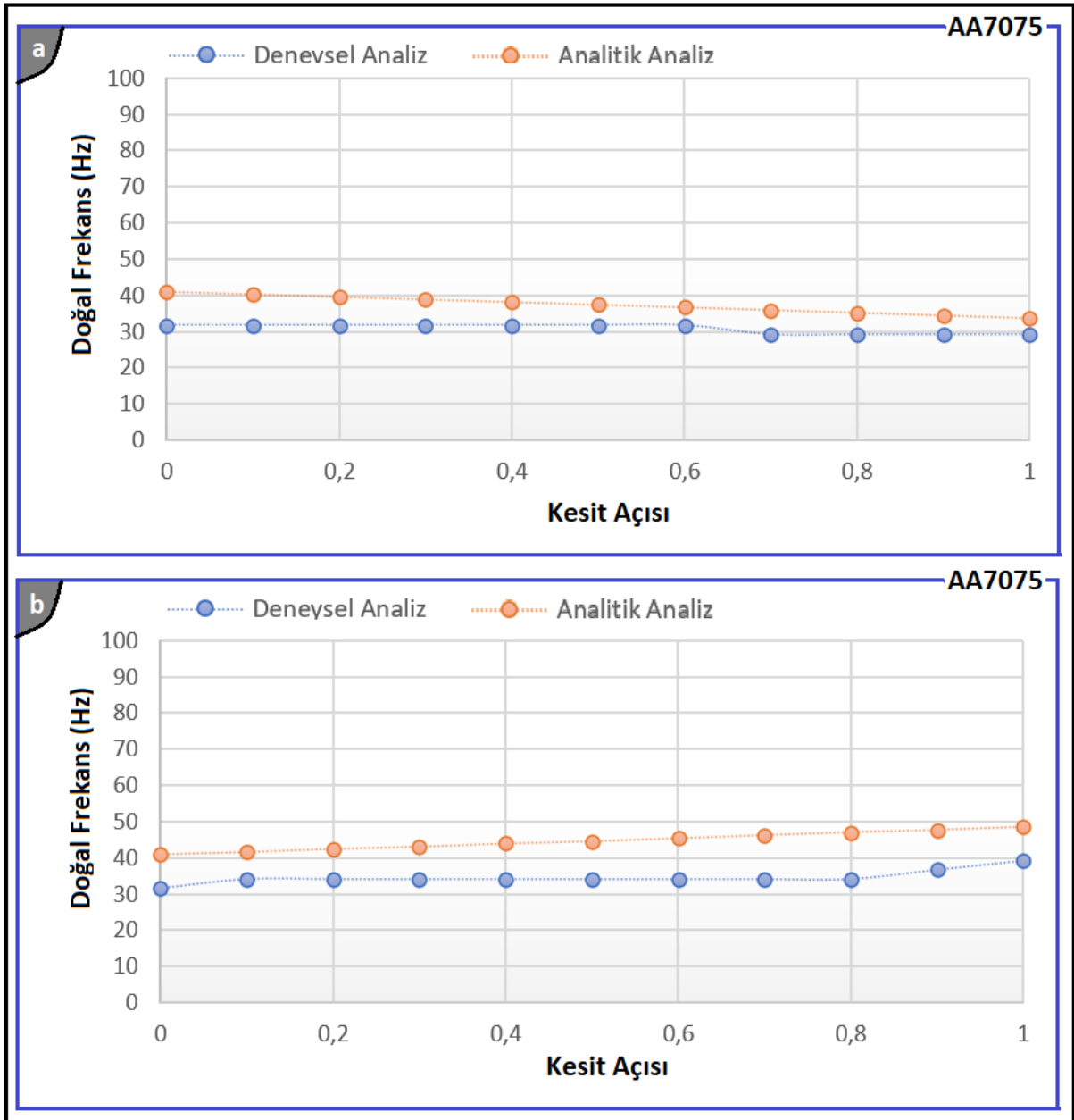
Tablo 5.12: AA7075 Al alaşım serisi için ankastre düzeneğinde sabit kenar uzun, serbest kenar kısa numune serilerine uygulanan işlem başmakları ve doğal titreşim frekans değerleri.

Nümunne	Ham Numune	Çözündürme	Kriyojenik	Yaşlandırma														
İşlem Süresi	İşlemsiz	2 saat	168 saat	1 Saat	2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	6 saat	7 saat	8 saat	9 saat	10 saat	11 saat	12 saat	13 saat	14 saat	15saat
Kesim Açısı	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
	0	31,74	34,18	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18
	0.1	31,74	34,18	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74
	0.2	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74
	0.3	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	34,18	34,18	36,62	36,62	34,18	34,18	31,74
	0.4	31,74	34,18	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	36,62	31,74	36,62	34,18	36,62	36,62	34,18	36,62
0.5	31,74	34,18	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18	34,18	31,74	34,18	34,18	31,74	36,62	36,62	36,62	34,18	36,62	
0.6	29,3	34,18	34,18	34,18	36,62	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	34,18	36,62	36,62	36,62	34,18	36,62
0.7	29,3	34,18	34,18	34,18	36,62	36,62	34,62	34,18	36,62	34,18	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62
0.8	31,74	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	34,62	34,18	36,62	34,18	36,62	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62
0.9	29,3	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,62	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62
1	29,3	36,62	36,62	36,62	36,62	36,62	34,62	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62	39,06	36,62	39,06	36,62	36,62	36,62

Tablo 5.11’de Sıg-kriyojenik soğutma ve ısıt işlemlerinde AA7075 Al alaşımlarına ait kısa kenarından sabitlenmiş uzun kenardan titreşim etkisi uygulanmış ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en yüksek frekans değeri 0^0 kesit alanına sahip numune serisinde 29.03Hz olarak ölçülmüştür. En düşük frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1^0 ’de 31.74Hz olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.12’de sabit kenar uzun serbest kenar kısa olarak analiz edilen ankastre kirişin kesit açısına göre doğal frekans değerleri görülmektedir. Kirişin frekans değerleri kesit açısının artması ile deneysel analizde düştüğü görülmektedir. Kesit açılarına kıyasla en düşük frekans değeri 0^0 kesit alanına sahip numune serisinde 31.74Hz olarak ölçülmüştür. En yüksek frekans değeri ise en yüksek açı değeri olan 1^0 ’de 39,06Hz olarak ölçülmüştür.

Ankastre test düzeneğinde uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest durumda olan ve uzun kenarı sabit kısa kenarı serbest AA7075 alaşım serisine numunelere ait deneysel verilerden elde edilen doğal titreşim değeri ve teorik olarak hesaplanan analitik doğal frekans değeri Şekil 5.8’de verilmektedir. Şekil 5.8.a’da Kısa kenarı sabit uzun kenarı serbest durumda olan AA7075 Al alaşım serisi için deneysel ve analitik doğal frekans değerleri kıyaslandığında kesit açısının 0^0 olduğunda en büyük frekans değerleri deneysel analizde 31.74Hz ve analitik 41.06Hz olarak elde edilmiştir. Yine kesit açısı 1^0 olduğunda en küçük değerler deneysel analiz olarak 29.03Hz ve analitik analiz olarak 33.55Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 4.8.b’de deneysel ve analitik analizde kesit açısının 0^0 olduğunda en küçük frekans değerleri deneysel analiz 31.74Hz ve analitik 41.06Hz olarak elde edilmiştir. Yine kesit açısı 1^0 olduğunda en büyük değerler deneysel olarak 39.06 ve analitik olarak 48.45Hz olarak elde edilmiştir. Deneysel ve analitik analizler birbirlerine yakın çıkmıştır.



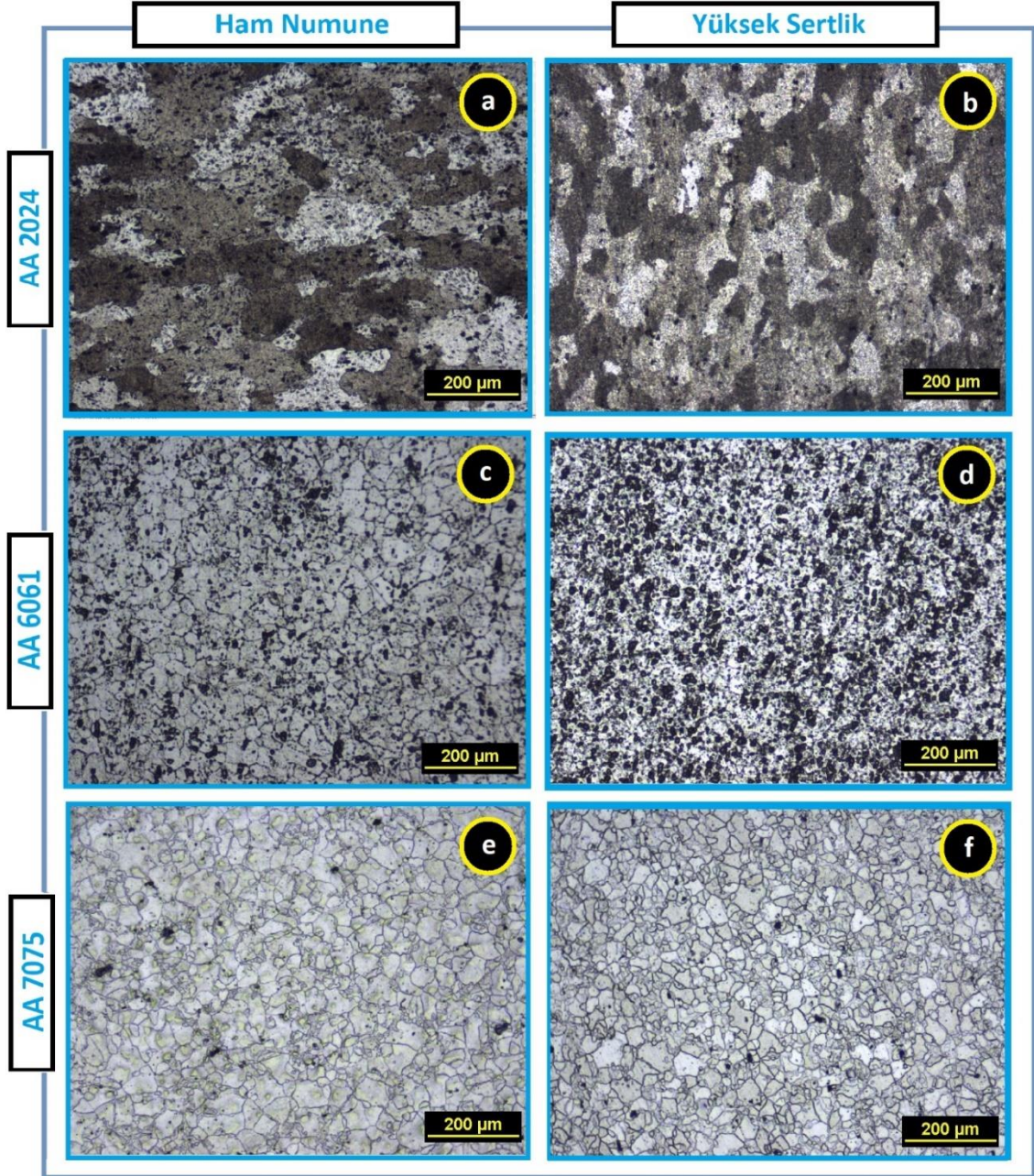
Şekil 5.8: AA7075 Al alaşım serisine ait sığ-kriyojenik soğutma ve ısıt işlem sonrası deneysel ve analitik doğal frekans değerleri, a) Kısa kenar sabit uzun kenar serbest numune serisi, b) Uzun kenar sabit kısa kenar serbest numune serisi.

Yukarıda belirtilen farklı kesit alanına sahip Al alaşım serilerine uygulanan titreşim testinin malzemenin kesit açısı değişimlerinin doğal frekans değerine etkisinin olduğu belirlenmiştir. Al alaşımlarına uygulanan Çözündürme + su verme, sığ-kriyojenik ve yaşlandırma ısıt işlemlerinden kaynaklı malzemelerin doğal frekans değerinde herhangi bir değişim olmadığı belirlenmiştir.

5.3 Karakterizasyon Analizleri

AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine uygulanan çözündürme, sığ-kriyojenik soğutma ve yaşlandırma ısıl işlemlerinin Al alaşım serilerinin yüzey ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesinde OM ve FESEM görüntü işleme cihazları kullanılmıştır. Yapı içinde çökelen fazlar ve yapıda bulunan elementlerin tespitinde XRD ve EDS analizleri kullanılmıştır.

5.3.1 Optik Mikroskop-FESEM-EDS-XRD İncelemeleri

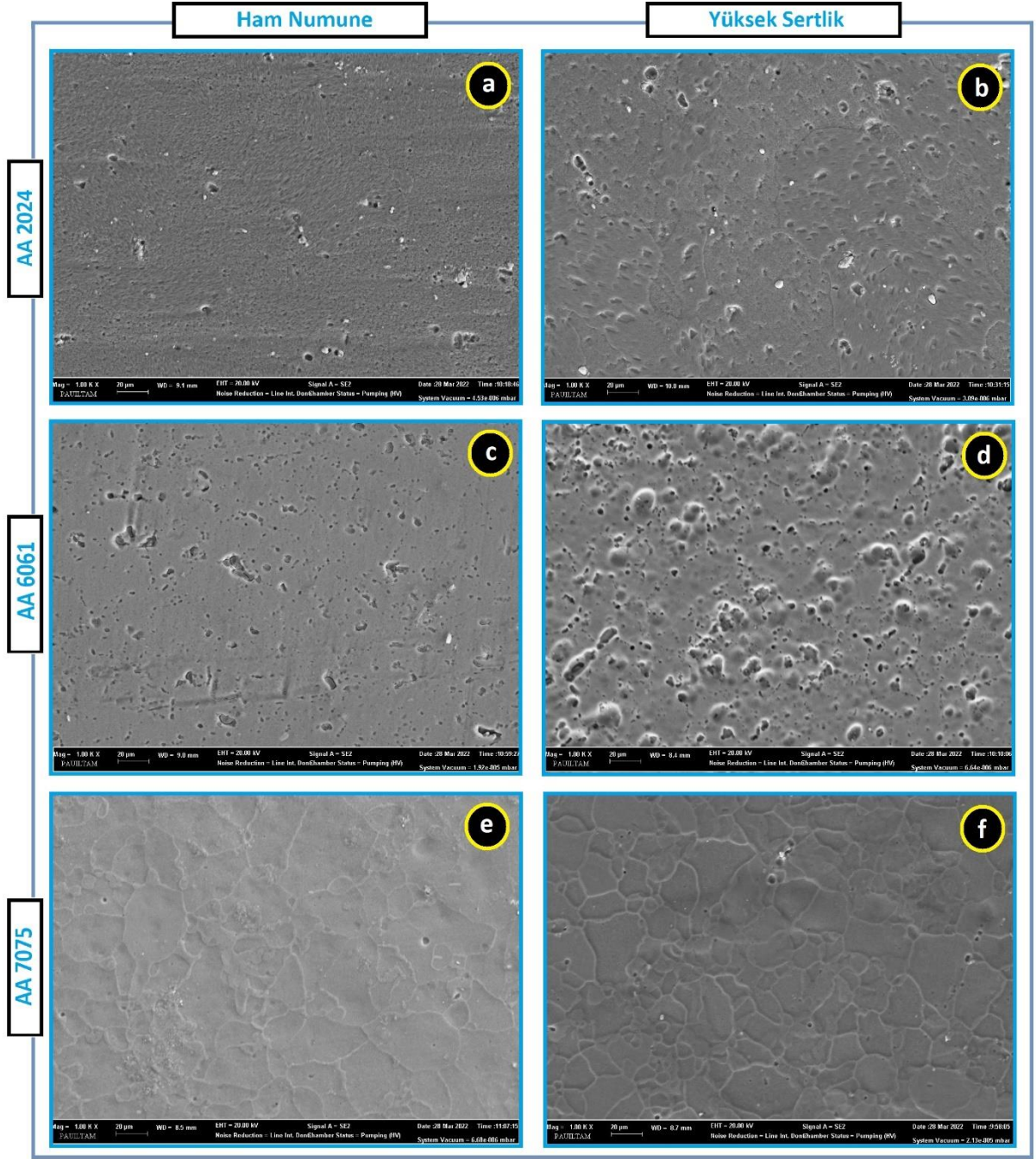


Şekil 5.9: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait ham numune ve çözündürme ve yaşlandırma ısıl işlemleri sonrası en yüksek sertlik değeri elde edildiği numunelere ait optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 5.9. a, b, c’de 200 µm büyütme oranına sahip optik mikroskop görüntülerinde her bir Al alaşım serisine ait ham işlemsiz numunelere ait görüntüler yer almaktadır. Şekil 5.9. b, d, f’de yer alan 200µm büyütme oranına sahip optik mikroskop görüntülerinde 510°C 2 saat çözündürülmüş, 160°C sıcaklıkta yaşlandırılmış ve vikers sertlik analizi sonucunda en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği numunelere ait görüntüler yer almaktadır. Elde edilen en yüksek sertlik değerleri AA2024 Al alaşım serisi için 7. Saat yaşlandırma süresinde 131HV, AA6061 Al alaşım serisi için 12. Saat yaşlandırma süresinde 93HV ve AA7075 Al alaşım serisi için 13. Saat yaşlandırma süresinde 143HV vikers sertlik değeri olarak belirlenmiştir.

Al alaşım serilerine uygulanan çözündürme ve yaşlandırma ısı işlemlerinin malzemenin mekanik özelliklerine iyileştirme yönünde etkisi olduğu, bu iyileştirmenin çözündürme + su verme sonrası uygulanan yaşlandırma ısı işlemi neticesinde yapı içerisinde meydana gelen ikincil fazlardan yapı içerisine çökmesinden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Şekil 5.10’de ham işlem görmemiş numune ve 510°C sıcaklıkta çözündürme + su verme işlemi sonrası 160°C sıcaklıkta yaşlandırma ısı işlemleri uygulanmış AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait 1000 X büyütme oranında FESEM görüntüleri verilmektedir. FESEM görüntüleri incelendiğinde ham numuneye kıyasla ısı işlem uygulamaları sonunda yapı içerisinde çökelen faz dağılımları ve her numune için belirtilen büyütme oranında tane boyutları görülmektedir. Isıl işlem uygulanan numune serilerinin ham numuneye kıyasla çökelti oluşum oranında artış ve homojen yapının elde edildiği, buna bağlı olarak Al alaşım serilerinin mekanik özelliklerine iyileştirme yönünde etki ettiği belirlenmiştir (Liu ve diğ.2018) (Liang ve diğ. 2020)(Öztürk ve diğ. 2010).



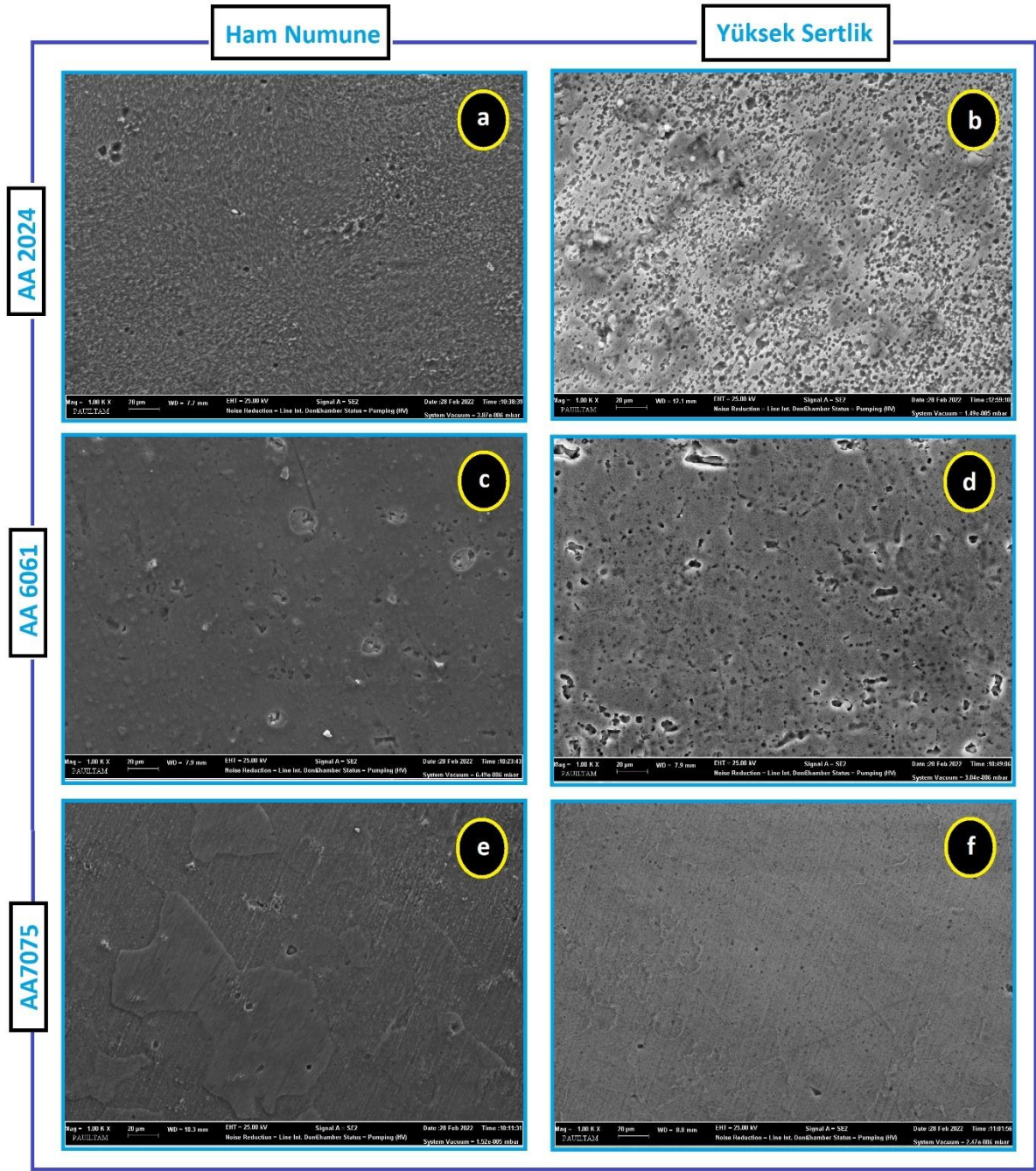
Şekil 5.10: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait ham numune ve çözündürme sonrası yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelere ait FESEM görüntüleri.

Çalışmanın bu bölümünde AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine 510°C 2 saat çözündürme + su verme, ≈ -75 °C soğutma derecesinde uygulanan sığ-kriyojenik soğutma işlemi ve 160°C sıcaklıkta her bir Al alaşım serisi için maksimum sertlik değerinin elde edildiği sürelerle ulaşılan kadar 1' er saatlik periyotlarla uygulanmış yaşlandırma işlemi

sonunda numunelere uygulanan analizler ve sonuçlarının yorumlanması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.11’de sırasıyla çözündürme + su verme + sığ-kriyojenik + yaşlandırma ısıt işlemi sonunda en yüksek sertlik değerin elde edildiği numunelere ve işlem uygulanmamış ham Al alaşım serilerine ait FESEM görüntüleri verilmektedir. Al alaşım serilerine uygulanan sığ-kriyojenik işlem sonunda amaçlanan malzeme içerisinde üretim sonrası veya uygulanan ısıt işlem basamakları sonunda oluşan gerilme etkisinin soğutma altında yapı içerisinde uzaklaştırılması ve malzeme özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Şekil 5.11 a, c, e’de yer alan $\approx -75^{\circ}\text{C}$ ’de 168 saat sığ-kriyojenik soğutma sonrası işlem görmemiş AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait FESEM görüntüleri verilmektedir. Şekil 5.11. b, d, f’de sığ-kriyojenik soğutma sonrası uygulanan çözündürme ve yaşlandırma ısıt işleminin malzemelere ait sertlik özelliklerinin en yüksek olduğu yaşlandırma sürelerine ait Al alaşım serilerinin FESEM görüntüleri verilmektedir.

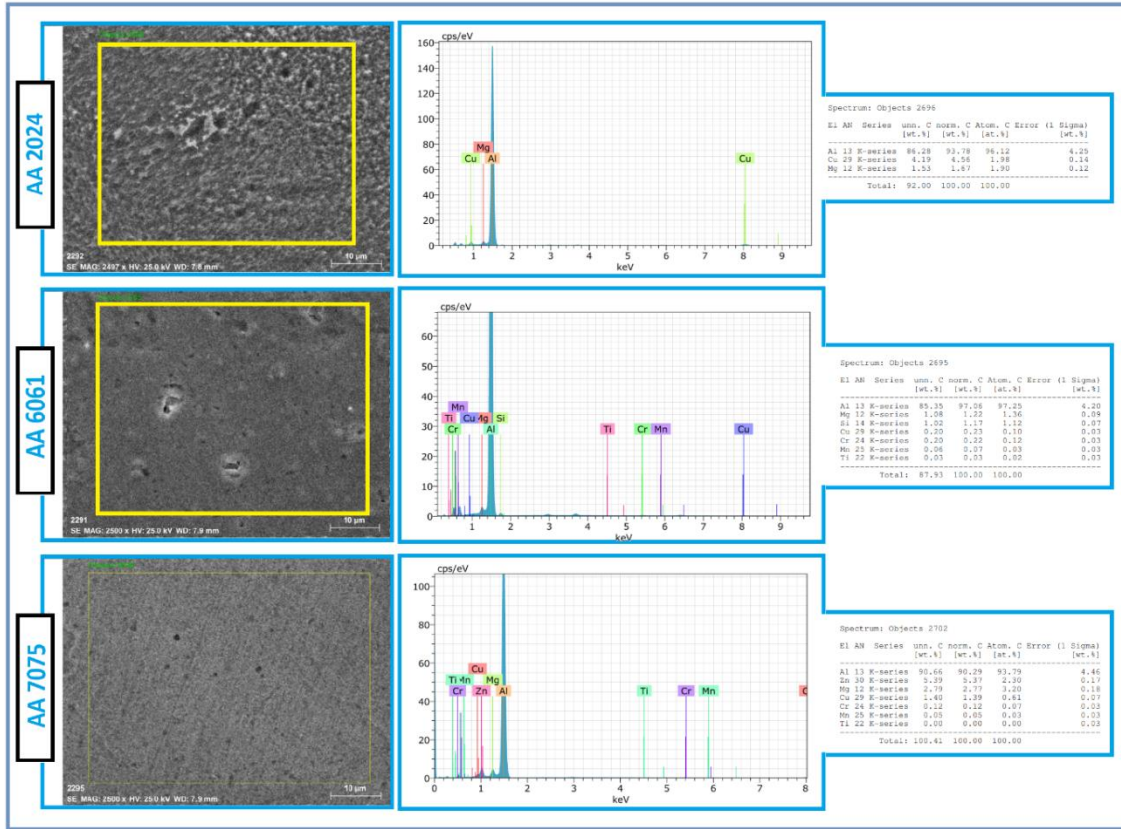


Şekil 5.11: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait sığ-kriyojenik soğutma sonrası işlemsiz ham numune ve yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunelere ait FESEM görüntüsü.

Kriyojenik işlem ile Al alaşım serilerine ait üretim ve işleme sürecinde iç yapıda var olabilecek gerilmelerin giderilmesi, karbür kalıntılarının dağıtılması ve tane boyutlarındaki değişimlerinin malzeme özelliklerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda uygulanan ≈ -75 °C sıcaklıkta 168 saat sığ-kriyojenik işlem uygulanan numunelere ait FESEM görüntülerinde Şekil 5.11’de belirtilen sığ-kriyojenik işlem

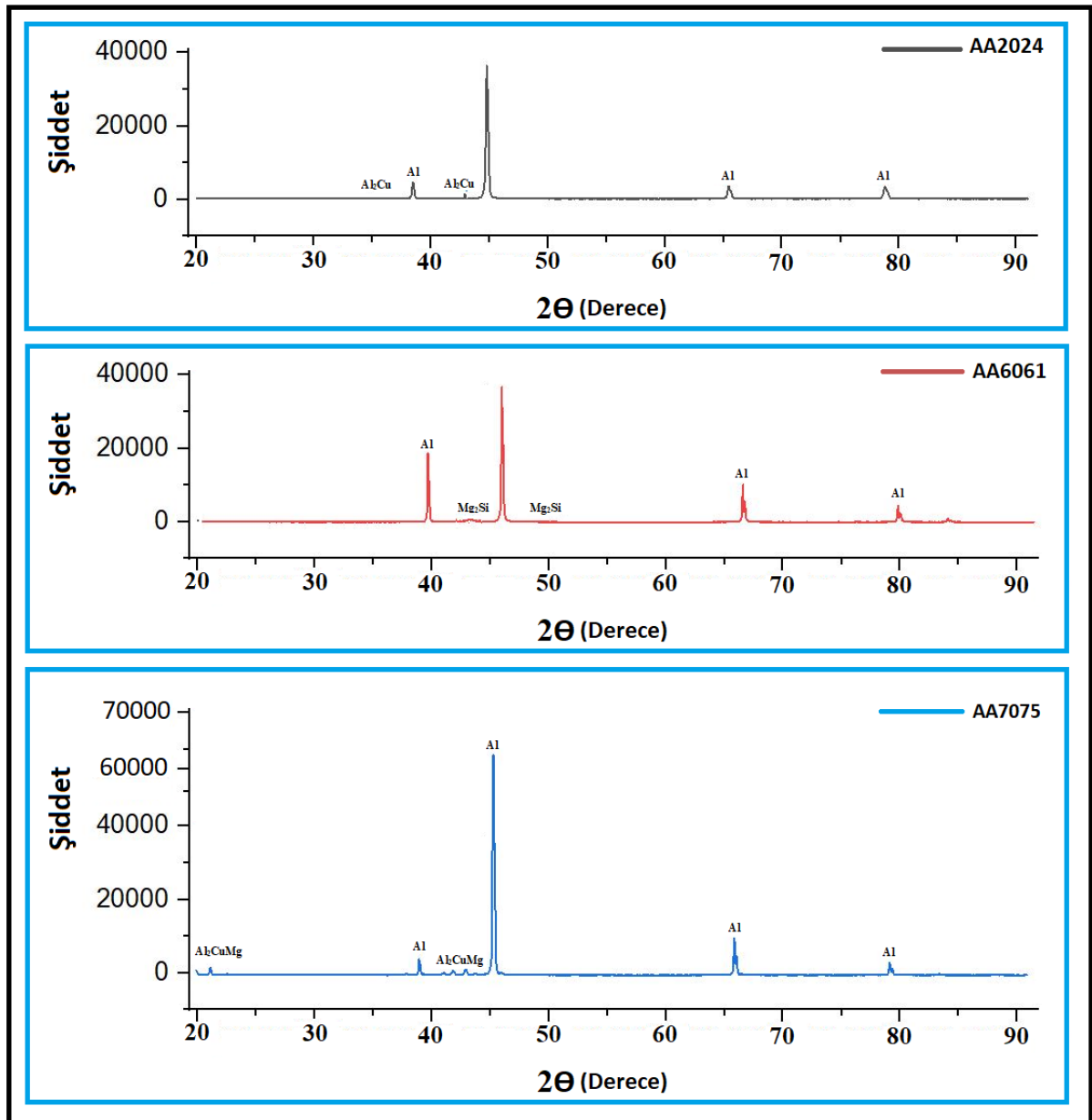
uygulanmamış çözündürme ve yaşlandırma işlemi uygulanmış Al alaşımlarına kıyasla işlem görmemiş ham numunelerin başlangıç durumunda iç yapıdaki çökelti oluşum oranının sığ-kriyojenik işlem sonunda daha az olduğu Şekil 5.11. a, c, e’de görülmektedir. Sığ-kriyojenik işlem sonunda uygulanan çözündürme ve yaşlandırma sonrası iç yapıda çökelti oranının arttığı ve tane boyutlarında küçülmelerin meydana geldiği Şekil 5.11. b, d, f’de görülmektedir. AA2024 ve AA6061 Al alaşımlarının FESEM görüntülerinde ısıtma işlemi sonrası oluşan çökelti oranının AA7075 Al alaşımına göre daha belirgin olduğu, AA7075 Al alaşımına ait FESEM görüntülerinde ise tane boyut küçülmelerinin AA2024 ve AA6061 Al alaşımlarına kıyasla daha belirgin olduğu görülmektedir (Liang ve diğ. 2020)(Lin ve diğ. 2013).

Şekil 5.12’te AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarına uygulanan belirli alanın taranması ile elde edilen EDS analizi yer almaktadır. EDS analizi ile Al alaşımlarına ait ana element ve alaşımların elementleri ve mevcut elementlerin yapı içerisindeki oranların yüzdelik olarak belirtilmiştir. AA2024 alaşımı için alaşımların elementi Cu, AA6061 Al alaşımının alaşımların elementi Mg, AA7075 Al alaşımının ana alaşımların elementi Zn olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.12: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine ait FESEM ve FESEM görüntüsü üzerinden alınmış EDS analiz verileri.

Isıl işlem sonrası Al_2Cu , Mg_2Si , Al_2CuMg çökeltilerin yaşlandırma ısıl işlemi sırasında yapı içerisine çökmesi gerçekleşmiştir. Çözündürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren ısıl işlem aşamaları sonunda maksimum sertliğe sahip Al alaşım serilerine XRD analizi uygulanmış uygulanan ısıl işlem başmaklarını sonucunda çökelen fazlar Şekil 5.13'te yer alan XRD analizi ile belirlenmiştir (Beyazıd ve diğ.2016)(Leu ve diğ. 2016).



Şekil 5.13: AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serilerine uygulanan çözündürme + su verme + sığ- kriyojenik ve yaşlandırma ısıt işlemleri sonrası XRD analiz verileri.

6. Sonuç ve Öneriler

Yapılan tez çalışmasında; 2 mm et kalınlığına sahip AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serisi levhalar 0° ile 1° aralığında 0,1° artış oranı ile farklı kesit alanına sahip numuneler su jeti ile üretilmiştir. Üretilen numunelere ise; çözündürme + su verme + yaşlandırma ve çözündürme + su verme + sıg-kriyojenik + yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanmış ve alaşımlarının sertlik özellikleri ve doğal frekans özellikleri incelenerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Çözündürme + su verme işlemleri sonunda AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarının sertlik değerli sırasıyla 73 HV, 42 HV ve 31HV olarak elde edilmiştir. Çözündürme + su verme + yaşlandırma ısıl işlemleri sonunda maksimum sertlik değeri AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serisi için sırasıyla 7 saat, 12 saat ve 13 saat'te elde edilmiştir. AA2024 alaşım serisi için maksimum sertlik değeri 131HV, AA6061 alaşımı için 93HV, AA7075 alaşımı için 143 HV olarak tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri AA7075 alaşımında elde edilmiştir.
- Çalışmanın çözündürme + su verme + ≈ -75 °C sıg-kriyojenik soğutma + yaşlandırma ısıl işlemi sonunda, maksimum sertlik değeri AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşım serisi için sırasıyla 6 saat, 12 saat ve 12 saatlerde elde edilmiştir. AA2024 Al alaşım serisi için maksimum sertlik değeri 134HV, AA6061 Al alaşımı için 92HV, AA7075 Al alaşımı için 142HV olarak tespit edilmiştir.
- Çalışmada ısıl işlemler neticesinde sertlik üzerine sıg-kriyojenik işleminin belirgin olarak etki etmediği görülmüştür. Sıg-kriyojenik sonunda numunelerde doğrudan yaşlandırmaya ısıl işlemine göre nispeten daha kısa sürede en yüksek sertlik değerine ulaştığı görülmüştür.
- Çözündürme + su verme + sıg kriyojenik + yaşlandırma ısıl işlemleri sonunda yapılan XRD analizi sonucunda AA2024, AA6061 ve AA7075 Al alaşımlarının yapılarında sırasıyla Al_2Cu , Mg_2Si , Al_2CuMg fazlarının olduğu tespit edilmiştir.
- AA2024, AA6061 ve AA7075 alaşım serilerine uygulanan çözündürme + su verme + yaşlandırma ve çözündürme + su verme + sıg-kriyojenik soğutma + yaşlandırma ısıl işlem basamaklarının sonunda her bir Al alaşım serisinden alınan ölçümler doğrultusunda uygulanan ısıl işlem basamaklarının malzemenin doğal titreşim değerine belirgin bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.
- Kesit alandaki değişimin malzemenin doğal titreşim değerine doğrudan etkilediği 0°'den 1°'ye doğru kısa kenar sabit uzun kenar serbest durumda yapılan ölçümlerde

doğal titreşim değerinin kesit alana bağlı olarak 36,62Hz'den 39,06Hz değerine artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir.

- Doğal frekans değeri ölçümleri 1° 'den 0° 'ye doğru uzun kenar sabit kısa kenar serbest durumda olacak şekilde yapılan ölçümlerde kesit alandaki açısal değişime bağlı olarak 36.62Hz'den 34,18Hz değerine doğal frekans değerinde azalma olduğu gözlenmiştir.
- Doğal frekans test sonunda elde edilen deneysel analiz sonuçları ve analitik analizler birbirlerine yakın çıkmıştır. Aralarındaki farkın nedeni analitik analizde Euler-Bernoulli kirişinin kullanılması ve kesme kuvvetlerinin ihmal edilmesidir. Ayrıca deneysel analizde kullanılan numunelerde içyapı ya da üretim hatalarının neden olduğu düşünülmektedir.



7. KAYNAKCA

Aksöz, S., Ada, H., İnce, E., Özsoy, S., ve Kaplan, Y., "T/M Yöntemi ile Üretilen Al Alaşımlarında Zn, Cu ve Mg Elementlerinin, Yaşlanma, Mikroyapı ve Sertliğe Etkileri", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8(1), 150-159, (2007).

Aksöz, S., Özdemir, A. T., Bostan, B., "AA2014 Alüminyum Alaşım Tozlarının Karbon İle Sentezlenmesi ve Özelliklerinin Belirlenmesi", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(1), (2012).

Aksöz, S., Özdemir, A. T., Çalın, R., Altınok, Z., Bostan, B., "Sinterleme, Yaşlandırma Ve Kriyojenik Isıl İşlemlerinin AA2014-B4C Kompozit Yapısına ve Mekanik Özelliklerine Etkileri", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(4), (2013).

Al-Saadı, H. I. A., TUNAY, R. F., "Sunı Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi", Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5(3), 525-532., (2017).

Akhbarizadeh, A., Shafyei, A., & Golozar, M. A., "Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel", Materials & Design, 30(8), 3259-3264.,(2009)

Aluminum Association.,Guidelines for the Use of Aluminum with Food and Chemicals: Compatibility Data on Aluminum in the Food and Chemical Process Industries: Aluminum Association, (1994).

Anderson, K., Weritz, J. and Kaufman, J. G., 1xxx Aluminum Alloy Datasheets. Properties and Selection of Aluminum Alloys: ASM Handbooks, ASM International., (2019).

Apelian, D., Aluminum cast alloys: enabling tools for improved performance: North American Die Casting Association, New York, (2009).

Araghchi, M.,Mansouri, H.,Vafaei, R., and Guo, Y., "A novel cryogenic treatment for reduction of residual stresses in 2024 aluminum alloy",Materials Science and Engineering A, 689, 48-52,(2007).

Atlıhan, G., and Ergene, B., "Vibration analysis of layered composite beam with variable section in terms of delamination and orientation angle in analytical and numerical methods", Acta Physica Polonica., 134,1, (2018).

Atlıhan, G., Ovalı, İ., ve Abdullah, E.,"Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Bal Petekli Yapıların Titreşim Davranışlarının Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi", International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 5(2), 98-108 (2021).

Avison, J.,John. The World of Physics. 2nd ed: Thomas Nelson and Sons Ltd, (1989).

Bo, W. A. N. G., Chen, X. H., Pan, F. S., Mao, J. J., Yong, F. A. N. G., "Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25(8), 2481-2489., (2015).

Bayazid, S. M., Farhangi, H., Asgharzadeh, H., Radan, L., Ghahramani, A., Mirhaji, A., ‘Effect of cyclic solution treatment on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075 Al alloy’, *Materials Science and Engineering: A*, 649, 293-300.,(2016).

Bortoleto, E. M.,Rovani, A. C.,Seriapopi, V.,Profito, F. J.,Zachariadis, D. C.,Machado, I. F., and Souza, R. M., "Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test", *Wear*, 301(1-2), 19-26,(2007).

Callister, W. D., Rethwisch, D. G., ‘Materials science and engineering: an introduction’, New York: John wiley & sons., Vol. 7, pp. 665-715., (2007).

Cisse, J., Kerr, H. W., and Bolling, G. F. The nucleation and solidification of Al-Ti alloys: *Metallurgical and Materials Transactions B*, 5, 633-641, (1974).

Czerwinski, F., ‘Current trends in automotive lightweighting strategies and materials’, *Materials*, 14(21), 6631, (2021).

Çağan, S. Ç., Uğurlu, M., Buldum, B. B., ve Sevim, İ., ‘Alüminyum ve alaşımlarının asker araçlarda kullanımı’ II Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, 06-08, (2017).

Dagdelen, T., and Ruhani, S., ‘Finite Element Analysis of the Dynamic Effect of Soil-Structure Interaction of Portal Frame Bridges-A Parametric Study, Mater Degree,KTH Royal Institute of Technology, Stockholm,(2018).

Davis, J. R. ‘Alloying: understanding the basics’, ASM international, (2001).

Davis, J. R., Aluminum and aluminum alloys: ASM international, (1993).

Demir, M.,Tekin, O., ve Demir, A.,. "T6 Yaşlandırma Isıl işlemi Uygulanan Ekstrude AA 7075 Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Davranışları",*Academic Perspective Procedia*, 3(1), 763-771,(2007).

Dilmeç, M., Tinkir, M., Arıkan, H., ‘Al 2024 alaşımlarının çökeltme sertleşmesi işlemi koşullarının şekillendirilebilirliğe etkisinin incelenmesi’, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 231-248., (2015).

Eapen, J., Murugappan, S., and Arul, S., ‘A study on chip morphology of aluminum alloy 6063 during turning under pre cooled cryogenic and dry environments’, *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 7686-7693, (2017).

El, F., Kara, F., ‘Sığ Kriyojenik İşlemin Sleipner Soğuk İş Takım Çeliğinin Metalurjik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması’, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 111-120, (2021).

Farndon, J., Aluminum: Marshall Cavendish, (2001).

Feng, Z., Liu, C., Ma, P., Yang, J., Chen, K., Li, G., Huang, Z., ‘Initial holding time dependent warm deformation and post-ageing precipitation in an AA7075-T4 aluminum alloy’, *Journal of Materials Processing Technology*, 294, 117111., (2021).

Geological, S., Metal Prices in the United States Through 2010, 15 February 2023, <https://pubs.usgs.gov/sir/2012/5188/>, (2010).

Ghali, E., Sastri, V. S., and Elboudjaini, M., Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions. John Wiley & Sons, (2007).

Gibson, R. F., Principles of composite material mechanics: CRC press., (2016).

Gül, M. S., Gökkaya, H., Kondul, B., ÇETİN, M. H., “Makine Konstrüksiyonunda Kullanılabilirlik İçin Hastelloy C-22 Süper Alaşımının Aşınma Direncini Kriyojenik İşlem İle Etkileşiminin İncelenmesi”, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 175-188, (2022).

Güven, Ş., Delikanlı, Y., “AA 2024 Alüminyum Alaşımında Çökelme Sertleşmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi”, Teknik Bilimler Dergisi, 2(2), 13-20., (2012).

Hekimoğlu, A. P., & Turan, Y. E., “Çinko oranının Al-(5-50) Zn alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine etkisi” Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 16-25, (2019).

Huang, H. W., ve Ou, B. L., "Evolution of precipitation during different homogenization treatments in a 3003 aluminum alloy", Materials and Design, 30(7), 2685-2692, (2007).

Huda, Z., Taib, N. I., ve Zaharinie, T.,. "Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy", Materials Chemistry and Physics, 113(2-3), 515-517, (2007).

Hussein, S. G., Al-Shammari, M. A., Takhakh, A. M., & Al-Waily, M., “Effect of heat treatment on mechanical and vibration properties for 6061 and 2024 aluminum alloys”, Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, 43(1), 48-66, (2020).

James, A. M. , & L. M. P. M., Chemical and physical data. Macmillan: James, A. M., & Lord, M. P. (1992). Macmillan’s chemical and physical data. Macmillan, (1992).

Jiang, L., Wang, C., Fu, H., Shen, J., Zhang, Z., ve Xie, J.,. "Discovery of aluminum alloys with ultra-strength and high-toughness via a property-oriented design strategy", Journal of Materials Science and Technology, 98, 33-43, (2007).

Kaufman, J. G., & Rooy, E. L., Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications: Asm International, (2004).

"Kaufman, J. G., Introduction to aluminum alloys and tempers: ASM international, (2000).

Kayalı, E. S., “Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları”, İstanbul: İTÜ Yayınları, (1991).

Khaji, K., & Al Qassemi, M., “The role of anode manufacturing processes in net carbon consumption”, Metals, 6(6), 128, (2016).

Khot, S., & Borah, U., ‘‘Finite element analysis of pin-on-disc tribology test’’, *International Journal of Science and Research*, 4(4), 1475-1480, (2015).

Krasnowski, M., ve Kulik, T., "Nanocrystalline Al-Fe intermetallics - light weight alloys with high hardness", *Intermetallics*, 18(1), 47-50,(2007).

Kumar, V., Mehdi, H., & Kumar, A., ‘‘Effect of silicon content on the mechanical properties of aluminum alloy’’, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(4), 1326-1330, (2015).

Kutz, M., *Handbook of Materials Selection*: John Wiley&Sons. Inc., New York, (2002).

Kvande, H., ‘‘Environmental improvements in aluminum production technology’’, *Light Metal Age*, 57(1-2), (1999).

Kvande, H., Two hundred years of aluminum... or is it aluminium?: *Jom*, 60(8), 23-24", (2008).

Liang, M., Chen, L., Zhao, G., & Guo, Y. ‘‘Effects of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of naturally aged EN AW 2024 Al alloy sheet’’, *Journal of Alloys and Compounds*, 824, 153943.,(2020).

Liao, J. X., Xia, L. F., Sun, M. R., Liu, W. M., Xu, T., & Xue, Q. J., ‘‘The tribological properties of a gradient layer prepared by plasma-based ion implantation on 2024 aluminum alloy’’, *Surface and Coatings Technology*, 183(2-3), 157-164,(2004).

Lide, D. R., *CRC handbook of chemistry and physics* :CRC press, (Vol. 85),(2004).

Leu, J. S., Chu, C. L., Fuh, Y. K., Huang, E. W., Lin, K. F., & Lee, S., ‘‘The combination of rolling-and-T6-treatments with Al₂O₃-reinforcing-particles effect on A6061 metal-matrix composites’’, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 230(1), 233-239.,(2016).

Liu, Q., Chen, S., Gu, R., Wang, W., Wei, X., ‘‘Effect of heat treatment conditions on mechanical properties and precipitates in sheet metal hot stamping of 7075 aluminum alloy’’, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 4423-4436.,(2018).

Ludema, K. C., and Ajayi, L., *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*: CRC press, (2018).

Lin, YC, Jiang, YQ, Chen, XM, Wen, DX, and Zhou, HM., ‘‘Effect of creep aging on precipitates of 7075 aluminum alloy’’, *Materials Science and Engineering: A*, 588, 347-356.,(2013).

Matsumoto, M., Shirato, H., Yagi, T., Shijo, R., Eguchi, A., and Tamaki, H., ‘‘Effects of aerodynamic interferences between heaving and torsional vibration of bridge decks: the case of Tacoma Narrows Bridge’’, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 91(12-15), 1547-1557, (2003).

Maryam, G., Mohammad, J.M., Majid, E., Hamed, J.A., ‘‘Evaluation of different heat treatment cycles on improving single point incremental forming of AA6061 aluminum alloy’’, Int. J. Adv. Manuf. Technol (2019).

Menteşe, E. B., Aydoğan, F., ve Saklakoğlu, N., AlSi7Mg Döküm Alaşımında T6 Isıl İşlem Parametrelerinin Mekanik Değerlere Etkilerinin İncelenmesi,15 February 2023,https://akademi.tudoksad.org.tr/site/file?u=20181129072502_congress_file_221.pdf&t=D%C3%B6k%C3%BCm+Ala%C5%9F%C4%B1m%C4%B1nda+T6+I%C5%9F%C4%B1+%C4%B0%C5%9Flem+Parametrelerinin+Mekanik+De%C4%9Ferlere+Etkisinin+%C4%B0ncelenmesi, (2010).

Merkley, B., "The effect of zinc on cold rolling textures in cast aluminum", Master Degree, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada (2016).

Meyveci, A., Karacan, İ., Çalığülü, U., & Durmuş, H., ‘‘Pin-on-disc characterization of 2xxx and 6xxx aluminium alloys aged by precipitation age hardening’’, Journal of Alloys and Compounds, 491(1-2), 278-283, (2010).

Murray, J. L.,’’ The aluminium-copper system’’,International metals reviews, 30(1), 211-234, (1985).

'Nam, S. W., and Lee, D. H.,’’The effect of Mn on the mechanical behavior of Al alloys’’, Metals and materials, 6(1), 13-16, (2000).

Nardeli, J. V., Fugivara, C. S., Taryba, M., Pinto, E. R., Montemor, M. F., Benedetti, A. V., Tannin: A natural corrosion inhibitor for aluminum alloys: Progress in Organic Coatings, 135, 368-381(2019).

Neto, J. G. C., Gama, S., Ribeiro, C. A., ‘‘Experimental study of the Al- Cr equilibrium diagram’’. Journal of alloys and compounds, 182(2), 271-280, (1992).

Otarawanna, S., Dahle, A. K., ‘‘Casting of aluminium alloys. In Fundamentals of aluminium metallurgy’’, Woodhead Publishing, (pp. 141-154), (2011).

Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S., & Picu, R. C., ‘‘Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy’’, Materials & Design, 31(2), 972-975., (2010).

Pabel, T., Dambauer, G., Geier, G., Rockenschaub, H., Gschwandtnr, R., Schumacher, P., ‘‘Methoden und Ergebnisse zur Optimierung der Wärmebehandlung von aushärtbaren Aluminium-Gusslegierungen’’, BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 7(156), 269-274, (2011).

Pala, Y., Beyçimen, S., ‘‘Free vibration analysis of mixed supported beam’’, Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences,26(1), (2007).

Ponweiser, N., Lengauer, C. L., Richter, K. W., ‘‘Re-investigation of phase equilibria in the system Al–Cu and structural analysis of the high-temperature phase η 1–Al1– δ Cu’’, Intermetallics, 19(11), 1737-174, (2011).

- Rana, R. S., Purohit, R., Das, S., ‘‘Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites’’, International Journal of Scientific and research publications, 2(6), 1-7, (2012).
- Rao, S. S., Engineering optimization: theory and practice. John Wiley & Sons, (2019).
- Reda, Y., Abdel-Karim, R., Elmahallawi, I., ‘‘Improvements in mechanical and stress corrosion cracking properties in Al-alloy 7075 via retrogression and reaging’’, Materials Science and Engineering: A, 485(1-2), 468-475.,(2008).
- Reed, R. P., & Timmerhaus, K. D., Cryogenic engineering: fifty years of progress. Springer, (2007).
- Revie, R. W., Uhlig's corrosion handbook : John Wiley & Sons, vol.51, (2011).
- Rometsch, P. A., Zhang, Y., Knight, S., ‘‘Heat treatment of 7xxx series aluminium alloys—Some recent developments’’, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24(7), 2003-2017., (2014).
- Sanders Jr, R. E., Hollinshead, P. A., Simielli, E. A., ‘‘Industrial development of non-heat treatable aluminum alloys’’, In Materials Forum (Vol. 28, pp. 53-64),(2004).
- Savaşkan, T., Malzeme bilgisi ve muayenesi: Derya Kitabevi., (1999).
- Sielski, R. A., ‘‘Research needs in aluminum structure’’, Ships and Offshore Structures, 3(1), 57-65., (2008).
- Singh, M., Prasad, B. K., Mondal, D. P., Jha, A. K., ‘‘Dry sliding wear behaviour of an aluminium alloy–granite particle composite’’, Tribology International, 34(8), 557-567., (2001).
- Soboyejo, W., Mechanical properties of engineered materials : CRC press., (Vol. 152), (2002).
- Songmene, V., Khettabi, R., Zaghbani, I., Kouam, J., Djebara, A., ‘‘Machining and machinability of aluminum alloys’’, Alum. Alloys Theory Appl, 377, 400., (2011).
- Sönmez, H., Metal Ekstrüzyonu: Eğitim Yayınları.,(1989).
- Spur, G., Uhlmann, E., Elbing, F., ‘‘Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application’’, Wear, 233, 402-411., (1999).
- Şenel, M. C., Gürbüz, M., ve Koç, E., ‘‘Alüminyum-grafen kompozit yapılarda çekme dayanımının, aşınma direncinin ve mikroyapının incelenmesi’’, In SETSCI Conference Indexing System (Vol. 144, p. 149), (2018).
- Tariq, F., Naz, N., Baloch, R. A., Faisal., ‘‘Characterization of material properties of 2xxx series al-alloys by non destructive testing techniques’’, Journal of Nondestructive Evaluation, 31, 17-33., (2012).

Tezel, T., Atlıhan, G., Kovan, V., Topal, E. S., ‘‘3B Yazıcı ile PLA Malzemeden Üretilmiş İnce Kirişlerin Yazdırma Yönelim Açısının Doğal Frekansa Etkisi’’, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31(1), 123-128., (2019).

Vander Voort, G. F. and Asensio-Lozano, J., ‘‘The al-si phase diagram. Microscopy and Microanalysis’’, 15(S2), 60-61, (2009).

Venetski, S., Silver from clay: Metallurgist, 13(7), 451-453., (1969).

Wang, H. Q., Sun, W. L., & Xing, Y. Q., ‘‘Microstructure analysis on 6061 aluminum alloy after casting and diffuses annealing process’’, Physics Procedia, 50, 68-75., (2013).

Wang, S. C., Starink, M. J., Gao, N., ‘‘Precipitation hardening in Al-Cu-Mg alloys revisited’’, Scripta Materialia, 54(2), 287-291., (2006).

‘‘Quantitative study of the corrosion evolution and stress corrosion cracking of high strength aluminum alloys in solution and thin electrolyte layer containing Cl’’, Corrosion Science, 178, 109076., (2021).

Wang, Q. G., ‘‘Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357’’, Metallurgical and materials Transactions A, 34, 2887-2899., (2003).

Yalçın, N., Kayır, Y., Erkal, S., ‘‘AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma yöntemlerinin işlenebilirliğe etkisinin taguchi ve anova ile araştırılması’’, Politeknik Dergisi, 20(4), 743-751., (2017).

Yaşar, A. C., Eser, A. A., Özcan, A., Acarer, M., ‘‘ Alüminyum Dövme Alaşımlarında Çözeltiye Alma Sıcaklığı ve Süresinin Dövme Sonrası Yapı ve Serliğe Etkileri’’, (2019).

Yıldırım, M., Şimşek, İ., Özyürek, D., ‘‘Yaşlandırılmış AA7075 alaşımında solüsyona alma sıcaklığının aşınma performansına etkisinin incelenmesi’’, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 6(1), 233-239., (2018).

Yılmaz, R., Özyürek, D., & Kibar, E., ‘‘Yeniden çözeltiye alma parametrelerinin 7075 alüminyum alaşımlarının sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi’’, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(2), (2012).

Zhao, Z., Hong, S. Y., ‘‘Cooling strategies for cryogenic machining from a materials viewpoint’’, Journal of materials engineering and performance, 1, 669-678., (1992).

Zobac, O., Kroupa, A., Zemanova, A., Richter, K. W., ‘‘Experimental description of the Al-Cu binary phase diagram’’, Metallurgical and Materials Transactions A, 50, 3805-3815., (2019).