



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



AKILLI BOMBA GÜDÜM KİTLERİNDE
KULLANILAN A357 ALÜMİNYUM
ALAŞIMININ UYARLANABİLİR NÖRO-
BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ İLE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİ

Onur AL

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Onur AL tarafından hazırlanan “Akıllı Bomba Güdüm Kitlerinde Kullanılan A357 Alüminyum Alaşımının Uyarlanabilir Nöro-Bulanık ıkarım Sistemi ile Mekanik zelliklerinin Tahmini” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri yeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Mustafa ACARER

.....

Danışman

Prof.Dr. şennur CANDAN

.....

ye

Prof.Dr. Yunus TREN

.....

ye

Doç.Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

.....

ye

Dr.Öğr.yesi Ayşe Merve ACILAR

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez alışması NEU BAP tarafından 211419002 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Onur AL
24.07.2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

AKILLI BOMBA GÜDÜM KİTLERİNDE KULLANILAN A357 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ UYARLANABİLİR NÖRO-BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİ

Onur AL

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şennur CANDAN

2024, 161 Sayfa

Jüri

Prof.Dr. Şennur CANDAN

Prof.Dr. Mustafa ACARER

Prof. Dr. Yunus TÜREN

Doç.Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

Dr.Öğr.Üyesi Ayşe Merve ACILAR

A357 (Al-7Si-0.6Mg) serisi Al alaşımları, otomotiv, havacılık ve savunma sanayilerinde karmaşık döküm parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alçak basınç döküm yöntemi (LPDC) hem kum hem de kokil kalıpların avantajlarını kapsaması nedeniyle, son yıllarda özellikle savunma sanayinde kritik döküm parçaların üretiminde tercih edilmektedir.

Bu tez çalışması, alüminyum dökümhanelerinin spesifikasyon standart limitleri dahilinde olmasına rağmen, alaşım bileşimindeki küçük değişikliklerin mekanik özelliklere olan etkisini anlama ihtiyacına dayanmaktadır. Bu bağlamda, A357 Al alaşımlarının kalite standardı çerçevesinde dökümünün sağlanması ve döküm sırasında oluşabilecek kalite problemlerinin en aza indirgenmesi amacıyla; standart aralıkta olmasına rağmen alaşım elementleri arasındaki çok küçük bileşim değişikliklerine bağlı nihai çekme dayanımı (UTS), akma dayanımı (YS) ve uzama (ϵ) değerlerinin makine öğrenmesi yöntemi (ML) kullanılarak tahmini çalışılmıştır. Alçak Basınçlı Döküm A357 Al alaşımının kimyasal bileşimi ve çekme özelliklerine ilişkin veriler MCM Savunma Makine Ltd. ve ER Döküm AŞ. firmalarından temin edilmiştir. A357 Al alaşımındaki ana alaşım elementleri Si ve Mg ile birlikte en yaygın safsızlık içerikleri Fe, Ti ve Cu elementleri (5 girdi) seçilerek bu elementlerin arasındaki çok küçük değişikliklere bağlı UTS, YS ve ϵ (3 çıktı) değerlerindeki değişiklikleri tahmin için Regresyon Algoritmaları, Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Uyarlanabilir Nöro Bulanık Sistem (ANFIS) ile ML algoritmaları bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

Sonuçlar, hata kareler ortalamasının karekök değeri (RMSE) karşılaştırıldığında Regresyon Algoritmalarının makul tahmin sonuçlarına ulaşamadığını göstermiştir. YSA algoritmasının uygulanmasında ise veri setini ezberleme (overfitting) problemi ortaya çıkmıştır. Sistemin az miktarda veriye sahip olması durumunda ezberleme sorunu olmadan daha yüksek doğrulukta bir algoritma olan ANFIS modeli, çekme özelliklerini etkileyen en zararlı unsurun Fe içeriği olduğunu öngörmüştür. Bu modele göre UTS, YS ve ϵ üzerindeki göreceli önem sırası, alaşımın Fe içeriğinden sonra sırasıyla Si, Mg ve Ti içeriği olarak ortaya çıkmaktadır. Öte yandan, Cu içeriğinin etkisi önemsiz görünmektedir. UTS, YS ve ϵ değerlerinin karşılaştırma sonuçları tutarlılık göstermiş ve ANFIS modeli tarafından tahmin edilen veriler ile deneysel veriler kabul edilebilir düzeyde benzer bir eğilim göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Al-Si Alaşımları, A357 Al Alaşımı, LPDC, Mekanik özellikler, Makine öğrenmesi

ABSTRACT

Ph.D THESIS

PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF A357 ALUMINUM ALLOY USED IN SMART BOMB GUIDANCE KITS BY USING ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM

Onur AL

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Şennur CANDAN

2024, 161 Pages

Jury

Prof.Dr. Şennur CANDAN

Prof.Dr. Mustafa ACARER

Prof.Dr. Yunus TÜREN

Assoc.Prof.Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

Asst.Prof.Dr. Ayşe Merve ACILAR

A357 (Al-7Si-0.6Mg) series Al alloys are widely used in the production of complex casting parts in the automotive, aerospace and defense industries. In recent years, especially, in the defense industry, Low Pressure Casting method (LPDC) has been preferred in the production of critical casting parts, as it includes the advantages of both sand and permanent molds.

This thesis is based on the need to understand the impact of small changes in alloy chemistry on mechanical properties despite being within the specification standard limits of aluminum foundries. In order to ensure the casting of A357 Al alloys within the framework of the quality standard and to minimize the quality problems that may occur during casting; the ultimate tensile strength (UTS), yield strength (YS) and elongation (ϵ) values depending on very small changes between the alloying elements (although within the standard range) were estimated using the machine learning method (ML). Data regarding the chemical composition and tensile properties of LPDC A357 Al alloy were obtained from MCM Defense Machinery Ltd. and ER Döküm AŞ. The main alloying elements in the A357 alloy, Si and Mg, as well as the most common impurity contents, Fe, Ti and Cu elements (5 inputs), were selected to predict the changes in UTS, YS and ϵ (3 outputs) values due to very small changes between these elements. In this work, Regression Algorithms, Artificial Neural Network (ANN) and Adaptive Neuro Fuzzy System (ANFIS) methods were used as ML algorithms.

The results showed that the prediction results obtained from regression algorithms could not reach the reliable predictions. In the application of the ANN algorithm, the problem of overfitting the data set arose. The ANFIS model, which is a higher accuracy algorithm without memorization problems if the system has a small amount of data, predicted that the most detrimental element affecting tensile properties is Fe content. According to this model, the order of relative importance on UTS, YS and ϵ is the Si, Mg and Ti content, respectively, after the Fe content of the alloy. On the other hand, the effect of Cu content appears to be insignificant. The comparison results of UTS, YS and ϵ values showed consistency, and the data predicted by the ANFIS model and the experimental data showed an acceptably similar trend.

Keywords: Al-Si Alloys, A357 Al alloy, LPDC, Mechanical properties, Machine learning

ÖNSÖZ

Doktora çalışmalarım boyunca, tecrübelerini ve birikimlerini paylaşan, teşvikini, yardımını, sabrını ve ilgisini esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Şennur CANDAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Veri temini ve test döküm işlemleri için Er Döküm A.Ş.'den Ertan CÜCELOĞLU, Cihad CÜCELOĞLU'na ve veri temini için MCM Savunma ve Makine Ltd.'den Celal ASİLTÜRK ve Dr.Tuğba DANACI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Veri setinin temininde ve sonuçların yorumlanmasında bilgi ve birikimlerini paylaşan Sayın Prof. Dr. Ercan CANDAN'a çok teşekkür ederim.

Tez sürecinde, başından sonuna kadar bana destek veren ve yardımını esirgemeyen Dr. Fethi CANDAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) 211419002 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Necmettin Erbakan Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim.

Son olarak hakkını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim anneme ve babama, her daim iyi ki varlar dediğim abilerime, bu süreçte desteğini esirgemeyen ve ihtiyacım olduğu her an yanımda olan canım eşim Nihal AL'a ve canım oğlum Alper Tuna AL'a çok teşekkür ederim. Eğitimimde desteğini eksik etmeyen amirlerime, varlıklarını her daim yanımda hissettiğim dostlarıma ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Onur AL
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER TABLOSU.....	ix
ÇİZELGELER TABLOSU	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1 GİRİŞ.....	1
2 KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1 Alüminyum Alaşımları.....	4
2.1.1 Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	4
2.1.2 Havacılık ve Savunma Sanayinde Kullanılan Al Alaşımları.....	5
2.1.3 Al-Si Alaşımlarında Mg, Cu, Fe ve Ti Elementlerinin Etkisi	7
2.1.4 Alüminyum Alaşımlarının Döküm Yöntemleri.....	19
2.1.5 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler.....	28
2.2 Akıllı Bomba Güdüm Kitleri	35
2.3 Makine Öğrenmesi (ML)	38
2.3.1 Gözetimli Öğrenme.....	39
2.3.2 Gözetimsiz Öğrenme	44
2.3.3 Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları (YSA)	45
2.3.4 Bulanık Mantık ve Sinir Ağları Entegrasyonu	54
2.3.5 Bulanık Sistemler ve Sinir Ağlarının Özellikleri.....	61
2.4 Makine Öğrenme (ML) Algoritmalarının Malzeme Özellik Tahmininde Uygulamaları	67
2.5 Alüminyum Alaşımlarına YSA ve ANFIS Algoritması Uygulamaları ile İlgili Literatür Çalışmaları	70
3 MATERYAL VE YÖNTEM.....	75
3.1 Veri Seti	75
3.2 Döküm İşlemi.....	75
3.3 Isıl İşlem.....	78
3.4 Mikroyapı Analizleri.....	78
3.5 Mekanik Testler	79
3.5.1 Sertlik Testi.....	79
3.5.2 Çekme Testi	79
3.6 Makine Öğrenmesi Yöntemleri.....	80

3.6.1	Materyal Öğrenme Döngüsü.....	80
3.6.2	Regresyon Algoritmaları.....	81
3.6.3	YSA	81
3.6.4	ANFIS Yönteminin Tasarımı.....	81
4	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	86
4.1	Mikroyapı Sonuçları.....	86
4.2	Mekanik Test Sonuçları	103
4.3	Mikroyapı ve Mekanik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	103
4.4	Tahmin Analiz Sonuçları ve Değerlendirme.....	107
4.4.1	Regresyon Algoritmaları.....	107
4.4.2	YSA	112
4.4.3	ANFIS	114
5	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	127
5.1	Sonuçlar.....	127
5.2	Öneriler	128
6	KAYNAKLAR	129
EKLER	142

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 2.1. Al-Si denge diyagramı.....	8
Şekil 2.2. Al-Si ötektik veya ötektikaltı (a), Al-Si ötektiküstü (b) yapıyı gösteren Al-Si alaşımlarının optik mikroskop görüntüsü (Toschi, 2018) (Abboud ve Mazumder, 2020)9	9
Şekil 2.3. Al-Mg ₂ Si faz diyagramı (Shivkumar ve ark., 1989)	10
Şekil 2.4. İki farklı yaşlanma koşulu için A356/357 Al alaşım numunelerinin Mg içeriğine karşı ortalama akma gerilimi (Taylor ve ark., 2000)	10
Şekil 2.5. Fe konsantrasyonunun fonksiyonu olarak sertlik, çekme özellikleri ve darbe dayanımı (Risonarta ve ark., 2020).....	12
Şekil 2.6. Fe bakımından zengin farklı çökeltiler (a) β levhalar (b) α Çin yazısı karakteri (c) β 'dan büyüyen π fazı (d) π Çin yazısı karakteri (Taylor, 2004).	13
Şekil 2.7. Al-Ti ikili faz denge diyagramının alüminyumca zengin kısmı (a), TiAl ₃ kristalinin üzerinde alüminyumun çekirdeklenmesi ve büyümesinin şematik gösterimi (b) (Sigworth, 1984)	16
Şekil 2.8. A356 Al alaşımının çekme (a) ve sertlik (b) değerleri ile Ti içerikleri arasındaki ilişki (Qu ve ark., 2013).....	16
Şekil 2.9. T6 ısıl işleminden sonra Cu'nun A356 Al alaşımının mikro yapısı üzerindeki etkisi, A356 (a), A356 + %1Cu (b) ve A356 + %3Cu (c) (Li ve ark., 2006)	17
Şekil 2.10. Cu ilavesinin A356 Al alaşımının gözeneklilik seviyesi üzerindeki etkisi (Cáceres ve ark., 1999)	18
Şekil 2.11. Döküm Al alaşımlarının çeşitli sıcaklıklarda ortalama Vickers sertlik değerleri (PC:ön şartlandırma, 200 saat) (Roy ve ark., 2017)	19
Şekil 2.12. Döküme hazır bir kum kalıbın kesiti	20
Şekil 2.13. Soğuk ve sıcak kamaralı döküm aşamaları	22
Şekil 2.14. Alçak basınçlı makinenin şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.15. Hassas döküm şematik gösterimi	28
Şekil 2.16. Isıl işlem yapılabilen ve yapılamayan Al döküm alaşımları	30
Şekil 2.17. Yaşlandırma ısıl işlemi sıcaklık-zaman diyagramının şematik gösterilişi (Callister ve ark, 2007)	31
Şekil 2.18. Yaşlandırma ısıl işleminde faz diyagramına göre işlem sıcaklıklarının gösterilmesi (Callister ve ark, 2007).....	32
Şekil 2.19. Al-Cu faz diyagramı ve Al -%4 Cu alaşımının çözeltiye alma işlemi, su verme ve çökeltme sertleşmesi safhalarında mikro yapı değişimleri (Askeland,1998)...	33
Şekil 2.20. Yaşlandırma ısıl işlemi aşamaları ve mikro yapıları (Askeland,1998)	33
Şekil 2.21. Al-Cu faz diyagramı (Callister ve ark., 2007).....	34
Şekil 2.22. Yaşlandırma sırasındaki çeşitli ara durumların gösterimi; aşırı doymuş α katı çözeltisi (a), Çökelmiş θ " geçiş fazı (b), α matris fazı içinde çökelen θ ' kararlı fazı (c) (Callister ve ark., 2007)	35
Şekil 2.23. Yaşlanma süresine bağlı olarak malzemenin sertlik veya mukavemetindeki değişimin şematik gösterilişi (Callister ve ark., 2007).	35
Şekil 2.24. Hassas güdümlü bomba kiti (HGK) (a), Kanatlı güdüm kiti (KGK) (b) (Tübitak, 2023)	37
Şekil 2.25. Lazer güdümlü bomba kiti (LGK) (a), TEBER güdüm kiti (b) (Tübitak, 2023).....	37
Şekil 2.26. HGK güdüm kiti.....	38
Şekil 2.27. Aynı eğitim verileri kümesine (siyah noktalar) uyan dört farklı fonksiyonda (mavi çizgiler) (a), (b) ve (c) verileri yeniden üretir ve (d) oluşturmaz (Bishop, 2006) 40	40
Şekil 2.28. Karar ağacı öğrenme algoritması	41
Şekil 2.29. Destek vektör makinesi sınıflandırma (Al-Azzawi, 2021).....	42

Şekil 2.30. K-En yakın komşu algoritması sınıflandırma (Al-Azzawi., 2021)	43
Şekil 2.31. Birim standart sapması ve ortalamaları -3 ve 3 olan iki Gauss PDF'sinden oluşturulan veri noktaları (a). Baklava desenleriyle gösterilen dört etiketli noktaya sahip SVM kullanılarak yapılan sınıflandırma sonuçları (b). Sonuçların k-ortalamlarla kümelenmesi (c).....	45
Şekil 2.32. Öğrenci başarısı için bulanık küme gösterimi (Tütmez, 2008)	47
Şekil 2.33. Üyelik fonksiyonları bileşenleri (Tütmez, 2008)	48
Şekil 2.34. Üçgen üyelik fonksiyonu (a), Yamuk üyelik fonksiyonu (b), Genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonu (c) ve Gauss üyelik fonksiyonu (d) (Passino ve Yurkovich, 1998)	48
Şekil 2.35. Bulanık çıkarım sistemi modeli (Jang, 1993).....	50
Şekil 2.36. İki giriş iki kural Mamdani tipi yapı için çıkarım mekanizması (Yaman, 2014)	52
Şekil 2.37. İki giriş iki kural Takagi-Sugeno tipi yapı için çıkarım mekanizması (Yaman, 2014)	53
Şekil 2.38. Alanın ağırlık merkezi (Yaman, 2014).....	53
Şekil 2.39. Alanın ağırlık ortalaması (Yaman, 2014).....	54
Şekil 2.40 Yapay sinir hücresi yapısı (Keskenler ve ark.,2017).....	55
Şekil 2.41. Lineer fonksiyon.....	56
Şekil 2.42. Rampa eşik fonksiyonu	56
Şekil 2.43. İşaret fonksiyonu	57
Şekil 2.44. Sigmoid fonksiyonu	57
Şekil 2.45. Tek katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı (Yaman, 2014)	58
Şekil 2.46. Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı (Yaman, 2014)	58
Şekil 2.47. Tekrarlı yapay sinir ağı yapısı (Yaman, 2014).....	59
Şekil 2.48. Örnek bir öğrenme eğrisi (Doğan, 2016)	60
Şekil 2.49. ANFIS kullanıcı ara yüzü (Yaman, 2014).....	62
Şekil 2.50. İki girdi, bir çıktı ve iki kuraldan oluşan ANFIS mimarisi (İsen, 2017).....	63
Şekil 2.51. Malzeme biliminde makine öğrenimi uygulamasına genel bir bakış (Liu ve ark., 2017).....	68
Şekil 2.52. Malzeme özelliği tahmininde makine öğreniminin uygulanması için temel çerçeve (Liu ve ark., 2017)	69
Şekil 3.1. HGK ve LGK kitlerine ait döküm parçaları	75
Şekil 3.2. A357 Al alaşımı standart numune döküm işlemi	76
Şekil 3.3. Dökümü yapılan A357 Al alaşımı standart deney numuneleri	77
Şekil 3.4. A357 Al alaşımına ait dijital röntgen muayene sonuçları (örnek sağlam ve hatalı numune)	77
Şekil 3.5. Döküm test çubuğu (a) ve ASTM E8/E8M'ye uygun olarak işlenmiş çekme deney numunesi (b).....	78
Şekil 3.6. Materyal öğrenme döngüsü	80
Şekil 3.7 YSA modeli	81
Şekil 3.8. Uyarlanabilir Nöro-Bulanık yapı.....	82
Şekil 3.9 Gaussian üyelik fonksiyonları	83
Şekil 3.10. Durulaştırma ve sonuç çıktıları	84
Şekil 4.1. A357-DK (a,b) ve A357-T6 (c,d) numunelerinin 10X ve 100X optik mikroskop görüntüleri.....	87
Şekil 4.2. A357-DK (a) ve A357-T6 (b) numunelerinin SEM mikroyapısı.....	87
Şekil 4.3. A357-DK alaşımının SEM-EDS elementel dağılımı	88
Şekil 4.4. A357-T6 alaşımının SEM-EDS elementel dağılımı.....	89

Şekil 4.5. A357-DKS (a,b) ve A357-T6S (c,d) numunelerinin 10X ve 100X büyütmelelere ait optik mikroskop görüntüleri	91
Şekil 4.6. A357-DKS (a) ve A357-T6S (b) numunelerinin SEM mikroyapıları.....	91
Şekil 4.7. A357-DKS alaşımının SEM-EDS elementel dağılımı	92
Şekil 4.8. A357-DKS alaşımına ait fazlarının SEM görüntüsü (a) ve EDS elementel spektrumları (b-i)	97
Şekil 4.9. A357-T6S alaşımının SEM-EDS elementel dağılımı	98
Şekil 4.10. A357-T6S alaşımına ait fazlarının SEM görüntüsü (a) ve EDS elementel spektrumları (b-h)	102
Şekil 4.11. YSA Eğitim (a) ve test (b) performans grafikleri.....	113
Şekil 4.12. YSA modeli MSE grafiği.....	113
Şekil 4.13. Test ve tahmin edilen UTS sonuçları (a) ve ANFIS'in doğruluk dağılım sonuçları (b)	115
Şekil 4.14. Test ve tahmin edilen YS sonuçları (a) ve ANFIS'in doğruluk dağılım sonuçları (b)	116
Şekil 4.15. Test ve tahmin edilen ϵ sonuçları (a) ve ANFIS'in doğruluk dağılım sonuçları (b)	117
Şekil 4.16. Si ve Mg içeriğinin bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için tahmin edilen UTS değerlerinin eğriye uygun yüzey grafikleri.	118
Şekil 4.17. Si ve Mg içeriğinin bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için tahmin edilen YS değerlerinin eğriye uygun yüzey grafikleri.....	118
Şekil 4.18. Si ve Mg içeriğinin bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için tahmin edilen ϵ değerlerinin eğriye uygun yüzey grafikleri	119
Şekil 4.19. A357 Al alaşımındaki Fe ve Ti içeriklerinin bir fonksiyonu olarak eğitim veri setinden (a) ve ANFIS tahmininden çizilen (b) UTS değerleri	121
Şekil 4.20. A357 Al alaşımındaki Fe ve Ti içeriklerinin bir fonksiyonu olarak eğitim veri setinden (a) ve ANFIS tahmininden çizilen (b) YS değerleri	122
Şekil 4.21. A357 Al alaşımındaki Fe ve Ti içeriklerinin bir fonksiyonu olarak eğitim veri setinden (a) ve ANFIS tahmininden çizilen (b) ϵ değerleri.....	123
Şekil 4.22. A357 Al alaşımındaki Cu içeriğinin bir fonksiyonu olarak eğitim veri setinden çizilen UTS (a), YS (b) ve ϵ (c) değerleri	125
Şekil 4.23. Fe ve Ti kombinasyonunun bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için öngörülen UTS değerlerinin eğriye uygun yüzey grafikleri	126

ÇİZELGELER TABLOSU

Çizelge 2.1. Alüminyum döküm alaşımlarının ticari sınıflandırması (The Aluminium Association,1988).	5
Çizelge 2.2. A356, A357, 6061, 7075 Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (SAE AMS 4219)	6
Çizelge 2.3. Endüstride yaygın olarak kullanılan Al-Si alaşımlarının bileşimleri (K: kum döküm, S: kokil kalıba döküm, Y: yüksek basınçlı döküm) (The Aluminium Association,1988).	7
Çizelge 2.4. Fe bazlı intermetalik fazların süneklik üzerindeki etkileri (Cinkılıc ve ark., 2019)	14
Çizelge 2.5. Alüminyum alaşımlarında ısıl işlem kodlaması (Geçkinli, 2003).....	29
Çizelge 2.6. Güdüm kitine sahip bazı mühimmatların genel ve teknik özellikleri (Tübitak, 2023)	36
Çizelge 2.7. Bulanık sistemler ve sinir ağlarının özellikleri (Baykal ve Beyan, 2004)..	61
Çizelge 2.8. ANFIS öğrenme algoritması detayları (Yaman, 2014)	67
Çizelge 3.1. A357-DK ve A357-DKS alaşımlarının kimyasal bileşimi (% ağı.)	78
Çizelge 3.2. YSA modeli parametreleri.....	81
Çizelge 3.3. ANFIS tasarımının özellikleri	85
Çizelge 4.1. A357-DK, A357-T6 ve A357-DKS, A357-T6S alaşımlarının Sertlik, UTS, YS ve ϵ değerleri.....	103
Çizelge 4.2. A357- DKS ve A357- T6S numunelere ait α -Al'dan alınan noktaların EDS analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	105
Çizelge 4.3. Döküm ve ısıl işlem uygulanmış A357 Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve çekme dayanım değerleri ve literatür verileri	107
Çizelge 4.4. A357 Al alaşımı için regresyon parametreleri	108
Çizelge 4.5 A357 Al alaşımı UTS regresyon sonuçları.....	108
Çizelge 4.6 A357 Al alaşımı YS regresyon sonuçları	109
Çizelge 4.7 A357 Al alaşımı ϵ regresyon sonuçları	111
Çizelge 4.8. YSA modeli performans değerleri	113

SİMGELER VE KISALTMALAR

LPDC	: Alçak Basınç Döküm
HPDC	: Yüksek Basınç Döküm
ML	: Makine Öğrenmesi
ANFIS	: Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi
YSA	: Yapay Sinir Ağları
UTS	: Çekme Dayanımı
YS	: Akma Dayanımı
ε	: % Uzama
HGK	: Hassas Güdümlü Bomba Kiti,
KGK	: Kanatlı Güdüm Kiti
LGK	: Lazer Güdümlü Bomba Kiti
KNN	: K-En Yakın Komşu
SVM	: Destek Vektör Makineleri
DK	: Döküm Hali
DKS	: Çekme Numunesi Döküm Hali
T6	: Yaşlandırma Isıl İşlem
MPa	: Mega Paskal
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dispersiv Spektrum

1 GİRİŞ

Alüminyum alaşımları, yüksek özgül mukavemetleri (mukavemet/yoğunluk) nedeniyle savunma, havacılık ve uzay endüstrilerinde en popüler araştırma alanlarından biri olmuştur. Yüksek özgül mukavemetli Al alaşımları, hassas alaşım kombinasyonları, kontrollü döküm işlemleri ve ısıl işlemlerle geliştirilebilir. A356 (Al-7Si-0.4Mg) ve A357 (Al-7Si-0.6Mg) serisi Al alaşımları, otomotiv, havacılık ve savunma sanayilerinde karmaşık döküm parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mallick, 2012) (Javidani ve Larouche, 2014) (Peter ve ark., 2014) (Hernandez ve ark., 2017). Bu alaşımlar, ısıl işlemlerle mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra üstün dökülebilirlik ve korozyon direnci özelliklerine sahiptir (Es-Said ve ark., 2002) (Wang, 2003) (Alexopoulos ve Pantelakis, 2004) (Kumar ve ark., 2007) (Zhu ve ark., 2012) (Natesan ve ark., 2020) (Liu ve ark., 2020).

Yüksek mukavemetli döküm Al alaşımlarının üretiminde soru şudur: "Hangi döküm teknolojisini kullanmak uygundur?". Kum dökümler genellikle büyük kesitli ve karmaşık parçaların dökümü için uygundur, ancak düşük katılma oranları ve gaz sıkışması sorunları nedeniyle yüksek mukavemetli kritik parçaların dökümü için uygun değildir. Kokil kalıba döküm yönteminde ise karmaşık parçaların dökümünün zorluğu ve üretim hızının düşük olması en kritik dezavantajdır. Yüksek basınçlı döküm yöntemi (HPDC) seri üretim için uygun olsa da büyük kesit kalınlıklarına sahip parçalar için ideal değildir (Luo ve ark., 2022a). Öte yandan, alçak basınç döküm (LPDC) yöntemi hem kum hem de kokil kalıpların avantajlarını kapsar. Ayrıca yüksek basınçlı dökümlerde olduğu gibi kesit kalınlığı kısıtlaması uygulanmaz. Bu nedenle LPDC yöntemi, son yıllarda otomotiv, havacılık ve savunma sanayinde Al alaşımlı kritik parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Buchner ve Glosner, 2015) (Ou ve ark., 2020) (Nunes ve ark., 2024).

A357 Al alaşımlarının döküm ve mekanik özelliklerini belirlemek için döküm teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak HPDC döküm tekniğine odaklanırken, LPDC döküm üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır (Chen ve ark., 2014). Literatürde LPDC A356 Al alaşımında kalıp tasarımı (Lee, 2006) (Chen ve ark., 2014), kalıp kaplama malzemeleri (Okçu ve ark., 2016), kalıp soğutma değişkenleri (Sui ve ark., 2015) (Inderjit ve Sharma, 2017), basınç hızı (Cáceres ve Selling, 1996) (Chiesa ve ark., 2018) ve kalıp malzemesi (Gupta ve Hoffman, 2001) üzerine yapılan çalışmalar rapor edilmiştir.

Döküm proseslerinde, gerekli mekanik özelliklerin elde edilmesi için kritik parçaların dökümünden önce alaşım elementleri, eriyik sıcaklığı, kalıp tipi ve sıcaklığı, modifikasyon uygulaması vb. gibi döküm değişkenleri arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesi çok önemlidir. Bu tür değişkenlerin bir döküm uzmanı tarafından doğru şekilde değerlendirilmesi uzun yıllara dayanan deneyim gerektirir. Öte yandan bu tür değerlendirmeler için Makine Öğrenimi (ML) uygulamaları uygulanabilir ve uzun vadeli deneyimlerin yerini alabilir (Liu ve ark., 2017) (Bock ve ark., 2019). İmalat değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak mekanik özellikleri tahmin etmek için, örneğin; kompozisyon (Karkalos ve ark., 2017) (Li ve ark., 2020), tane boyutu kontrolü (Kocaman ve ark., 2021), Fe/Mn oranı, Sr içeriği, soğuma hızı ve gözeneklilik içeriği (Lan ve ark., 2022) gibi çeşitli Al alaşımlarına ML uygulaması üzerine çalışmalar rapor edilmiştir. Ayrıca, Merayo ve ark. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada sertlik, ısıl işlem ve kimyasal bileşimden etkilenen plastik deformasyon davranışı da bildirilmiştir.

Literatür araştırmaları, LPDC A356 ve A357 Al alaşımları üzerine ML uygulamalarının sınırlı olduğunu göstermiştir (Zhang ve ark., 2011) (Yang ve ark., 2013) (Mishra ve ark., 2021) (Uyan ve ark., 2023). Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Genetik Algoritma (GA) yönteminin kombinasyonu kullanılarak A356 Al alaşımı için LPDC işlem parametrelerinin (erime ve kalıp sıcaklığı, uygulanan basınç hızı) optimizasyonu Zhang ve ark. (2011) tarafından rapor edilmiştir. Makalede önerilen modelleme ve optimizasyon yöntemlerinin karmaşık endüstriyel uygulamalarda büyük potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir. Başka bir çalışmada (Yang ve ark., 2013) A357 Al alaşımının mekanik özelliklerini tahmin etmek için geri yayılım (BP) algoritmasına sahip bir YSA modeli kullanılmış ve ısıl işlemlerin alaşımın mekanik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mishra ve ark. (2021), çok katmanlı ileri beslemeli YSA kullanarak, farklı üretim teknikleriyle (örn. karıştırma (stir) döküm, basınçlı döküm, sıkıştırımlı (squeeze) döküm, yarı-katı (rheocasting) ve LPDC) üretilen A356 ve A357 Al alaşımları dahil olmak üzere çeşitli Al-Si-Mg alaşımlarının mekanik özelliklerinin tahminini rapor etmiştir. Son zamanlarda Uyan ve ark. (2023), döküm A356 Al alaşım jantlarda gözeneklerin oluşumunda döküm parametrelerinin etkisini anlamak için Extreme Boosted Karar Ağacı (XGBoost) modelini uygulamıştır. XGBoost sınıflandırma algoritması, proses koşulları ile kusurlu jantların oluşturulması arasındaki karmaşık ilişkiyi haritalandırmak için kullanılmıştır.

A357 Al alaşımı da dahil olmak üzere birçok döküm alaşımında olduğu gibi, standartlarda izin verilen sınırlar dahilinde olmasına rağmen, maksimum mekanik

özelliklere sahip döküm parça elde etmek için alaşım elementleri arasındaki ilişki ve bunlar arasındaki değişkenlerin etkilerini değerlendirmek uzun yıllara dayanan bir deneyimi gerektiren zorlu bir iştir. Alaşım spesifikasyonu içerisinde olmasına rağmen, mekanik özelliklerin azalmasından veya iyileştirilmesinden esas olarak hangi alaşım elementlerinin veya safsızlıkların sorumlu olduğunu belirlemek kolay değildir. Örneğin, A357 Al alaşımının Si ve Mg seviyelerinin maksimum seviyelerde olması (yani %7,5Si ve %0,7Mg) veya minimum seviyelerde olması (yani %6,5Si ve %0,4 Mg) mekanik özelliklerde belirli bir döküm koşullarında ve ısıtılmalarda bir fark yaratır mı? İçeriği izin verilen limit dahilinde olsa bile Fe seviyesinin ağırlıkça %0,02'den %0,2'ye yükselmesinin herhangi bir etkisi olur mu? Benzer bir soru Ti için de geçerli olabilir ve bu sorular oldukça deneyimli dökümhane uzmanları tarafından değerlendirilebilir.

Bu tez kapsamında, dökümhane operasyonlarındaki deneyim talebini karşılayacak bir ML modeli oluşturmak amaçlanmıştır. Bunun için Karar Ağacı, Destek Vektör Makineleri (SVM), K-En Yakın Komşu (KNN), Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Uyarlanabilir Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak elde edilen modeller değerlendirilmiştir. Literatürde (Zhang ve ark, 2011) (Yang ve ark. 2013) (Uyan ve ark., 2023) YSA yöntemi, döküm Al alaşımlarının özelliklerini değerlendirmek için kullanılmıştır, ancak, yetersiz sayıda veri olması durumunda, ezberleme YSA tahminleri için tartışmalı bir sorun olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, sistemin az miktarda veri olması durumunda ezberleme sorunu olmadan daha yüksek doğrulukta bir model oluşturabilmesi için daha doğru sonuçlar veren ANFIS önerilmektedir. Literatür taramasında ANFIS yöntemi kullanılarak LPDC A357 Al alaşımında üzerine yapılan çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu doğrultuda, döküm LPDC A357 Al alaşımındaki ana alaşım elementleri Si, Mg ile birlikte en yaygın safsızlık elementleri (Cu, Fe, Ti) içerikleri seçilmiş ve bunların mekanik özelliklerle olan ilişkileri ANFIS kullanılarak analiz edilmiştir. ANFIS modeli ile çıktı katmanının UTS, YS ve ϵ değerleri tahmin edilmiş ve deneysel olarak elde edilen gerçek değerler bilgisayar tarafından tahmin edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, yüksek korozyon direncine sahip olması ve mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesi, şekillendirme ve işleme kolaylığı gibi özelliklere sahip olması birçok farklı sektörde kullanım alanları ortaya çıkarmıştır. Bu sektörlerin başında otomotiv, taşımacılık, havacılık-uzay, elektronik, makine ve imalat sektörleri gelmektedir. Özellikle otomotiv, uzay ve havacılık sektörlerinde hafif olmaları nedeniyle ağırlık azaltılarak yakıt tasarrufu sağlanmasında ve hava kirliliğinin önlenmesinde çok önemli yer tutmaktadır (Mallick, 2012) (Javidani ve Larouche, 2014) (Peter ve ark., 2014).

Alüminyuma alaşım elemanları, mekanik ve korozyon özelliklerini yükseltmek amacıyla ilave edilmektedir. Başlıca alaşım elemanları: magnezyum (Mg), mangan (Mn), silisyum (Si), bakır (Cu), çinko (Zn), kurşun (Pb), nikel (Ni) ve titanyum (Ti)'dur.

Endüstriyel alüminyum alaşım parçaları makine işleme, plastik şekillendirme (hadde, dövme vb.) ve döküm yöntemleri kullanılarak üretilirler. Bu alaşımlar ısıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem uygulanamayan alaşımlar şeklinde alt gruplara ayrılabilirler. Isıl işlem uygulanabilen alaşımlara 'yaşlandırma' işlemi ile mukavemet kazandırılabilir (Asghar ve ark., 2020). Isıl işlem uygulanamayan alaşımlara ise katı eriyik ve deformasyon yöntemleri uygulanarak mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir (Asghar ve ark., 2020).

2.1.1 Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları için U.S. Aluminium Association tarafından belirlenen 2 sınıflandırma yöntemi kullanılmaktadır. Buna göre; Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılmasında 4 rakam kullanılır. Ancak, 3. rakamdan sonra bir nokta konular, diğer bir ifade ile 3 haneli artı ondalık gösterim xxx.x olarak verilir. Bu dizilime göre Çizelge 2.1' de görülebileceği üzere ilk rakam (Xxx.x), alüminyum alaşımına eklenen ana alaşım elementini gösterir. İkinci ve üçüncü rakamlar (xXX.x), serideki belirli bir alaşımı tanımlamak için verilen rastgele sayılardır. Ondalık noktayı takip eden sayı, alaşımın döküm (.0) veya külçe (.1) veya modifiye edilmiş ingot (.2) olduğunu gösterir. Büyük harf ön eki belirli bir alaşımda yapılan değişikliği belirtir. Örneğin, Alaşım-A356.0, büyük harf A (Axxx.x), alaşım 356.0'ın bir modifikasyonunu belirtir. 3 sayısını (A3xx.x), Si ile birlikte Cu ve/veya Mg serisinden olduğunu gösterir. İkinci ve üçüncü ve

rakamlar (A3XX.x), serideki belirli bir alaşımı tanımlamak için verilen rastgele sayılardır (Ax56.0). Bununla birlikte noktadan sonraki sayı 3xx.X serisi içindeki alaşımı tanımlar (Axxx.0) ve bunun bir külçe değil, son şeklinin döküm olduğunu belirtir.

Bu alaşım numaralandırma sisteminin tek istisnası 1xxx serisi saf serisi Al alaşımlarıdır (saf alüminyumlar). Örneğin, 190.0 dizilimi (x90.x) %99,90 saflığındaki Al'u ifade ederken, noktadan sonraki hane (.0) ürün şeklinin döküm olduğunu ifade eder.

Çizelge 2.1. Alüminyum döküm alaşımlarının ticari sınıflandırması (The Aluminium Association,1988).

Sınıflandırma	Temel Alaşım Elementi
1xx.x	Alaşımlandırılmamış Al (%99,0 veya daha yüksek safiyet)
2xx.x	Cu
3xx.x	Si-Mg ve/veya Cu
4xx.x	Si
5xx.x	Mg
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Zn
8xx.x	Sn
9xx.x	Diğer elementler

2.1.2 Havacılık ve Savunma Sanayinde Kullanılan Al Alaşımları

Savunma sanayinde dökülebilme, kaynak yapılabilme, basınç ve korozyon dirençleri nedenleriyle üstün özelliklere sahip ve ısı işlem ile mekanik özelliklerinin artırılabilmesi nedenlerinden dolayı A356, A357, 6061, 7075 vb. Al alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. A356, A357, 6061, 7075 Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

A356, AlSi7Mg0.3 Al alaşımı olarak da bilinmektedir ve otomotiv endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Ayrıca elektronik ve ince parçalarda da kullanılmaktadır. T6 yaşlandırma ısı işleminden sonra 275- 290 MPa çekme dayanımına, 206-220 MPa akma dayanımına ve %3-5 aralığında uzamaya sahip olabilir. A356 alaşımları iyi döküm karakteristiği, ısı işleme uygunluk, yüksek mekanik özellikler, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı başta otomotiv olmak üzere endüstrinin pek çok noktasında kullanılmaktadır (Dwived ve ark., 2014).

A357 alüminyum döküm alaşımı enerji, otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Wang, 2003) (Es-Said ve ark., 2002). Ayrıca uçak ve füze parçaları ağırlıklı kullanım yeri olarak ön plana çıkmaktadır. T6 yaşlandırma ısı işleminden sonra 282- 310 MPa çekme dayanımına, 221-248 MPa akma dayanımına

ve %3-5 uzama özelliğine sahip olabilir. Özellikle Mark 82 ve 84 bombalarının güdüm kitlerinin döküm parçaları A357 Al alaşımından üretilmektedir.

Çizelge 2.2. A356, A357, 6061, 7075 Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (SAE AMS 4219)

Element (%)	Si	Mg	Cu	Fe	Ti	Zn	Mn	Be	Cr	Diğer	Isıl İşlem	UTS MPa	YS MPa
A356	6,5-7,5	0,2-0,45	0,20 Maks.	0,20 Maks.	0,20 Maks.	0,10	0,10	0,20		0,15	T6	275-290	206-220
A357	6,5-7,5	0,4-0,7	0,20 Maks.	0,20 Maks.	0,20 Maks.	0,10	0,10			0,15	T6	282-310	221-248
6061	0,40-0,80	0,8-1,2	0,15-0,40	0,7	0,15	0,25	0,15		0,04-0,35	0,15	T4	180-230	110-140
7075	0,4	2,1-2,9	1,2-2,0	0,5	0,20	5,1-6,1	0,3		0,18-0,28	0,15	T7	260-310	240-270
												530-570	460-505

6061 alaşımları genelde yarı mamül olarak kütük halinde üretilen alaşımlardır. Üretilen parçalar talaşlı imalat veya dövme yöntemi ile üretilir. Isıl işlem görebilir, kolayca şekillendirilebilir, kaynaklanabilir ve korozyona karşı dayanıklıdır. Mekanik özellikleri yönünden T4 ısıl işlem uygulandığında 110-140 MPa akma mukavemeti ve 180-230 MPa çekme mukavemetine, T6 ısıl işlem uygulandığında 240-270 MPa akma mukavemeti ve 260-310 MPa çekme mukavemetine ulaşmaktadır (SAE AMS 4219). 6061 Al alaşımlarının savunma sanayi, uçak sanayi, demiryolu vagonlarında ağır yapılar, kamyon korkulukları gemi inşa sektörü, köprüler, askeri köprüler, uzay uygulamaları, helikopter pervane kaplaması gibi uygulama alanları mevcuttur. Yüksek sertlik ve korozyon dayanımına sahip, iyi işlenebilir olması ve kaynak yapılabilir olması ayrı karakteristik özellikleridir (Siddesh Kumar ve ark., 2022).

7075 alaşımlarının askeri ve uçak sanayinde yüksek mukavemet gerektiren bileşenler, kauçuk ve plastik kalıplar, kayak direkleri yüksek, mukavemet istenilen makine parçaları, otomotiv sanayi, nükleer uygulamalar gibi uygulama alanları mevcuttur. Yorulma dayanımı yüksektir. T7 ısıl işlem uygulandığında 460-505 MPa akma ve 530-570 MPa çekme mukavemetine sahip olabilir (SAE AMS 4219) (Raj ve ark., 2021).

2.1.3 Al-Si Alaşımlarında Mg, Cu, Fe ve Ti Elementlerinin Etkisi

2.1.3.1 Al-Si Alaşımı

Alüminyumun alaşımlarının döküm ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla Al'a alaşım elementleri ilave edilmektedir. Başta Si olmak üzere, Mg, Cu, Zn, Ti, B, Sr, Mn, Fe gibi pek çok element ile alaşım oluşturabilmektedir. Kullanma yerlerine göre tercih edilmesi açısından, alaşım elementlerinin Al üzerindeki etkilerinin bilinmesi önem arz etmektedir. En yaygın döküm alaşımları ve özellikleri Çizelge 2.3'de verilmiştir. Bahsi geçen her bir alaşım elementi, mikroyapısal özellikler üzerinde farklı etkilere sahiptir.

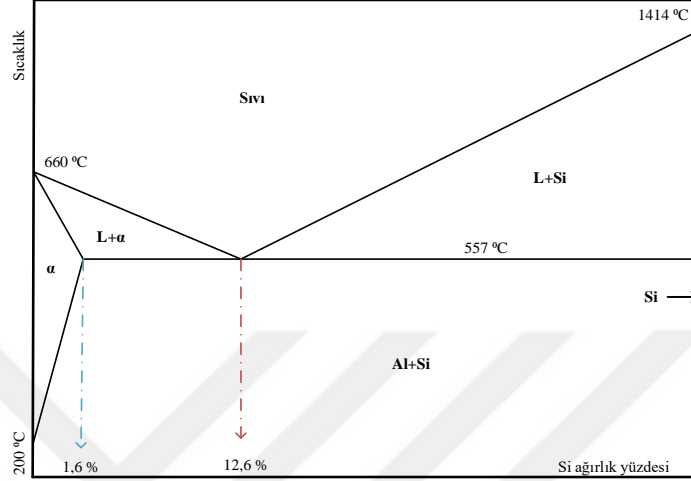
Çizelge 2.3. Endüstride yaygın olarak kullanılan Al-Si alaşımlarının bileşimleri (K: kum döküm, S: kokil kalıba döküm, Y: yüksek basınçlı döküm) (The Aluminum Association,1988).

Alaşım	Yöntem	Element					Diğer
		Si	Cu	Mg.	Fe	Zn	
319.0	K, S	6,0	3,5	<0,10	<1,0	<1,0	
332.0	S	9,5	3,0	1,0	1,2	1,0	
355.0	K, S	5,0	1,25	0,5	<0,06	<0,35	
A356.0	K, S	7,0	<0,20	0,35	<0,2	<0,1	
A357.0	K, S	7,0	<0,20	0,55	<0,2	<0,1	0,05 Be
380.0	Y	8,5	3,5	<0,1	<1,3	<0,3	
383.0	Y	10,0	2,5	0,10	1,3	3,0	0,15 Sn
384.0	Y	11,0	2,0	<0,3	<1,3	<3,0	0,35 Sn
390.0	Y	17,0	4,5	0,55	<1,3	<0,1	<0,1 Mg
413.0	Y	12,0	<0,1	<0,10	<2,0		
443.0	K, S	5,25	<0,3	<0,05	<0,8	<0,5	

Temel alaşımlandırma elementi olarak Si, sıvı metale akışkanlık sağlarken, alaşımın mekanik özelliklerini, korozyon direncini ve kaynak kabiliyetini artırır. Özellikle ikili ötektik (%12.6 Si) veya ötektik altı Al-Si alaşımları (<%12.6 Si) iyi dökülebilirlik ve korozyon dayanımı ile karakterize edilmektedirler (Hernandez ve ark., 2017). Aynı zamanda dökümü gerçekleştirilen iş parçasında çekinti oluşma eğilimini de azaltır. Tane küçültme ve ötektik modifikasyon işlemleri ile de işlenebilirlik kabiliyeti artmaktadır.

Şekil 2.1'de Al-Si denge diyagramı verilmiştir. Al-Si denge diyagramında görüldüğü gibi, %12,6 Si değerinde ve 577 °C sıcaklıkta bir ötektik alaşım göstermektedir. Ağırlıkça %12.6'dan daha az Si içeren alaşımlar; hipoötektik (ötektik altı), %12,6'dan fazla Si içeren alaşımlar hiperötektik (ötektik üstü) ve ağırlıkça %12,6 Si

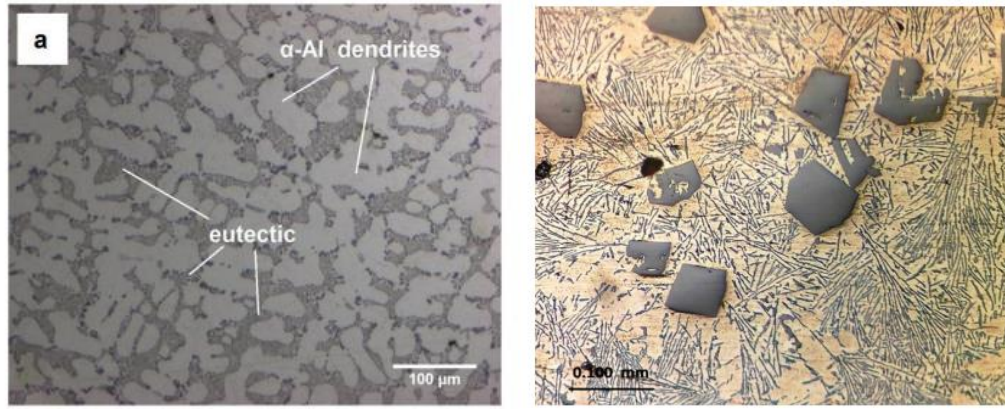
ötektik alaşımlardır. Silisyumun Al içerisindeki çözünürlüğü maksimum %1,6'dır. Silisyumun Al içerisindeki düşük çözünürlüğünden dolayı Si, Al matris içerisinde çökelti oluşturmakta bu da alaşımın mekanik özelliklerine önemli katkılar yapmaktadır (Kalhapure ve Dighe, 2015).



Şekil 2.1. Al-Si denge diyagramı

Denge diyagramından da görüldüğü üzere, Al-Si esaslı ötektik alaşımlarda, Si ergime derecesini düşürmektedir. Ayrıca Si düşük bir yoğunluğa sahip olup döküm parçanın toplam ağırlığını da azaltmaktadır (Kalhapure ve Dighe, 2015) (Rana ve ark. 2012). Alüminyum içerisine ilave edilen Si belli bir orana kadar Al kafesi içerisinde çözünür ve fazla Si atomları Al atomlarından yarıçaplarının farklı olması dolayısıyla yapı içerisinde gerilme oluşturur. Bu gerilme deformasyon esnasında dislokasyon hareketine engel olarak malzemenin mukavemeti artmasına sebep olur (Warmuzek, 2004).

Şekil 2.2'de tipik Al-Si alaşımlarının mikro yapıları görülmektedir (Toschi, 2018) (Abboud ve Mazumder, 2020). Farklı Si içeriklerinde malzemenin mikro yapısını oluşturan fazlar, bu fazların şekli ve dağılımı değişmektedir. Bu değişimler malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkilemektedir. İnce ve yuvarlak primer faz (veya ötektik yapı) yüksek mukavemet ve süneklik verir. İğne şeklindeki silisyumlu faz çekme mukavemetini artırmakla beraber süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür (Warmuzek, 2004).



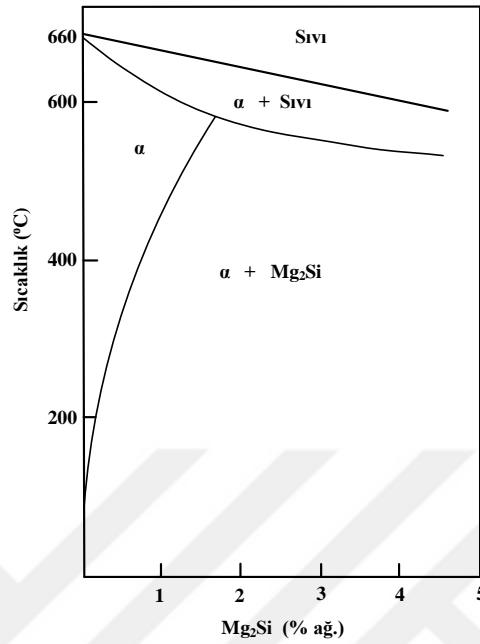
Şekil 2.2. Al-Si ötektik veya ötektikaltı (a), Al-Si ötektiküstü (b) yapıyı gösteren Al-Si alaşımlarının optik mikroskop görüntüsü (Toschi, 2018) (Abboud ve Mazumder, 2020)

2.1.3.2 Magnezyumun Etkisi

Magnezyum, önemli alaşım elementlerinden birisi olup alaşıma yüksek mukavemet ve süneklik, mükemmel korozyon direnci kazandırır (Caceres ve ark., 1999). Bununla birlikte, Mg alaşımın dökülebilirlik kabiliyetini düşürmektedir (Töre, 2012). Ayrıca Mg ötektik altı Al-Si alaşımlarında Fe'in mekanik özelliklere yaptığı kötü etkiyi gidermekte ve aynı zamanda dayanım, korozyon-oksidasyon ve aşınma dirençlerini arttırmaktadır. Buna rağmen sünekliği azaltmaktadır. Genel olarak Mg ilavesi mukavemeti, haddelenebilme kabiliyetini ve işlenebilirliği artırır (Davis ve Eyre, 1994) (Caceres ve ark., 1999) (Taylor ve ark., 2011) (Hekmat-Ardakan ve ark., 2010). Dövme alaşımlarda %1 - %6 Mg ise şekil verme kolaylığı sağlamak için kullanılır.

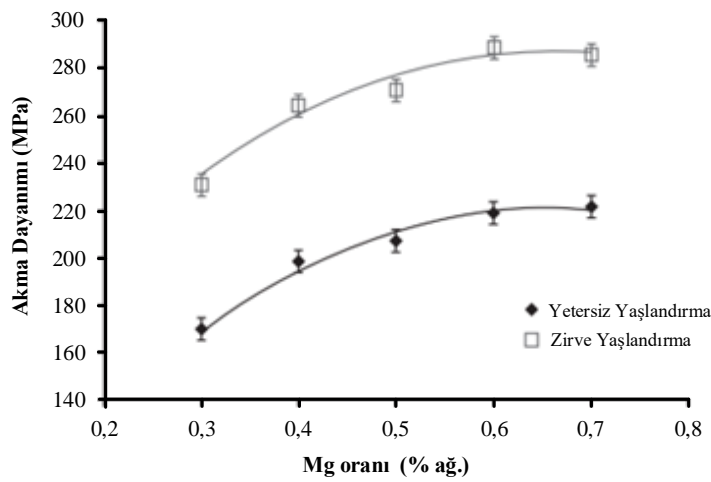
Alüminyum alaşım kompozisyonları, dökümleri ısıtılı veya ısıtılmamış olmak üzere tasarlanmışlardır. Döküm işleminden sonra herhangi bir ısıtım işlemi uygulanmayan parçalar alaşım numarasının sonuna F harfi konularak tanımlanırlar. Döküm parçaları üzerinde uygulanan ısıtım işlemi mekanik özellikleri arttırmaktadır. Isıtım işlemi tanımlamaları 0, T4, T5, T6 gibi sınıflandırılmaktadır (Başlık 2.1.5). Al-Si alaşımlarına Mg çökelme sertleştirici olarak ilave edilir. Çözelti işlemlerinin (örneğin, T5 veya T6) uygulanması, Si ile aşırı doymuş bir katı çözeltinin oluşumunu teşvik eder. Al-Si-Mg alaşım sistemi Şekil 2.3'deki ikili Al-Mg₂Si diyagramı ile gösterilmektedir (Shivkumar ve ark., 1989). Çözelti işleminden sonra, bileşenler genellikle Mg_xSi_y partiküllerini çöktürmek için su verilir. Mg_xSi_y parçacıkları daha sonra doğal veya yapay olabilen ikinci bir dönüşümle (yaşlanma) Mg₂Si'ye dönüştürülür. Tipik yapay yaşlandırma sıcaklıkları yaklaşık 200 °C'dir (Kanicki ve Rasmussen, 1990). Kontrollü

çökeltme koşulları altında, Mg_2Si homojen bir şekilde dağılır ve alaşımın homojenliğini iyileştirir ve böylece mekanik özelliklerini geliştirir (Asghar ve ark., 2020).



Şekil 2.3. Al-Mg₂Si faz diyagramı (Shivkumar ve ark., 1989)

Al-Si-Mg alaşımına Si ile intermetalik oluşturmak için ağırlıkça %0,3 ila %0,7 oranında Mg ilave edilir. Mg₂Si çökeltileri Al matrisi içinde olduğu için akma dayanımı artar. İki farklı yaşlanma koşulu için A356/357 Al alaşım numunelerinin Mg içeriğine karşı ortalama akma gerilimi Şekil 2.4'de verilmiştir (Taylor, 2000).

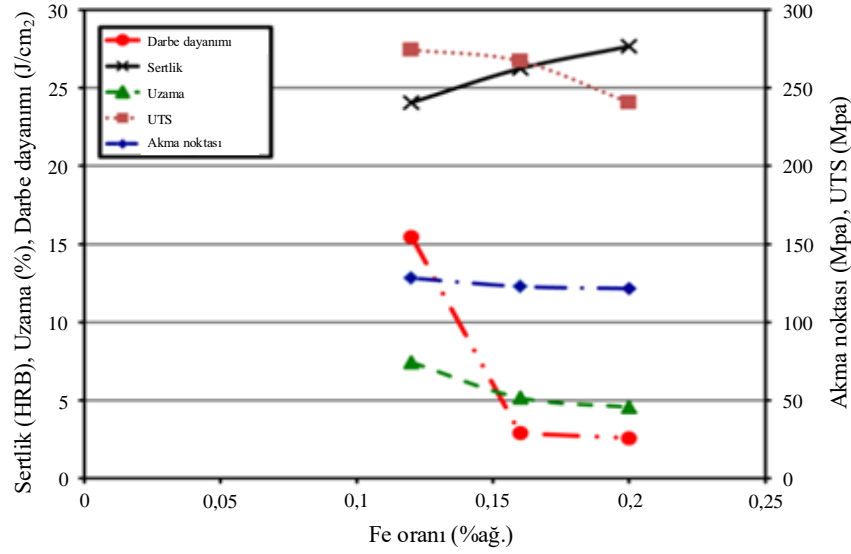


Şekil 2.4. İki farklı yaşlanma koşulu için A356/357 Al alaşım numunelerinin Mg içeriğine karşı ortalama akma gerilimi (Taylor ve ark., 2000)

A357 Al alaşımı genel olarak, çökelme sertleştirmesi (Alexopoulos ve Pantelakis, 2004), özellikle yüksek sıcaklıkta çözeltiye alma, müteakip su verme ve son olarak suni yaşlandırmadan oluşan T6 ısıtma işlemi (Gan ve Overfelt, 2006) ile güçlendirilir. Bu alaşımın optimum dökülebilirliği, akışkanlığı ve sıcak çatlama direncini artıran Si varlığı ile sağlanırken, Mg varlığı T6'dan sonra mekanik özellikleri iyileştirir: Isıtma sırasında Mg ve Si, α -Al katı çözeltisinden çökelen ve metali güçlendiren Mg_2Si 'yi oluşturur (Biol, 2009) (Ceschini ve ark., 2009) (Asghar ve ark., 2020).

2.1.3.3 Demirin Etkisi

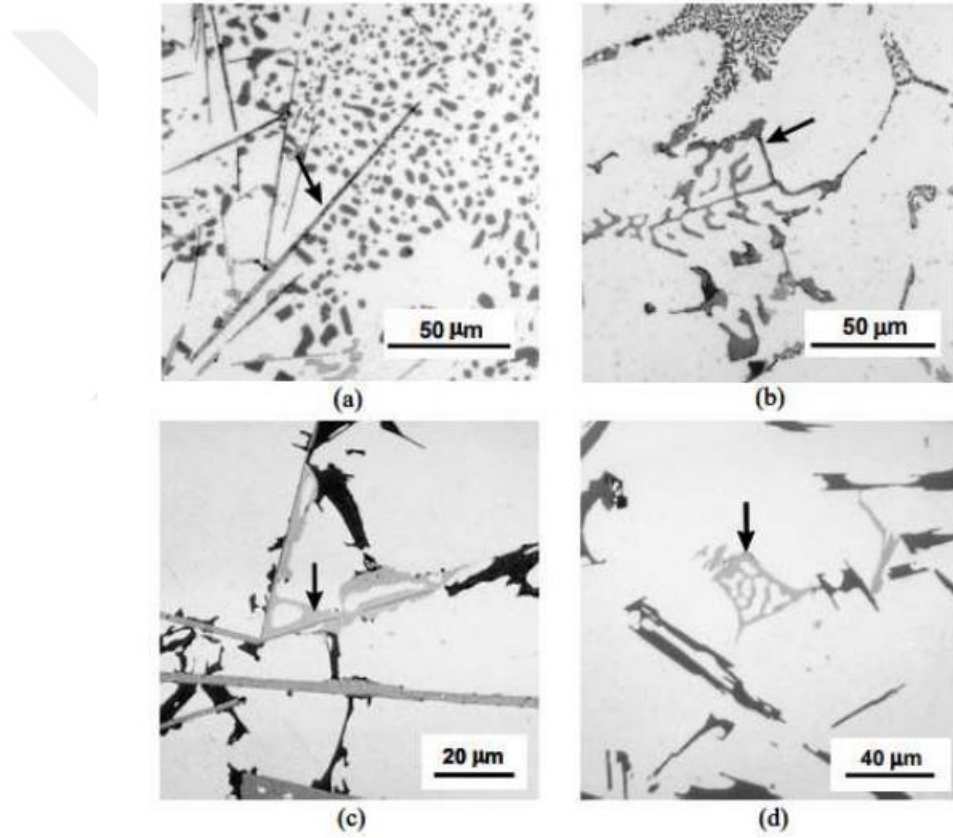
Demir, Al alaşımlarında empürite olarak bulunup, farklı kaynaklardan gelebilir. Demirin çoğu, (ağırlıkça %0,03-0,15) birincil alüminyum metalurjisinden (Bayer Prosesi) gelir (Taylor, 2004). Diğer Fe empürite kaynakları, sonraki döküm işlemi sırasında kullanılan aletler ve fırın ekipmanlarıdır. Sıvı metal bekleme sıcaklığı ve süresi gibi döküm parametreleri, Fe işleme ve Al eriyiği arasındaki temas süresi nedeniyle Al'daki Fe miktarını etkiler. İkincil döküm işleminin sonunda eriyik içindeki Fe seviyeleri ağırlıkça %0,08-0,25'e kadar ulaşır (Taylor, 2004). Ayrıca, her yeniden eritme döngüsü, korumasız Fe içeren alet ve ekipmanlara maruz kalması nedeniyle zararlıdır. Ayrıca, saf olmayan alaşım elementleri Al'daki Fe kaynağı olabilir. Fe, erimiş Al içerisinde oldukça çözünür, ancak katı halde çözünürlük çok sınırlıdır. Bu nedenle diğer alaşım elementleri ve Al ile birlikte intermetalik çökelti oluşurma eğilimindedirler. Bu intermetalik çökelti, kalıpta lehimlemeyi önlemek için yüksek basınçlı döküm uygulamalarında gerekli olmasına rağmen, kum döküm işlemi için zararlıdır. Bununla birlikte, kum döküm için, intermetalik fazların ağırlık yüzdesi, boyutu, şekli ve kimyasal bileşimi, hammaddelerin kimyasal bileşimlerine göre ayarlanabilmeli ve kontrol edilmelidir. Al eriyiğindeki Fe miktarı azaldıkça işleme maliyeti artarken mekanik özellikler iyileşir. Fakat genel itibarıyla Fe, Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Fe konsantrasyonunun fonksiyonu olarak sertlik, çekme özellikleri ve darbe dayanımı Şekil 2.5'de verilmiştir (Risonarta ve ark., 2020). Yüksek Si'li alaşımlarda Fe miktarının fazla oluşu kaba kristalli ve gevrek bir yapıya neden olur (Töre, 2012).



Şekil 2.5. Fe konsantrasyonunun fonksiyonu olarak sertlik, çekme özellikleri ve darbe dayanımı (Risonarta ve ark., 2020).

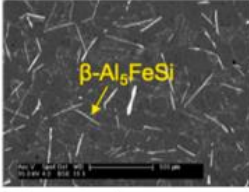
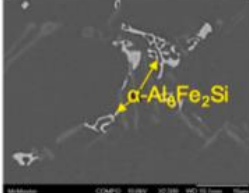
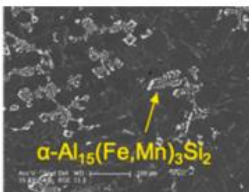
Alüminyum ile oldukça kararlı yapıda, fakat kırılğan yapıya sahip intermetalik bileşikler oluşturan Fe elementi, parçanın sünekliğini olumsuz etkilediği gibi, korozyon dayanımını da düşürmektedir. Al-Si-Mg alaşımında Mg_2Si bileşikleri dışında α (Fe_2SiAl_8), β ($FeSiAl_5$) ve π ($FeMg_3Si_6Al_8$) gibi zararlı Fe bazlı safsızlıklar çökebilir (Caceres ve ark., 1999). Ayrıca Si'ye ek olarak Mn de bulunduğu $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ oluşabilir. Bu faz da α fazı olarak bilinir. Optik mikroskop ile ayırt edilebilirler, farklı şekil ve renge sahiptirler. Mikroyapısal inceleme sırasında her iki α fazı da Çin yazısı benzeri morfolojide oluşur. Ancak Mn içeren faz (Taylor, 2004)'ye göre daha fazla blok halinde ve daha sıkı halde görülebilir. β fazı üç boyutta levha (platales) morfolojisine sahiptir ancak iki boyutta iğne şeklinde gözlenebilir. Mg, Si ile birlikte bulunduğu $\pi(FeMg_3Si_6Al_8)$ fazı oluşabilir. Morfolojileri Çin yazısı benzeri morfolojidir ve her zaman olmasa da genellikle β fazı ile yakından bağlantılıdır (Taylor, 2004). Şekil 2.6, Fe açısından zengin intermetalik fazların morfolojisindeki farklılıkları göstermektedir. Mekanik özellikler ve dökülebilirlikler etkilendiğinden morfoloji çok önemlidir (Taylor, 2004). Eriyiğin kimyasal konsantrasyonunun yanı sıra, intermetalik fazların oluşumu için soğuma hızı da önemli bir faktördür. Taylor (2004), Fe intermetaliklerinden kaynaklanan mikro çatlak başlangıçları ve bunların içinden kırılma nedeniyle sünekliğin azaldığını ve çatlak başlangıç bölgeleri olan Fe içeriği arttıkça gözenek miktarının arttığını belirtmektedir. β fazının α fazına göre daha zararlı olduğu belirtilmektedir. Şekil 2.6'da Fe bakımından zengin farklı çökeltiler (a), β levhalar (b), α gibi Çin yazısı karakteri (c),

β 'dan büyüyen π fazı (d) π fazı gibi yazılar olarak görünmektedir (Taylor, 2004). Ayrıca, oluşan Fe bazlı intermetalik fazların süneklik üzerindeki etkileri Çizelge 2.4'de gösterilmektedir (Luo ve ark., 2022b). Fe dökülebilirlik üzerinde de önemli etkisi vardır ve sebepleri üzerindeki fikirlerden bazıları, Fe'in büyük β çökeltileri nedeniyle gözeneklilik seviyesini arttırdığıdır. Dentritikler arası beslenmeyi engeller ve buna bağlı olarak gözenek oluşumuna neden olur. Ayrıca Fe, ötektik hücrelerin çekirdeklenme yerlerinin zehirlenmesine ve büyük ötektik hücrelerin oluşmasına neden olur. Bu nedenle, hem büyük β levhalar hem de ötektik hücreler dentritikler arası beslenmeyi engellediğinden, büzülme gözenekliliği artar.



Şekil 2.6. Fe bakımından zengin farklı çökeltiler (a) β levhalar (b) α Çin yazısı karakteri (c) β 'dan büyüyen π fazı (d) π Çin yazısı karakteri (Taylor, 2004).

Çizelge 2.4. Fe bazlı intermetalik fazların süneklilik üzerindeki etkileri (Cinkılıç ve ark., 2019)

Fe'ce zengin intermetalik	Kristal Yapı	Morfoloji	Süneklilik Kaybı
$\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$	Monoklinik (Levhali)		Fazla
$\alpha\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$	Hegzagonal (Çin yazısı)		Daha az
$\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$	Kübik (Çin yazısı)		Daha az

Kum ve kokil kalıba dökümde yaklaşık %0,6 civarına kadar tolere edilen Fe için bu oran, basınçlı dökümlerde zaman zaman %3'e kadar çıkabilmektedir. Döküm alaşımlarında Fe'in yarattığı bu zararlı etkilerden kurtulmak için alaşım içine bir miktar Mn ya da Co eklenmektedir (Fortini ve ark., 2016) (Hwang ve ark., 2008).

Fe ile kırılğan çökeltiler oluşturduğu için alaşımda Mg fazlalığı istenmez. Bu nedenle Fe içeren Al-Si-Mg alaşımları Mg konsantrasyonu açısından sınırlıdır. Lloyd (2016) Mg içeriği arttıkça akma dayanımının arttığını bununla birlikte süneklilikte hafif bir azalma olduğunu rapor etmişlerdir. Aynı zamanda, Mg'nin süneklilik üzerindeki etkisinin, büyük π fazlarının oluşumu nedeniyle modifiye edilmiş alaşımlarda daha belirgin olduğunu belirtmektedir.

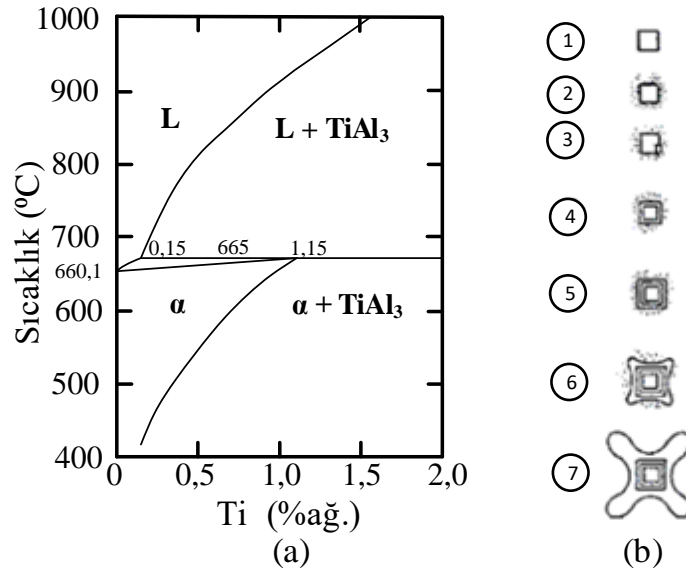
2.1.3.4. Titanyum Etkisi

Titanyum, Al alaşımlarında tane inceltici etkisi nedeniyle kullanılır ve % 0,05-0,250 sınırları arasında ilave edilirler. Endüstride Ti Bor (AlTiB) şeklinde kullanılır. Ti, Al alaşımlarında çekme mukavemeti ve sünekliliği arttırmakta fakat elektrik iletkenliğini azaltmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004).

Al alaşımlarında Al-Ti-B master alaşımlarının kullanılmasıyla tane inceltme etkisinin mekanizmasının anlaşılması için Şekil 2.7 (a)'da yer alan Al-Ti faz diyagramının göz önüne alınması gerekmektedir. Diyagram üzerinde dikkat edilmesi

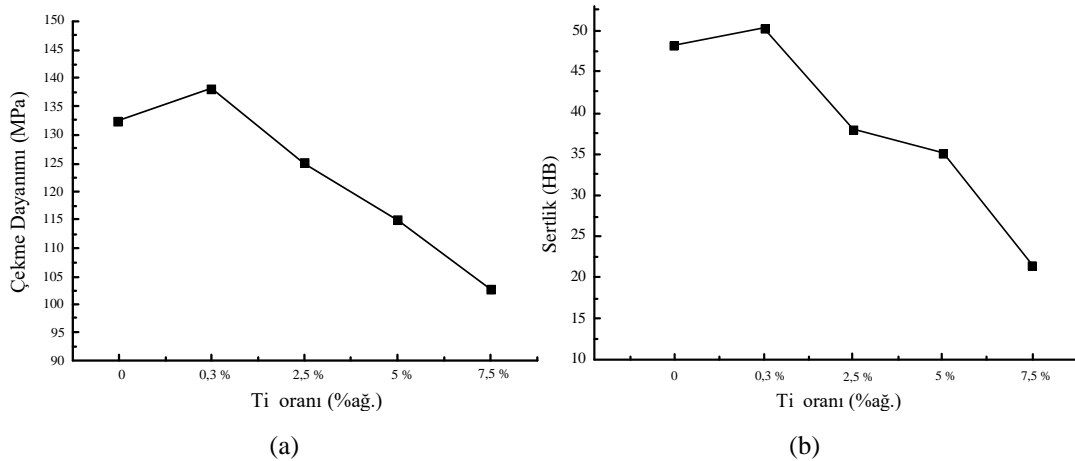
gereken ilk husus, Ti ilavesinin Al'un ergime noktasını yükseltmesidir. Saf Al 660°C'de ergirken, Ti ilavesi bu değeri 665°C'ye çıkarır. Bu etkinin, katı Al tanelerinin çekirdeklenmesi ve büyümesinde önemli rolü vardır. Tane inceltme mekanizması Backerud (1983) tarafından yapılmıştır ve mekanizması Şekil 2.7 (b)'de şematik olarak gösterilmektedir. Ti ilaveleri, %5-10 arasında Ti içeren Al master alaşımları ile yapılmaktadır. Bu alaşımlar, çok sayıda titanyum alüminit ($TiAl_3$) bileşiğinin kristalini içermektedir. Dökümden tipik olarak birkaç dakika önce bir master alaşım ergiyiğe eklendiğinde, bu mikroskobik parçacıkların milyonları ergiyiğe salınmaktadır. Bu parçacıklardan birinin varlığı Şekil 2.7 (b), (1) numaralı gösterimde yer almaktadır. $TiAl_3$ kristali sıvı Al ile temas ettiğinde çözünmeye başlamaktadır. Bu, parçacığın yüzeyindeki sıvı metalin, Şekil 2.7 (b)'de (2) ile gösterildiği gibi Ti'ca zenginleştirildiği anlamına gelmektedir. Al-Ti faz diyagramında gösterildiği gibi, alüminid ile temas halinde bulunan Ti'ca zengin metal, baz alaşımının ergime noktasının üzerinde bir sıcaklıkta katılaşmaya başlayabilmektedir. Dolayısıyla, Al ilk çekirdeklenmesi, Şekil 2.7 (b), (3)'te gösterildiği gibi alüminid parçacığının yüzeyinde olacaktır. Alüminyum kristali daha sonra alüminitin (4 ve 5) yüzeyi çevresinde büyümektedir. Bu süreçte, kristalin yakınında çözünmüş Ti'u tüketmekte ve büyüme durmaktadır (Yağcı ve ark., 2021). Metal soğudukça dendritik büyüme başlamaktadır (Bolzoni ve ark., 2015) ve katılaşma ilerledikçe devam etmektedir (Bolzoni ve Babu, 2019).

A356 Al döküm alaşımına Al-5Ti-1B eklenmesiyle tane boyutunda, mikroporozitelerde ve alaşımın gerilme özelliklerinde meydana gelen etkilerin incelenmesi üzerine bir çalışmada alaşıma kütlece %0,06 ila 0,15 değerleri arasında Ti eklenmesinin; yapıdaki mikroporozitelerin ve ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin azalması, mekanik özelliklerin iyileşmesi için optimum olduğu anlaşılmıştır (Lee, 2016).



Şekil 2.7. Al-Ti ikili faz denge diyagramının alüminyumca zengin kısmı (a), TiAl₃ kristalinin üzerinde alüminyumun çekirdeklenmesi ve büyümesinin şematik gösterimi (b) (Sigworth, 1984)

Şekil 2.8’ de A356 Al alaşımında farklı Ti içeriklerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekil 2.8’de Ti içeriği ne kadar fazla olursa, çekme mukavemetinin ve sertliğin o kadar iyi olacağı anlamına gelmediğini ortaya koymaktadır. Ti içeriği %0,3’e kadar mekanik özelliklerde iyileşmeye gözlenirken, 0,3’ün üzerindeki oranlarda çekme ve sertliğin her ikisinde de azalma görülmektedir (Qu ve ark., 2013).



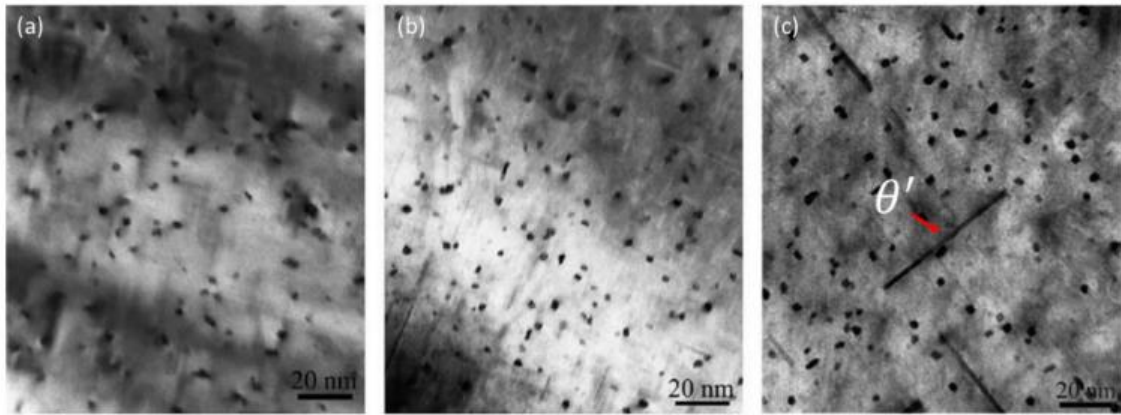
Şekil 2.8. A356 Al alaşımının çekme (a) ve sertlik (b) değerleri ile Ti içerikleri arasındaki ilişki (Qu ve ark., 2013)

2.1.3.5. Bakırın Etkisi

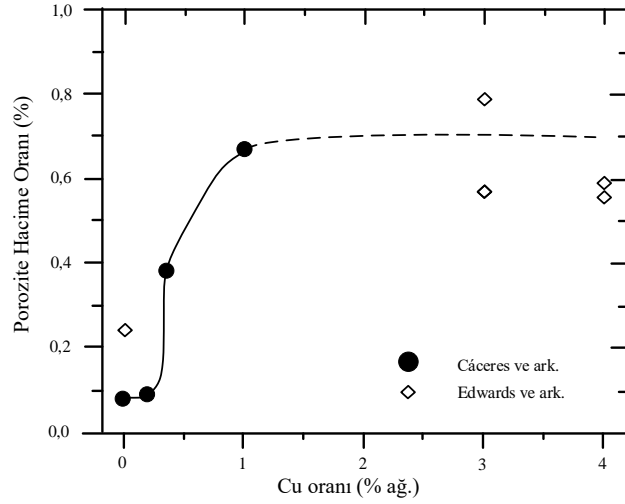
Al alaşımlarında Cu ilavesi; sertlik, dayanım, yüksek dökülebilirlik ve işlenebilirlik kolaylığı gibi önemli özellikler kazandırmasına rağmen sünekliği ve korozyon direncini düşürmektedir (Töre, 2012). Aynı zamanda sıcak yırtılmaya karşı mukavemeti

azalttığından dökümü zorlaştırır. Cu'nun Al içindeki çözünürlüğü sıcaklığa bağlı olarak artar. Bu nedenle Cu içeren Al alaşımlarını ısıtma işlemiyle çökelme sertleşmesi ile sertleştirmek mümkündür. Çökelme için gerekli zaman, alaşımın bileşimi ve sıcaklık ile ilişkilidir. Çökelmenin mekanik özelliklere yapacağı etki, çökelen faz miktarına, boyutlarına ve dağılımına bağlıdır (Hernandez ve ark., 2017).

Cu, Al-Si-Mg alaşım sistemlerinde ikincil fazların (θ -Al₂Cu ve Q-Al₅Mg₈Cu₂Si₆) oluşumuna yol açar (Biswas ve ark., 2014) (Li ve ark., 2006), A356 Al alaşımının tepe yaşlanma sertliğinin ve çekme dayanımının alaşımların Cu içeriği arttıkça arttığını rapor etmişlerdir. Bunun sebebini, β'' -Mg₂Si'nin artan yoğunluğuna ve Q-Al₅Mg₈Cu₂Si₆'nın fazının tepe yaşlanma durumunda çökmesine bağlamışlardır (Şekil 2.9). %1 Cu içeren alaşımda (Şekil 2.9 b) yalnızca Q-Al₅Mg₈Cu₂Si₆ ve β'' -Mg₂Si çökeltileri bir arada bulunurken daha yüksek Cu içeriğinde (Şekil 2.9 c), θ' -Al₂Cu çökeltileri de gözlenmiştir. Cáceres ve ark. (1999), Cu ilavesinin A356 alaşımlarındaki gözeneklilik düzeyi üzerindeki etkisini incelemişler ve %0.2'yi aşan Cu'nun mikro gözenekliliği önemli ölçüde arttırdığı gösterilmiştir (Şekil 2.10). Bunun nedeni ötektik sıcaklığın önemli ölçüde azalması ve katılma aralığındaki artışla ilgili olduğuna dayandırılmıştır.

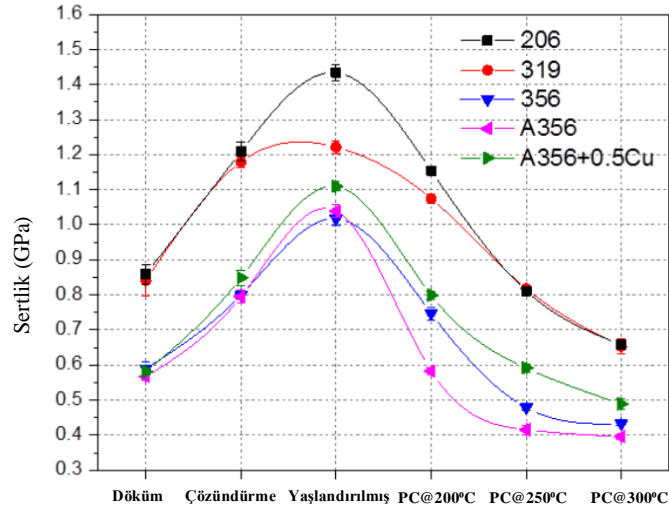


Şekil 2.9. T6 ısıtma işleminden sonra Cu'nun A356 Al alaşımının mikro yapısı üzerindeki etkisi, A356 (a), A356 + %1Cu (b) ve A356 + %3Cu (c) (Li ve ark., 2006)



Şekil 2.10. Cu ilavesinin A356 Al alaşımlarının gözeneklilik seviyesi üzerindeki etkisi (Cáceres ve ark., 1999)

Yüksek mukavemet ihtiyacı olmayan fakat yüksek korozyon direncinin olması gereken durumlarda Cu içermeyen Al alaşımları tercih edilirken, yüksek mukavemet değerlerinin gerektiği fakat korozyon direncinin kritik olmadığı durumlarda ise %5'e kadar Cu içeren Al alaşımları kullanılabilir. Roy ve ark. (2017), çeşitli yüksek sıcaklıklara maruz kalan beş Al döküm alaşımlarının sertlik değerlerini karşılaştırmışlardır. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi daha yüksek Cu içeriğine sahip alaşımların (356 ile A356+%0,5 Cu veya A319 (%2,8 Cu) ile 206 (%4,5 Cu)) yüksek sıcaklıklarda daha fazla mukavemeti koruyabildiği görülmektedir.



Şekil 2.11. Döküm Al alaşımlarının çeşitli sıcaklıklarda ortalama Vickers sertlik değerleri (PC:ön şartlandırma, 200 saat) (Roy ve ark., 2017)

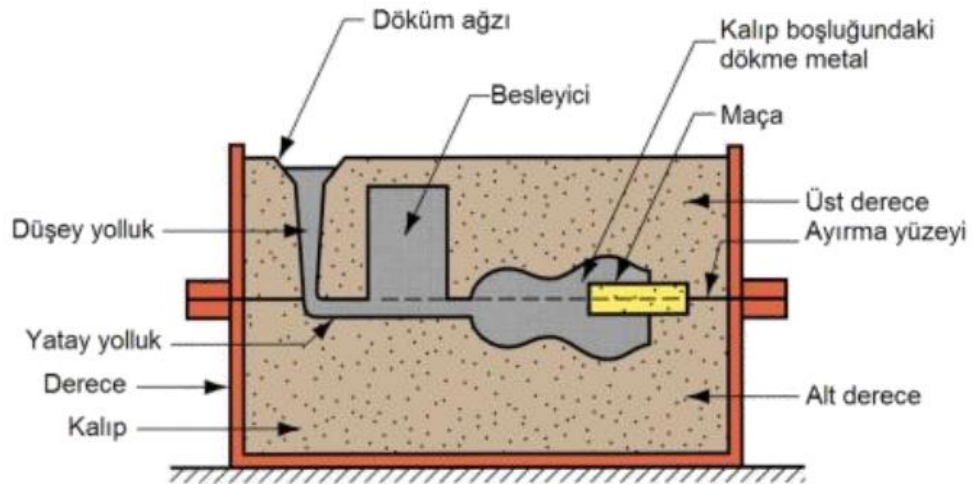
2.1.4 Alüminyum Alaşımlarının Döküm Yöntemleri

Alaşım türüne, parça şekline ve alaşımın kullanım amacına göre Al alaşımları kum, kokil veya hassas döküm yöntemleri kullanılarak üretimi yapılabilmektedir.

2.1.4.1 Kum döküm

Kum kalıba döküm, tüm döküm yöntemleri içinde en yaygın olanıdır. Çok farklı büyüklükteki parçalara uygulanışı ve kalıplama maliyetinin az oluşu, tercih nedenlerinin başında gelir.

Metallerin dökümünde, ucuz ve refrakter özelliğe sahip kum esaslı kalıp malzemeleri yaygın olarak kullanılır. Kalıplama kum esaslı malzemenin bir model etrafına sıkıştırılması ve daha sonra modelin kalıptan çıkarılması ile yapılır. Genellikle iki parça olan kalıpta, yolluk sistemi ve besleme amaçlı çıkıcılar gibi gerektiğinde maçalardan da yararlanır. Şekil 2.12’de döküme hazır bir kum kalıbın kesiti görülmektedir.



Şekil 2.12. Döküme hazır bir kum kalıbın kesiti

Kum dökümler genelde büyük kesitli ve karmaşık parçaların dökümü için uygun olmakla birlikte düşük katılaşma hızı ve gaz problemleri nedeniyle yüksek mukavemetli kritik Al alaşımı parçaların dökümüne uygun değildir.

2.1.4.2 Metal Kalıba (Kokil) Döküm

Kokil döküm; sıvı metalin kokil olarak adlandırılan metal kalıba dökülmesiyle döküm parça üretim işlemidir. Metalin kendi ağırlığı ve yerçekimi etkisi ile sıvı metal akışı sağlanır. Döküm parçasının şekli kalıbın iç yüzeyini oluşturan boşluk ile elde edilir. Bu boşluk; düşey yolluklar olarak bilinen besleme sistemiyle ve havanın kalıp boşluğundan çıkmasını sağlayan hava çıkış kanallarına bağlıdır. Bu kanallarda katılaşan metal, bitirme işlemleri sırasında kesilerek atılır. Kokil döküm teknolojisi kum kalıba döküm yöntemiyle kıyaslandığında; kokil kalıba döküm yöntemi ile yüksek boyut hassasiyeti, daha düzgün yüzeyler, işleme maliyetinin düşük olması ve daha ince taneli döküm parçaları üretilebilmektedir. Kokil döküm yönteminde kullanılan metal kalıpların hazırlanması zor ve maliyeti yüksek olduğundan yüksek sayıda (1000 adet ve üstü) ve kompleks şekilli parçaların üretimi için uygundur.

Metal Kalıba Döküm Avantajları

- İnce taneli iç yapı sayesinde mekanik özellikleri daha iyidir.
- Hassas boyut toleransları sağlanabilir.

- Karmaşık parçaların üretimi mümkündür.
- Parçanın yüzey kalitesi iyi olup, temizleme masrafları düşüktür.
- Seri üretim için ekonomik bir uygulamadır.

Metal Kalıba Döküm Dezavantajları

- Çok yüksek sıcaklıkta eriyen metallere uygun değildir.
- Kalıp açılacağından geometri basit olmalıdır.

Yüksek kalıp maliyeti sebebiyle düşük imalat miktarlarında ekonomik değildir.

2.1.4.3 Basınçlı Döküm

Yüksek Basınçlı Döküm (HPDC)

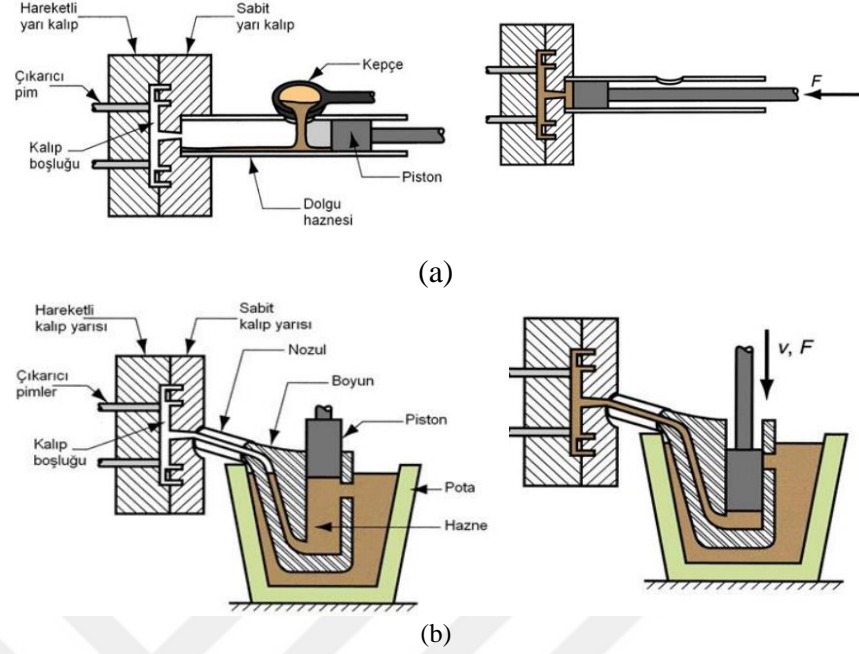
Yüksek basınçlı döküm, ergimiş metalin, basınç altında güvenli bir şekilde kalıp boşluğuna doldurulduğu bir prosesdir, metal katılaşana kadar basınç altında bekletilir. Proses, pistonun hızını ve basıncını, bulunduğu konumun bir fonksiyonu olarak yansıtan üç ana aşamadan oluşur. İlk aşamada, ergimiş metal kovana doldurur; Hava, pistonun önünde, oluşan bir ergimiş metal dalgası tarafından zorlanır. Kovandaki türbülansı azaltmak için optimum piston hızı çok yüksek olmamalıdır (0,25-0,35 m s⁻¹).

İkinci faza geçiş, metal kalıp yolluğundayken meydana gelir; yolluğun daha dar olan kısmı karşı basınca neden olur, bu nedenle kalıbın hızlı bir şekilde dolmasını sağlamak için daha yüksek bir piston hızı gereklidir. Son olarak, üçüncü aşama, ergimiş metal kalıp boşluğunu tamamen doldurduğunda ve aşırı yüksek basınç uygulandığında başlar.

Bu yüksek basınç metalin içine sıkışmış herhangi bir gazı sıkıştırabilir ve metalin katılaştıkça büzülmesini telafi etmek için boşluğa ilave metal besler.

Metalin katılaşmasından sonra, kalıp kilidi açılır ve döküm çıkarılır. Dökümün çıkarılmasından ve yağlayıcı ve ayırıcı maddelerinin spreyleneşinden sonra, kalıp kapatılır ve bir sonraki döngü için tekrar kilitlenir. Metalin kalıp boşluğuna enjeksiyonu birkaç milisaniyede tamamlanırken, tüm döngü tipik olarak 30 ila 80 sn arasında değişen bir süreye sahiptir.

Ergimiş metalin kalıba enjekte edilmesi için iki tip sistem kullanılır (Şekil 2.13). Sıcak kamara sistemi, çinko, magnezyum ve kurşun gibi metaller için kullanılır. Sıcak kamara makinesinin enjeksiyon sistemi, ergitme ocağının ergiyik metal banyosuna daldırılır. Piston hareket ettikçe metali nozülden kalıba iter.



Şekil 2.13. Soğuk ve sıcak kamaralı döküm aşamaları

Soğuk kamara sistemi, Al, pirinç (Cu-Zn) ve Mg gibi yüksek sıcaklıklarda ergiyen metaller için kullanılır. Her iki sistem kullanılarak da magnezyum parçaları üretilebilir, ancak genellikle sıcak kamara makinelerinde küçük parçalar ve soğuk kamara makinelerinde büyük parçalar üretilir, çünkü sıcak kamara makinelerinin boyutları sınırlıdır. Soğuk kamara işleminde yatay ve dikey enjeksiyonda kullanılan iki enjeksiyon sistemi vardır.

Yüksek basınçlı kalıp dökümleri, kaplama için temel bir gereksinim olan iyi bir yüzey bitimine sahiptir ve genel döküm ağırlığını azaltmak için daha ince cidar kalınlığı mümkündür. Kalıplar uzun ömürlüdür, birim parça maliyetlerini azaltır ve daha karmaşık parçalar üretilebilir, böylece bir montajda gereken bileşen sayısı azalır.

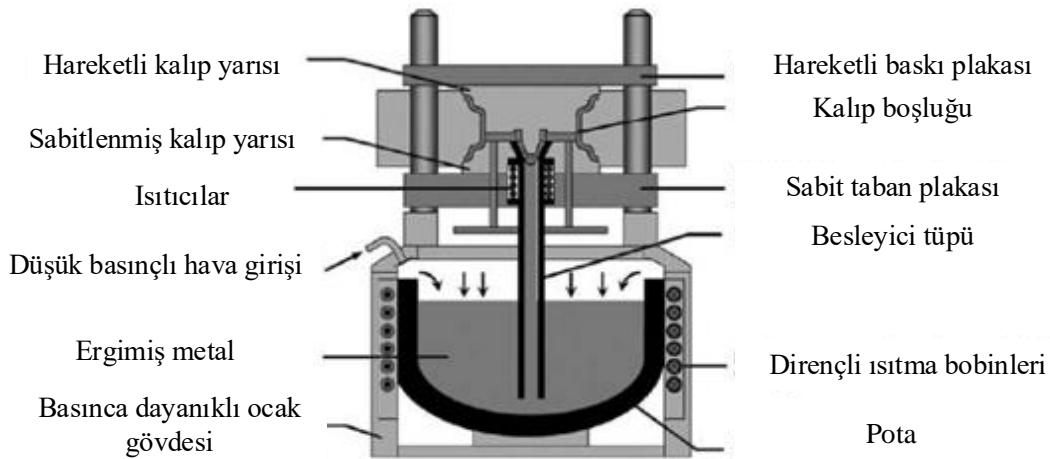
Yüksek basınçlı döküm makinesi ve ilgili bakım maliyetleri, diğer döküm işlemlerinden daha yüksektir. En dezavantajlı yönü ise büyük hacimli kalın kesitli parçaların dökümüne uygun olmamasıdır.

Basınçlı döküm teknolojilerine yönelik literatür çalışmaları incelendiğinde çalışmaların büyük bir oranının yüksek basınçlı Al dökümlerinin konusunda olduğu ve bu çalışmaların da daha çok vakum destekleri üzerine olduğu görülmektedir. Örneğin; Niu ve ark. (2000), Al alaşımlarının vakum destekli yüksek basınç döküm yöntemi ile dökmüş ve yüzey kalitesinin arttığını, çekme ve uzama değerlerinde artış gözlemlendiğini ifade

etmişlerdir. Dong ve ark. (2019) ise vakum uygulamasını sadece kalıba değil kalıp giriş (shot sleeve) bölgesine de uyarlamış ve böylece gözlemlenen avantajların yanı sıra hata boyutunda da küçülme olduğunu ifade etmişlerdir. Szalva ve Orbulov (2018), AlSi₉Cu₃(Fe) alaşımlarının değişen vakum değerleri altında dökülmesi durumunda porozite ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bir başka çalışmada aynı Al alaşımı üzerine benzer bir çalışma yapılmış ve sadece mekanik özellikleri değil mikroyapının da nasıl değiştiği incelenmiştir (Cao ve ark., 2019). Al alaşımlarının haricinde Mg alaşımları da çalışılmıştır (Wang ve Xiong, 2014) (Li ve ark.,2016) (Klarner ve ark., 2019).

Alçak Basıncı Döküm (LPDC)

Alçak basınçlı bir kalıp döküm makinesinin taslağı, Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Ergimiş metal, izolasyonlu bir pota ya da basınç izolasyonlu bir ocakta bulunur. Besleyici tüpü olarak adlandırılan bir refrakter bazlı boru, alt ucu ergimiş metale batırılmış ve üst kısmı ocak kapağı sızdırmaz hale getirilmiş şekilde ocaktan dikey olarak geçer. Kalıp makineye, ocağın üzerinde monte edilir. Bu proseste döküm yapmak için metal kalıpların yanı sıra kum kalıplarda kullanılabilir. Proseste, yaygın olarak kullanılan basınç 1 bar'ın altındadır.



Şekil 2.14. Alçak basınçlı makinenin şematik gösterimi

Ocağa kuru hava basıncı uygulandığında, ergimiş metali harekete geçirir, metalin boruya ve düşük türbülanslı olarak kalıp boşluğuna girmesine neden olur, kalıptaki hava ise, havalandırma deliklerinden ve kalıbın ayırma yüzeyinden çıkar.

Soğutma işlemi, kalıbın uçlarından başlayarak, borunun ağzı olan besleme kafasına geri döndüğü bir sırada gerçekleşir. Dökümün katılaşması üzerine, istenmeyen metal, hava basıncı düşürülerek ocağa geri döner; kalıp açılır, döküm çıkarılır ve döküm döngüsü tekrarlanır.

Alçak basınçlı döküm, genel olarak yüksek mukavemetli döküm parçalar için kullanılan gelişmiş bir prostedir. Havacılık ve savunma sanayi kritik döküm parçaları, motor blok ve silindir kapakları, alt yağ karterleri ve manifoldlar gibi birçok otomotiv motor bileşeni için kullanılır. Alçak basınçlı dökümde genişleyen maçaların kullanılması, bu prosesin, yüksek basınçlı proses de üretilmesi mümkün olmayan parçaları dökmesine olanak tanır. Bu parçaların birçoğu, büyüklükleri, karmaşıklıkları, hacimleri ve ürün gereksinimleri nedeniyle alçak basınçlı döküm işlemi ile üretilir.

Alçak basınçlı dökümün avantajları, özellikle kalın kesitlerde döküm kalitesinin çok iyi olması ve yüksek basınçlı döküme göre çok daha fazla alaşım seçimine izin verilmesidir.

Alçak basınçlı dökümün dezavantajları ise, yüksek basınçlı dökümden daha düşük bir üretim hızına sahip olması ve normalde küçük parçaların dökülmesi için uygun olmamasıdır.

Alçak basınç yöntemi uygulanarak yapılan çalışmaların çoğu A356 Al alaşımına aittir (Okçu ve ark., 2016) (Inderjit ve Sharma, 2017) (Sui ve ark., 2015) (Chiesa ve ark., 2018) (Cáceres ve Selling, 1996). Diğer taraftan A357 Al alaşımının alçak basınçlı döküm parçalarının incelenmesi üzerine literatürde az sayıda çalışmaya rastlanılmıştır (Chen ve ark., 2014) (Nunes ve ark., 2023). Bu nedenle, aşağıda A357 Al alaşımına çok yakın olmasından dolayı A356 Al alaşımı üzerine yapılan çalışmalardan da bilgi verilmiştir.

Yüksek basınçlı dökümden elde edilen parçaların bütün kesit noktalarında düzenli bir dayanım sergilenmemekte, döküm dış kenarların dayanımları iç bölgelerin dayanımlarından göre oldukça büyük farklara sahiptir. Genel olarak yüksek basınçlı dökümden elde edilen parçalarda kokil kalıp kullanılan alçak basınç dökümünde elde edilen parçalar göre daha fazla porozite kusurunu barındırmakta, buna karşın yüksek verimliliktedir.

Chen ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, alçak basınç ve düşerli (gravity) dökümünde kokil kalıpların kullanımı karşılaştırılmıştır. A357 Al alaşımının karşılaştırılmasının yapıldığı bu çalışmada; numuneler 545°C'de 9 saatlik çözündürme ısıl işleminden sonra 60°C'de su ile su verilmiş, daha sonra farklı sıcaklıklarda (155°C, 165°C, 175°C ve 185°C) yaşlandırılmıştır. Alçak basınç döküme ait numunelerin çekme

gerilmesi ve uzama deęerleri, dūşerli döküme ait numune deęerlerinden oldukça yüksek bulunmuştur.

Okçu ve ark., (2016) tarafından A356 Al alaşımı jantları dökümünde kalıp kaplama kalınlığı ve kalıp sıcaklığının etkisini katılaşıma yazılımı kullanarak incelemiştirlerdir. Çalışmada porozite kusurunun boyut ve bölgesi üzerinde etkili iki temel etken olduğunu tespit etmişlerdir. Kalın kalıp kaplaması ve yüksek kalıp sıcaklığı dökümün sıcaklık profilini değiştirerek, büzülme kaynaklı poroziteyi kritik bölgeden daha az kritik bölgeye dağınık bir biçimde taşıdığını belirtmişlerdir. Kaplamanın kalıbın ısı kararlılığının etkinliğini belirlemek amacıyla ZrO_2 -MgO/NiCr tabanlı bir kaplamanın, alçak basınç dökümün yapılacağı bir alüminyum alaşım araç jantı kalıbına uygulanmıştır. Isıl dağılım ve ısı iletkenlik farkları geleneksel kalıp kaplama ile karşılaştırılmıştır. Kalıp sıcaklığı 542-613°C iken gerçekleştirilen kaplamasız, geleneksel seramik tabanlı kaplama, 450µm kalınlık %25 poroziteli kaplama, 850µm kalınlık %40 poroziteli kaplama sonucunda 300 sn. sonrasında alınan sıcaklık dağılımlarında geleneksel seramik tabanlı ve 850µm kalınlık %40 poroziteli kaplamalar birbirlerine yakın dağılım sergilemişlerdir.

Bir diğer çalışmada (Inderjit ve Sharma, 2017) LPDC A356 Al alaşımı dökümünde kalıbın soğutma parametreleri incelenmiştir. Belirlenen otomotiv parçasının metal kalıp boşluğına yerleştiren pim, doğal soğutma, hava ile soğutma ve su ile soğutma için düzenlenmiş, ilgili soğutma yöntemlerinin porozite kusuru üzerine etkisi araştırılmıştır. Hassas tasarıma sahip ve ağırlığını dūşürmek için kalınlık değişimlerinin olduğu parçalarda daha sıklıkla görülen yüzey porozite ve büzülme kusurlarını azaltmak veya işlevsel bölgelerden işlevsel olmayan bölgelere kaydırmak için alçak basınç dökümün soğutulması üzerinde, deney tasarımı uygulanarak bir araştırma gerçekleştirilmiştir.

Sui ve ark. (2015), LPDC A356 Al alaşım otomotiv jantının dökümünde önce sayısal benzeşim yardımıyla, sonra gerçek uygulama ile porozite üzerinde soğutma işleminin etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, model olarak beş büyük, beş küçük parmaklı bir jant kullanılmış, kalıp üst ve altında soğutma noktaları tasarlanmış, üst kalıp jant merkezinde bulunan ilk nokta su ile soğutulmuş, merkezden dışarı doğru büyüyen üç adet dairesel güzergahlarda bulunan diğer noktaları hava ile soğutulmuştur. Alt kalıpta iki dairesel güzergahta bulunan soğutma noktaları hava ile soğutulmuştur. Farklı soğutma güzergahlarında bulunan bu noktalar 50-260s zaman aralıklarında değişen soğutma rejimine tabi tutulmuşlardır. Gerçekleştirilen dökümlerin x-ray muayenesinde, ASTM E

155'e göre seviye 4 makro porozite küçük parmaklarda, seviye 2 makro porozite ise küçük parmaklarda tespit edilmiştir. Teknik gereklilik olan seviye 3'den aşağı poroziteyi sağlamak ve dökümü iyileştirmek için MAGMA yazılımı kullanılmış, farklı safhalarda katılma zamanları ve porozite değerleri deneysel uygulamalar ile karşılaştırılmıştır. Benzeşim sonuçlarına göre, üst ve alt kalıp üzerinde katılma süresini sürdürecekt ve beslemeyi devam ettirecek bazı yalıtılmış noktalar tasarlanmış, ardışık soğuma zamanlaması değiştirilmiştir. Neticede yalıtılmış noktaların ince duvar kalınlığı olan yerlerde katılma süresini uzatmada, besleme yollarının erken kesilmesini önlemede ve porozite kusurlarının boyutunu belirgin bir şekilde azaltmada iyi bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Soğutma hızı parametresine yönelik çalışmaların birinde Dişpınar (2005), katılma esnasında oluşan kusurlar arasında segregasyon ve soğuk yırtılmanın öne çıktığı, A 356 Al alaşım ergiyiklerde, ergitme sırasında oluşan herhangi bir kusur ise son mikroyapıya taşındığı, potansiyel hasar mekanizmalarına sebep olan kusurların, bifilms olarak ifade edilen sıkışmış alüminyum oksitleri olduğu ifade edilmiştir.

A356 Al alaşımı ve kalıp duvar kalınlığı ile döküm hızı ve sıcaklığı parametrelerinin incelendiği diğer çalışmada (Chiesa ve ark., 2018) kompresör türbin pervanesinin 2 mm'lik ince duvarı dolum kabiliyetini test etmek amacıyla kum kalıp içinde alçak basınç döküm yöntemi kullanmışlardır. Kalıp alt ve üst noktasına iki adet yerleştirilen termokopul ile döküm sıcaklıkları ölçülmüş, basınç eğiminden dolum zamanı belirlenmiştir. Farklı döküm sıcaklıkları (640°C, 655°C, 660°C, 670°C, 675°C, 680°C ve 700°C) ve dolum zamanlarındaki (2 s, 4 s ve 8 s) dökümler, 2s dolum zamanı ve 660°C döküm sıcaklığı kullanılarak düşerli (gravity) döküm yönteminde elde edilen numune ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda optimizasyon durumu kalıbın 4s'de dolduğunda ve döküm sıcaklığının 700°C'de olduğunda elde edilmiştir. Döküm hızı parametresine yönelik diğer bir çalışmada Cáceres ve Selling (1996), atmosfer ortamında yapılan metal döküm işlemlerinde ergiyik yüzeyi üzerinde kolay oksitlenme olması, oluşan oksit film döküm sırasında kırıldığı ifade edilmiştir. Döküm hızı 0,5 m/s'den fazla olduğu durumlarda akışın türbülanslı olduğu yeni film oksitlerin oluşumunu ortaya çıkardığı belirtilmiştir. Katılma sonucunda hapis olan oksit filmlerin büzülme kaynaklı poroziteyi ve cüruf gibi kusurlar oluşturacağı ifade edilmiştir. Yine aynı parametreye yönelik bir diğer çalışmada (ALCOA, 2002) ergimiş Al için kritik hız 500 mm/s civarında olduğu, 5 mm ve 10 mm olan test plakaları üzerinde yapılan araştırmada 500 mm/s'lik

hız aşıldığında aştığında çatlaklara sıklıkla neden olduğu gözlenmiş ve test plakalarının eğilme dayanımları önemli derecede düştüğü belirtilmiştir.

Başka bir çalışmada (Gupta ve Hoffman, 2001) kum ve kokil kalıp ile dökümü yapılmış alüminyum alaşım numunelerin kesit çapı ve nihai çekme gerilmesi değerine ait kıyaslamalar verilmiştir. Kokil kalıp içinde gerçekleşen soğuma karakteristikleri ile katılan döküm parçada daha ince tane yapısı, azalan porozite ve daha yüksek mekanik özellikler elde edilebileceği belirtilmiştir. Bunun kum kalıba göre mekanik özellikleri %20 daha yukarı taşıdığı belirtilmiştir.

Kalıp ve ergimiş metal arasındaki Isı Transfer Katsayısı (ITK) sabit olmayıp sıcaklık ve zamanın fonksiyonu olarak değiştiği belirtilen bir başka çalışmada (Siik, 2011); kalıp ve ergiyik metal arayüzündeki en yüksek ITK döküm metalin ergiyik halinde olduğu zaman olduğu ve katılma esnasında veya sonrasında düşeceği ifade edilmiştir. Bunun sebeplerinden birinin, kalıp ve katılan/büzülen dökümün arasında bir hava boşluğunun şekillenerek iki malzeme arasında yalıtılmış bir hava cebinin oluşmasından olduğu ve bu yalıtılmış hava katmanı arayüz üzerindeki ısı taşınması olumsuz yönde etkileyeceği ifade edilmiştir.

Bir diğer çalışmada (Lee, 2006), LPDC kalıbın ısı denetiminde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiş, kalıp boşluğu alanı dışındaki yüzey alanını artırarak (kanatçıklar kullanılması gibi) daha fazla ısının doğal iletim yoluyla yayılmasını sağlamak; kalıp boşluğundan daha fazla ısıyı çekmesi için kalıbın belirli alanlarındaki kalıp kütesinin artırılması (ısı emiciler gibi) veya kalıp kaplama kalınlıklarının kullanılması; soğutma kanallarından su veya hava kullanarak yönlendirilmiş soğutma yapılması olduğu belirtilmiştir. Kalıbın denetimli soğutulması gerektiğini ifade eden bir diğer çalışmada (Saadah ve ark., 2019) ise döngüsel kalıp yüklenmesine bağlı olarak mikro porozite, sıcak yırtılma, hapsolan oksit filmleri, soğuk birleşme gibi döküm kusurları ortaya çıkacağı ifade edilmiştir. Kalıbın denetimli soğutulması ile porozite kusurları uzaklaştırılarak, daha kaliteli bir döküm elde edilebileceği belirtilmiştir.

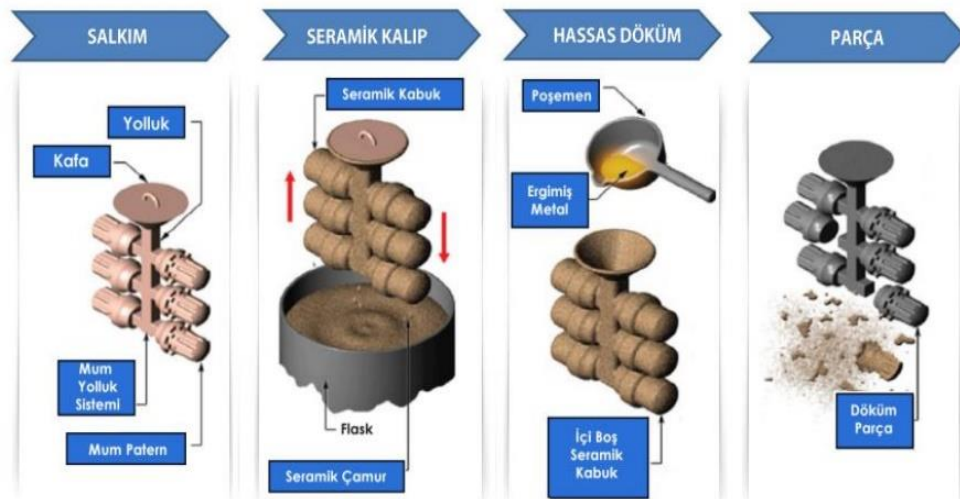
2.1.4.4 Hassas Döküm

Hassas döküm tekniği 2. Dünya savaşına kadar ticari olarak sadece kuyumcu ve dişçiler tarafından uygulanmış; daha sonra özellikle uçak, tekstil, elektronik ve makine sanayinde hassas parçalara duyulan ihtiyaç, yöntemin endüstriyel uygulamasını yaygınlaştırmıştır. Hassas döküm tekniğinde, üretimi gerçekleştirilecek parçanın mum

modeli yapılmaktadır. Modeller, mumun metal kalıba enjeksiyonu ile üretildikten sonra, mum modeller aynı yolluk üzerinde olacak şekilde bağlanarak salkım şeklinde model ağacı oluşturulur. Bu durum aynı anda birden fazla parçanın seri üretimine imkan tanımaktadır. Oluşturulan model ağacı, refrakter çamurla kaplanmaktadır. Bu kaplama kabuk şeklindedir. Kaplama sonrası, kalıp ısıtılarak eritilen mum model malzemesinin dışarı çıkarılması sonucu kalıp boşluğu elde edilmektedir. Kaplanan mumun oluşturulan seramik kabuk içerisinden dışarı çıkartılmasından sonra seramik kabuk pişirilmektedir. Metalin ergime sıcaklığının üzerine ısıtılarak ergitilmesi sonrası, oluşturulan boşluklara, istenen şekil elde edilmek üzere dökülmek suretiyle döküm yapılmaktadır (Şekil 2.15).

Gaz türbinlerinde ve jet motorlarının yanma odalarında kullanılan kanatçıkların imalatında bu teknolojiye yararlanılır. Al dökümlerinde ise İHA ve SİHA’larda kullanılan kamera gövdelerinin imalatında kullanılır.

Bu yöntemde, fiziksel ve ekonomik nedenlerle, üretilen parçaların ölçü ve ağırlıkları sınırlıdır. Özel durumlar hariç genel olarak seri üretimde döküm parça ağırlığı 0,5 kg.’ı aşmamaktadır.



Şekil 2.15. Hassas döküm şematik gösterimi

2.1.5 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

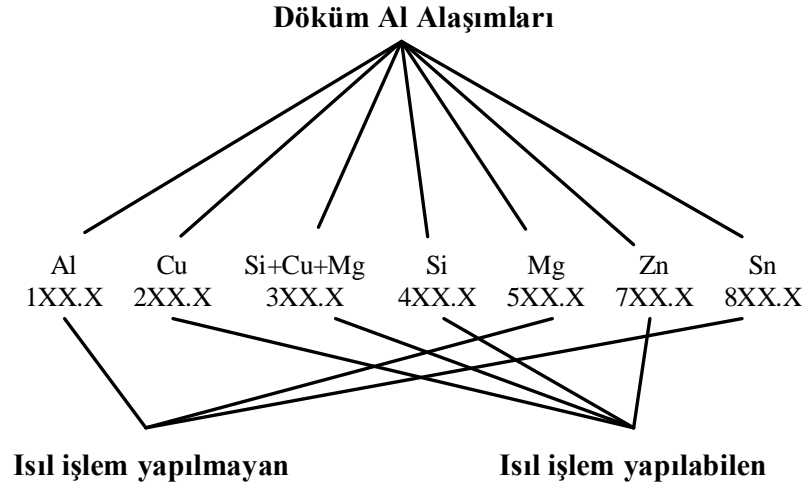
Alüminyum alaşımlarının, aşınma direncinin ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan yöntemlerden biri ısıtılma işlemidir. Genel olarak dört tür ısıtılma işlemi kullanılmaktadır. Bunlardan; (F) fabrikasyondan sonraki hali, (O) tavlama ve yeniden kristalleştirilmiş hali, (H) yeniden kristalleştirme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yapılan plastik şekillendirme sonucu, sertlik ve mukavemetin artışı

sağlanmış hali ve (T) ısıtma işlem halini göstermektedir. (W) solüsyona alma ısıtma işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı göstermektedir (Çizelge 2.5). T, kararlı bir temper elde etmek için alaşıma F, O veya H işleminden başka uygulanan temper işlemini gösterir. Kararlı temperi ifade eden T harfinden sonra 1'den 10'a kadar rakam kullanılır.

Isıtma işleme karşı gösterdikleri hassasiyete göre dövme veya dökme alüminyum alaşımları, ısıtma işlem uygulanabilen veya ısıtma işlem uygulanamayan alaşımlar olarak iki gruba ayrılmaktadır. Şekil 2.16'da ısıtma işlem yapılabilen ve yapılamayan Al döküm alaşımları verilmiştir. Isıtma işlem görebilen alaşımların içerdiği elementler, yüksek sıcaklıklarda büyük ölçüde katı halde çözünme yeteneğine sahip olmasına rağmen, düşük sıcaklıklarda katı halde çözünme yeteneklerinin sınırlı olmasından dolayı alaşımların ısıtma işlem yapılabilmesine imkân sağlar (Aydın, 2002).

Çizelge 2.5. Alüminyum alaşımlarında ısıtma işlem kodlaması (Geçkinli, 2003)

Temper	Temper Kodu	Açıklama
F		Mekanik veya ısıtma işlem görmemiş (döküm, dövülmüş vb.) halde
O		Tavllanmış ve yeniden kristallenmiş
H	H1x	Soğuk işlem uygulanmış
	H2x	Soğuk işlenmiş ve kısmen tavllanmış (x. farklı sertlikleri ifade etmektedir.)
	H3x	Sadece soğuk işlem uygulanmış ve kararlı
	H4x	Soğuk işlem uygulanmış ve malzeme yaşlanmaması için düşük sıcaklıkta ısıtma işlemle stabilize edilmiş (x, stabilizasyon sonrası sertleşme işlemini ifade eder.)
W		Çözeltiye alınmış
T		Yaşlandırma işlemini göstermektedir
	T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
	T2	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk deformasyon uygulanmış, doğal olarak yaşlanmış
	T3	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma uygulanmış
	T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlanmış
	T5	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve yapay yaşlandırılmış
	T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlanmış
	T7	Çözeltiye alınmış ve stabilize edilmiş (aşırı yaşlanmış)
	T8	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
	T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlem uygulanmış
T10	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk işlem uygulanmış yapay yaşlanmış	



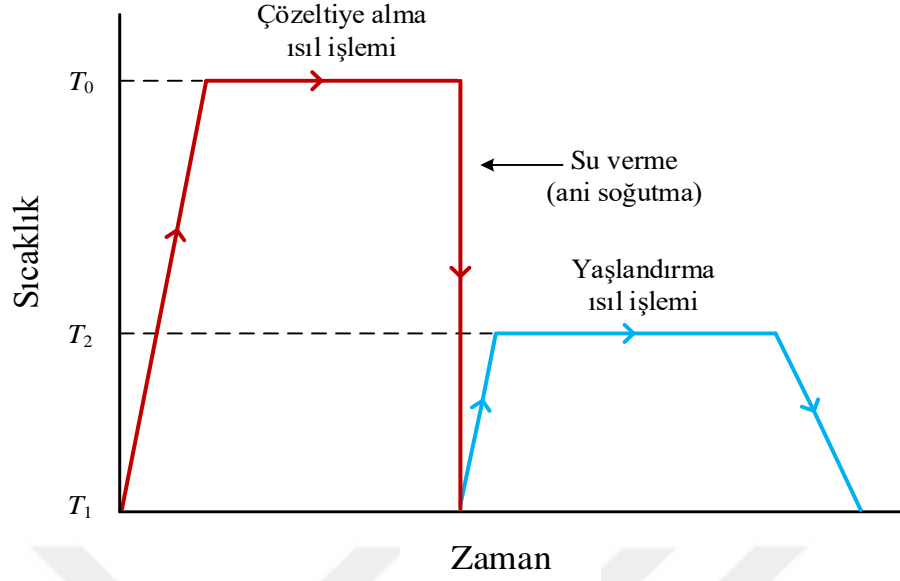
Şekil 2.16. Isıl işlem yapılabilen ve yapılamayan Al döküm alaşımları

Isıl işleme, Al alaşımlarının mekanik dayanımlarını iyileştirmek için ikinci faz çökeltilerinin ince ve homojen olarak matris içinde çökmesiyle sertlik artışı sağlanır. Buna “çökeltme sertleşmesi” adı verilir ve demir dışı metallerin mukavemetini arttırmada kullanılan en önemli yöntemlerden birisidir. Havacılık ve savunma sanayinde kullanılan alüminyum alaşımları çökeltme sertleşmesi ile mekanik mukavemetleri geliştirilmektedir. Endüstri ve diğer uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan ısıl işlem yöntemi, yaşlandırma ısıl işlemidir.

Çökeltme Sertleşmesi

Yumuşak ve sünek matris içinde ince dağılmış, sert ve matris ile uyumlu çökeltilerin oluşumunu sağlamak amacıyla yaşlandırma ısıl işlemi uygulanır. Yapıda dağılmış haldeki küçük yeni faz parçacıkları çökelti olarak isimlendirildiği için, bu işleme çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma sertleştirilmesi) adı verilmiştir. Matris içerisinde nispeten homojen dağılan çökeltiler dislokasyon hareketlerini engelleyerek alaşımların mekanik dayanım değerlerinin (UTS, YS, ϵ) artmasına neden olur. Isıl işleme tabi tutulan Al alaşımlarının yaşlandırma ısıl işlemi üç ana aşamadan oluşur. Şekil 2.17 yaşlandırma ısıl işleminin aşamalarını göstermektedir.

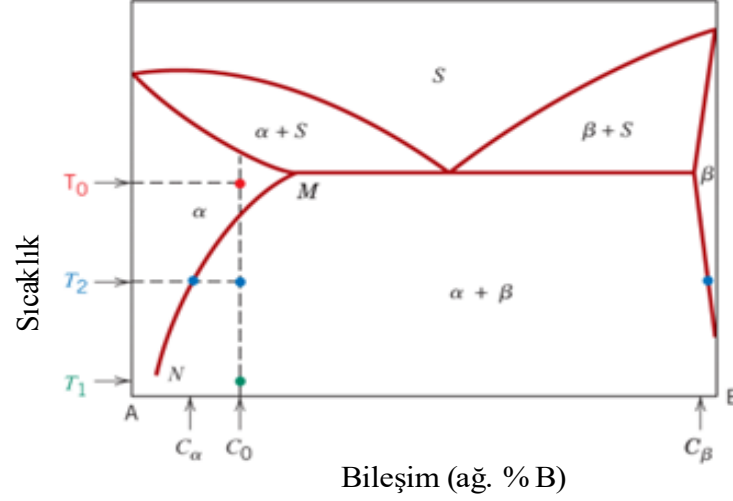
- Çözeltiyeye alma (solüsyona alma); önceden tayin edilen bir sıcaklığa kadar ısıtma ve belirlenen bir süre bu sıcaklıkta bekletme,
- Su verme; düşük bir sıcaklığa hızla soğutma
- Yaşlandırma (çökeltme); su vermeye takiben çökelti oluşumu.



Şekil 2.17. Yaşlandırma ısıl işlemi sıcaklık-zaman diyagramının şematik gösterilişi (Callister ve ark, 2007)

2.1.5.1 Çözeltiyeye (Solüsyona) Alma ve Su Verme

Çökeltme sertleşmesi için malzemenin mukavemetini artırmanın ilk adımı solüsyona alarak çözündürme işlemidir. Solüsyona almanın amacı, mukavemet arttırmak için kullanılan alaşım elementlerinin katı eriyik içerisinde maksimum oranda yayılımını sağlamaktır. Solüsyona alma sıcaklığı; Şekil 2.18'de gösterildiği gibi, alaşımın solvüs eğrisinin, yani alaşım elementinin miktarı arttıkça artan tek fazlı bölge sıcaklığına kadar ısıtılması ile gerçekleşir (T_0). Dikkat edilmesi gereken nokta, alaşımın ötektik erime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa ısıtılmasıdır. Bu noktada alaşımın yapısı sadece C0 bileşimindeki α fazından oluşmaktadır. β fazının çözündürme işleminden sonra tekrar oluşmasına izin vermeyecek bir hızda T_1 sıcaklığına ani olarak soğutulmalıdır. Bunun sonucu olarak T_1 sıcaklığında B atomları tarafında aşırı doymuş α katı eriyiği oluşur.

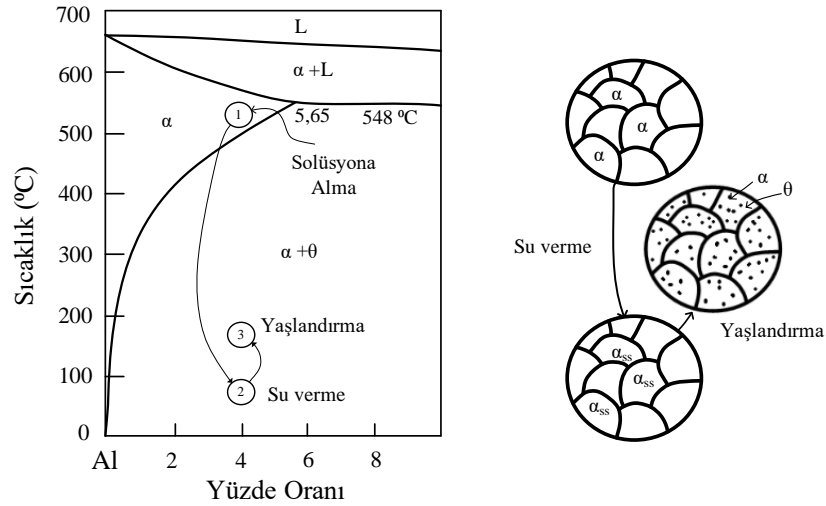


Şekil 2.18. Yaşlandırma ısıtma işleminde faz diyagramına göre işlem sıcaklıklarının gösterilmesi (Callister ve ark, 2007)

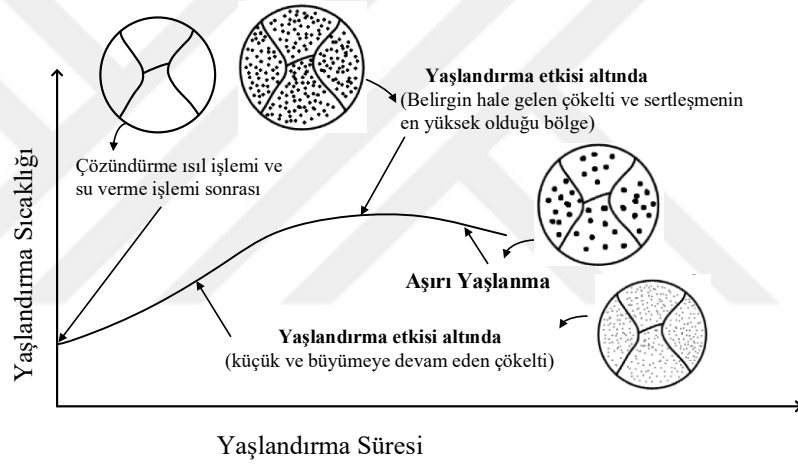
Solüsyona alma işleminde dikkat edilmesi gereken bir husus da ısıtma hızıdır ki bu durum dengesiz çözümlerin ana sebebidir. Örneğin, Zamani ve ark. (2019) tarafından rapor edildiği gibi; 500 °C’ de %4 Cu içeren döküm Al alaşımında CuAl₂ çökeltileri ancak uygun ısıtma hızlarında çözünürken hızlı ısıtmalarda CuAl₂’nin birçoğu çözünmeden kalabilmektedir. Solüsyona alma işleminde önemli olan diğer bir nokta da solüsyonda bekleme süresidir. Bu süre, matriste çözünmemiş faz kalmayınca ve homojen bir yapı olacak şekilde belirlenmelidir. Doğal olarak, ince kesitli malzemelerde solüsyona alma süresi düşük olurken, artan kesit miktarıyla birlikte bu süre artacaktır. Şekil 2.19’deki faz diyagramında gösterildiği üzere, T₀ sıcaklığından daha fazla bir sıcaklık üzerine yani ötektik ergime T₀ sıcaklığı üzerine çıkılmamasına dikkat edilmelidir. Alaşımın ötektik ergime T₀ sıcaklığı üzerine çıkıldığında, tane sınırlarında ergime oluşumu meydana gelir ve malzeme distorsiyon oluşur.

2.1.5.2 Yaşlandırma İşlemi

Şekil 2.17’de görüldüğü üzere solüsyona alma işleminde sonra su verme işlemi sonucunda yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Sabit bir sıcaklıkta yapılan ikinci işlem olan yaşlandırmada, çökelti parçacıkları önce çekirdeklenir ve daha sonra büyür (Şekil 2.19). Çökelti parçacıklarının sıcaklık ve yaşlandırma süresi ile değişimi Şekil 2.20’de verilmiştir. Parçacıkların boyutu ve buna bağlı olarak elde edilen dayanım, sertlik ve süneklik bu işlem süresine bağlı olarak değişir.



Şekil 2.19. Al-Cu faz diyagramı ve Al-%4 Cu alaşımının çözeltiye alma işlemi, su verme ve çökelme sertleşmesi safhalarında mikro yapı değişimleri (Askeland,1998)

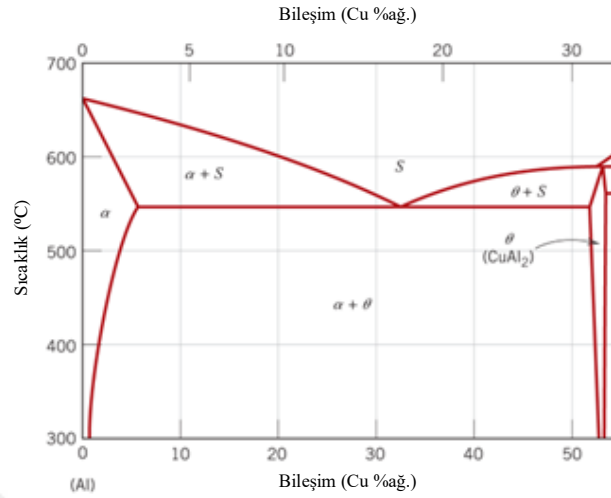


Şekil 2.20. Yaşlandırma ısıl işlemi aşamaları ve mikro yapıları (Askeland,1998)

Matriste çökelti oluşturmanın temel amacı çözünen atomların mikro veya nano boyutlarda uyumlu bir topluluk oluşturmasını sağlamaktır.

Bu oluşum ile bir araya toplanan çözünen atomlar bir taraftan matris kristal yapısına uyum gösterirken atom boyutları arasındaki farktan dolayı büyük miktarda gerilme meydana gelir. Çökeltilerin gerilme alanının varlığı malzemede dislokasyon hareketine engel olacağından malzemeye daha fazla mekanik dayanım (UTS, YS ve sertlik) değerleri kazandırır. Şekil 2.21'de Al-Cu alaşım örneğinde gösterildiği üzere, α Cu'nun Al içinde yaptığı yer alan katı çözeltilisini temsil ederken θ ise CuAl₂ intermetalini temsil eder. Ağırlıkça %4 Cu içeren Al alaşımını incelendiğinde denge halindeki θ fazının çökelme sertleştirme işlemindeki gelişimi sırasında geçiş fazları bir sıra dahilinde

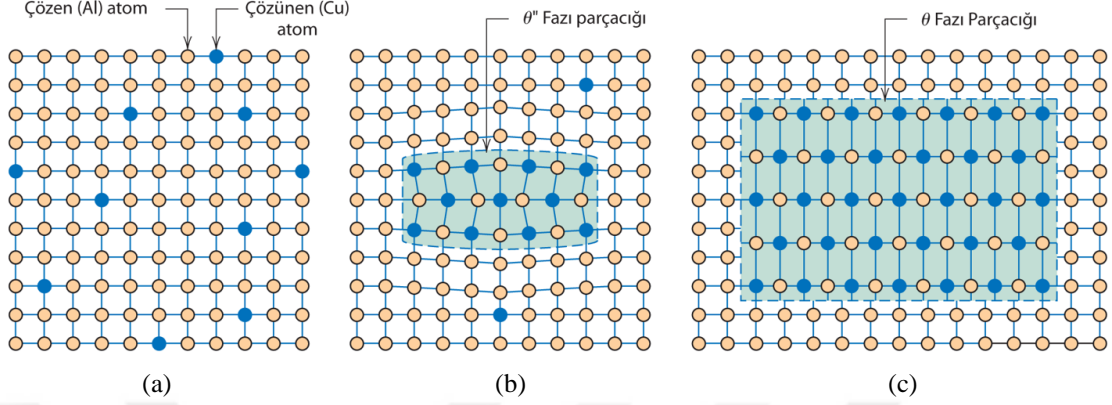
oluşmaktadır (Callister ve ark., 2007). Alaşımın mekanik davranışı bu geçiş fazlarının morfolojisine ait özelliklerinden etkilenir.



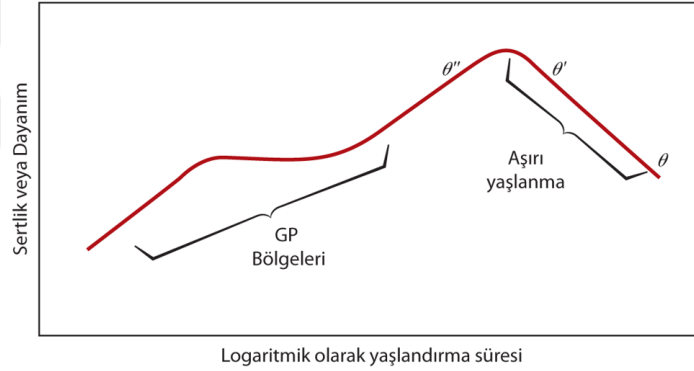
Şekil 2.21. Al-Cu faz diyagramı (Callister ve ark., 2007)

Sertleşmenin ilk kademelerinde Cu atomları α katı çözeltili çözeltilisi içindeki birçok noktada olmak üzere, nano boyutlarda diskler halinde kümelenir. Bu atom toplulukları genellikle Guiner-Preston (GP) bölgeleri olarak isimlendirilir. Çok küçük boyutta oldukları için çökeltiler olarak tanımlanmaz. Ancak, Cu atomlarının zamanla yayılmasıyla bu atom topluluklarının boyutu da büyür. Bunlar, kristal yapı oluşturarak faz çökeltileri haline gelirler. Çökelen parçacıklar Şekil 2.22'de gösterilen θ kararlı fazı yapısına dönüşmeden önce, sırasıyla θ' ve θ'' olarak gösterilen iki geçiş fazını oluşturur. Bu şekildeki dönüşümle oluşan çok sayıdaki yarı-kararlı parçacığın alaşımın dayanım artışı ve sertleşmesi üzerindeki etkileri Şekil 2.23'de gösterilmiştir. Dikkat edileceği gibi, en yüksek dayanım değerleri θ'' fazı oluşumuna karşılık gelmekte olup, bu yapı, alaşım oda sıcaklığına soğutulduğunda da korunmaktadır. Çökelti oluşumu tamamen dengeli bir yapı oluşturduğunda mikro yapıda önemli bir değişim olmadan ürettikleri geniş bir deformasyon ve dislokasyon hareketlerini kısıtlayan gerilme alanlarının oluşturmalarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerini artırır. Isıl işlem süresi gereğinden fazla uzadığında veya sıcaklık arttığında çökeltilerin boyutları ve dağılımı ideal olmaktan çıkarak komşu çökeltilerde birleşerek büyürler. Çökeltilerin aşırı derecede büyümesinden, çökeltiler arası mesafe artar ve bu durumda oluşan çökeltiler arası mesafe dislokasyon hareketlerini yeterince engelleyemeyeceğinden mekanik dayanımda

düşüşlere neden olur. Aşırı yaşlanma olayı, parçacıkların yaşlandırmak işlemi sırasında büyümesi ve buna bağlı olarak θ' ve θ fazlarının oluşması neticesinde gerçekleşir.



Şekil 2.22. Yaşlandırma sürecindeki çeşitli ara durumların gösterimi; aşırı doymuş α katı çözeltisi (a), Çökelmiş θ'' geçiş fazı (b), α matris fazı içinde çökelmiş θ' kararlı fazı (c) (Callister ve ark., 2007)



Şekil 2.23. Yaşlanma süresine bağlı olarak malzemenin sertlik veya mukavemetindeki değişimin şematik gösterilişi (Callister ve ark., 2007).

2.2 Akıllı Bomba Güdüm Kitleri

Al alaşımları, özellikle havacılık, uzay, otomotiv, savunma sanayinde kritik bir rol oynar. Savunma sanayi sektörü dikkate alındığında, döküm Al alaşım parçalarının tüm güdüm kitlerinde kullanıldığı görülmektedir.

Türk Silahlı Kuvvetlerinin kullandığı Mark serisi bombalarda herhangi bir cruise control ya da seyrü sefer sistemi bulunmamaktadır. Hedefi vurma kabiliyetleri uçaktan bırakıldıkları andaki pilotun tecrübesine, uçağın hızına, yerden yüksekliğe ve hava akımı gibi faktörlere bağlıdır. Bu bombalara gerekli olan yönlendirme özelliğini kazandırabilmek için güdüm kitleri geliştirilmiştir.

Güdüm kitlerindeki mekanik parçalar; haddeleme, dövme veya döküm

teknolojileri ile üretilmiş malzemelerin, talaşlı imalata tabi tutulmasıyla elde edilmektedir. Savunma sanayinde dökülebilme, kaynak yapılabilme, basınç ve korozyon dirençleri nedenleriyle üstün özelliklere sahip ve ısı işlem ile mekanik özelliklerinin artırılabilmesi nedenlerinden dolayı A356, A357, 6061, 7075 vb. Al alaşımları, karmaşık ve ters açılı yapısal unsurlu füze güdüm kitleri gövde parçalarının alçak basınç döküm yöntemi ile imalatında tercih edilmektedir.

Şekil 2.24'te hassas güdümlü bomba kiti (HGK), kanatlı güdüm kiti (KGK) ve Şekil 2.25'te lazer güdümlü bomba kiti (LGK), TEBER güdüm kitlerine ait görsel şekiller verilmiştir. Mevcut durumda kullanılan güdüm kitlerine ilişkin teknik bilgi Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Güdüm kitine sahip bazı mühimmatların genel ve teknik özellikleri (Tübitak, 2023)

Cinsi	Genel Özellikler	Teknik Özellikler
HGK-82	500 lb. MK-82 genel maksat bombalarını ANS/KKS güdümlü mühimmata dönüştürerek kritik düşman hedeflerinin yüksek hassasiyette vurulmasını sağlar. <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek hassasiyet ile vuruş kabiliyeti • Her hava şartında kullanılabilme • Tümüleşik KKS/ANS navigasyon • At unut konsepti ile çalışabilme • Fırsat hedeflerine taarruz 	<ul style="list-style-type: none"> • Menzil : 28 km • İrtifa : 0- 40.000 ft (MSL) • CEP : < 10 metre • Güdüm : ANS/KKS • Ağırlık (Bomba dahil) : 262 kg • Uzunluk : 2.587 mm
HGK-84	2000 lb. sınıfı (MK-84, MK- 84-T, NEB ve NEB-T harp başlıkları) genel maksat bombalarını ANS/KKS güdümlü mühimmata dönüştürerek kritik düşman hedeflerinin yüksek hassasiyette vurulmasını sağlar. LAB kullanılması durumunda hareketli hedeflere karşı da etkin kullanılabilir. <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek hassasiyet ile vuruş kabiliyeti • Her hava şartında kullanılabilme • Tümüleşik KKS/ANS navigasyon • Fırsat hedeflerine taarruz • At unut konsepti ile çalışabilme (LAB'sız kullanım durumunda) • Hareketli hedeflere karşı etkin (LAB'lı kullanım) 	<ul style="list-style-type: none"> • Menzil : 28 km • İrtifa : 0- 40.000 ft (MSL) • CEP : <10 metre (LAB'lı <3 metre) • Güdüm : KKS / ANS/ Lazer • Ağırlık (Bomba dahil) : 982 kg • Çap : 561 mm • Uzunluk : 38.1 mm
LGK	250 lb - MK-81, 500 lb - MK-82, 1000 lb - MK-83 ve 2000 lb - MK-84 bombalarını maliyet etkin ve yüksek güvenilir akıllı mühimmata dönüştüren lazer güdüm kitidir. LGK sabit/hareketli hedeflere karşı daha yüksek vuruş hassasiyeti ve atış sonrası hedef değiştirme kabiliyeti sağlar. Mühimmat hedeften yansıyan lazer enerjisine güdümlenir. <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek yerlilik oranı ile kritik tüm alt bileşenler yerleştirilmiş maliyet etkin bir çözüm, • Sabit/hareketli hedeflere karşı yüksek vuruş hassasiyeti ve daha düşük ikincil hasar, • Atış sonrası hedef değiştirme kabiliyeti • Farklı tip mühimmatlara kolay uyumlandırılabilme • Elektriksel ara yüz bulunmaması avantajı ile hızlı platform entegrasyonu 	<ul style="list-style-type: none"> • Menzil : 6,5 NM (12 km) • İrtifa : 0 - 40.000 ft MSL • Taşıma/Bırakma Hız Limiti : 1.2 Mach • Vuruş Hassasiyeti : < 30 ft (10m) • Görüş Açısı : ±16°

TEBER GÜDÜM KİTİ	<p>MK-81 ve MK-82 Genel Maksat Bombaları'nın vuruş kabiliyetinin artırılması amacıyla entegre edilen bir yüksek hassasiyetli güdüm kitidir. TEBER, Genel Maksat Bombaları'nı AÖB, KKS ve aktif LAB kullanarak akıllı bir silah sistemi hâline getirmektedir.</p> <p>Teber sabit hedeflerin yanı sıra hareketli hedefler karşısında da yüksek hassasiyette vuruş kabiliyeti getirmektedir. Teberin yaklaşma sensörü opsiyonu da mevcuttur.</p>	<p>Uzunluk : 2,1 m (TEBER-81) 2,6 m (TEBER-82)</p> <p>Ağırlık : ~ 155 kg (TEBER-81) ~ 270 kg (TEBER-82)</p> <p>Menzil : 2-28 km</p> <p>Güdümlü : AÖB KKS LAB</p> <p>Harp Başlığı Tipi : MK-81 / MK-82</p> <p>Yaklaşma Sensörü : 2-15 m</p> <p>Doğruluk (CEP) : < 3 m</p>
-------------------------	---	---

Ataletsel Navigasyon Sistemi (ANS), Küresel Konumlama Sistemi (KKS), Lazer Arayıcı Başlık (LAB), Nüfuz Edici Bomba (NEB), Mark serisi (MK), Deniz Seviyesi (Mean Sea Level(MSL))

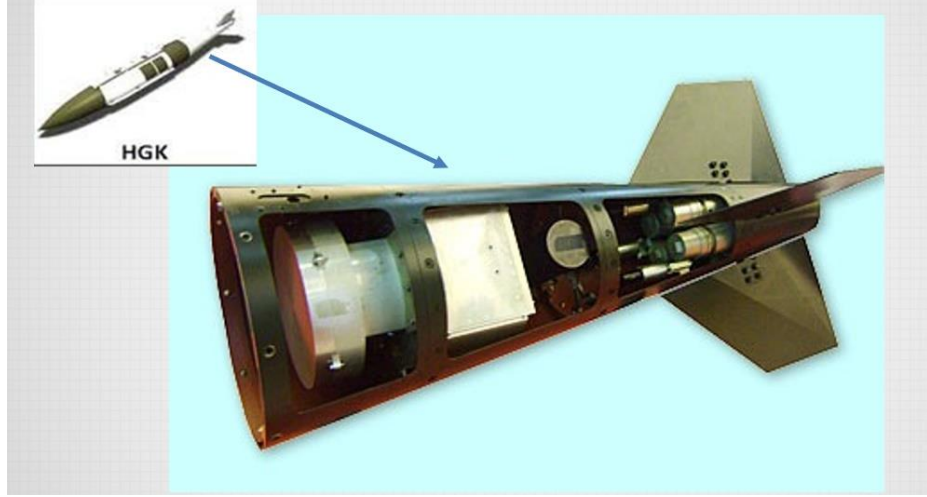


Şekil 2.24. Hassas güdümlü bomba kiti (HGK) (a), Kanatlı güdümlü bomba kiti (KGK) (b) (Tübitak, 2023)



Şekil 2.25. Lazer güdümlü bomba kiti (LGK) (a), TEBER güdümlü bomba kiti (b) (Tübitak, 2023)

Şekil 2.26'da A357 Al alaşımı döküm parçalarının birleşimi ile ortaya çıkan HGK güdümlü bomba kiti görseli verilmiştir.



Şekil 2.26. HGK güdümlü füze

2.3 Makine Öğrenmesi (ML)

Makine öğrenmesi, bilgisayarların örnek veri ya da geçmiş deneyim üzerinden çıkarımlar yaparak başarımlarını artıracak biçimde programlanmasıdır. Bu teknoloji, günümüzde birçok farklı ML yönteminin geliştirilmesine olanak tanımıştır (Wei ve ark., 2019).

Makine öğrenme yöntemleri genellikle gözetimli ve gözetimsiz olarak iki ana kategoriye ayrılır.

Gözetimli öğrenme, önceden gözlenerek sonuçları bilinen (etiketlenmiş) verilerden yararlanarak bu verilere ve sonuçlara dayalı bir fonksiyon oluşturmasıdır (Bishop, 2006) (Nizam ve Akın, 2014). Bu öğrenme türünde, her bir giriş değeri ile birlikte bir çıkış değeri de sisteme tanıtılır. Sistem eğitim sürecinde, veri setindeki her bir örneğe ait giriş ve çıkış değerleri kullanılır. Örneğin, metin sınıflandırma çalışmalarında metin içeriği giriş verisi olarak kullanılırken, çıkış olarak metne ait kategori belirlenebilir. Sistemin performansını değerlendirmek için test veri seti kullanılır. Eğitim işlemi sonucu elde edilen model ile daha önceden hiç görülmemiş test verilerinin etiket değerleri tahmin edilir ve test verisine ait gerçek etiketler ile karşılaştırılarak sistemin performansı ölçülür. (Bishop, 2006) (Kotsiantis, 2007). Gözetimli öğrenmesi yöntemleri genellikle tahmin veya sınıflandırma gibi bir çıktı üretir. Eğer çıktı kategorik ise, bu yönteme sınıflandırma (classification) denir; eğer çıktı nümerik ise, bu yönteme regresyon (regression) adı verilir.

Gözetimsiz öğrenme ise, etiketlenmemiş veri kümeleri üzerinde çalışan makine öğrenmesi algoritmalarıdır. Amaç, veriler arasındaki gizli bağıntıları ve yapıları

keşfetmektir Gözetimsiz öğrenme yöntemlerinde, istenilen çıktı değeri sisteme önceden tanıtılmaz (Bishop, 2006) (Nizam ve Akın, 2014). Benzer gözlemleri aynı gruplara veya kümeye atama işlemi olan kümeleme, algoritmaları, gözetimsiz öğrenmeye örnek verilebilir.

2.3.1 Gözetimli Öğrenme

Gözetimli öğrenme, bilinen girdi (x) ve çıktı (y) değerli bir set ile algoritmanın daha önce hiç görmediği ve eğitimde kullanılmayan yeni verilere en uygun çıktıları tahmin etmek için kullanılan bir makine öğrenmesi modelidir.

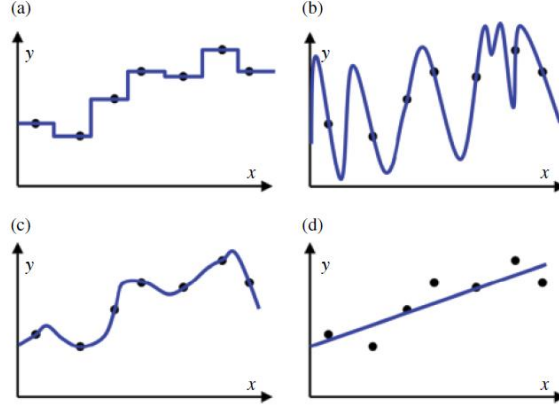
Bilinen x ve y verileri gözlemler veya kontrollü deneyler aracılığıyla oluşturulabilir. İzin verilen çıktı değerleri y sürekli bir aralık oluşturuyorsa (örn. erime noktaları, deformasyon hızı vb.), bu fonksiyon süreci regresyon olarak adlandırılır. İzin verilen çıktı değerleri birbirinden farklı ayrık küme oluşuyorsa (örn. uzay grupları), süreç sınıflandırma olarak adlandırılır.

Hipotez uzayı, öğrenme algoritması tarafından değerlendirilebilecek tüm fonksiyonları içerir. Bu değerlendirme sırasında tahmin edici fonksiyonu belirlemek için, bazı fonksiyonları doğrudan dışlamaya veya bazı fonksiyonlara diğerlerinden daha fazla ağırlık veren bir hipotez uzayı kullanmak gereklidir.

Hipotez uzayında gözlemlenen tüm girdi değerleri için gözlemlenen çıktı değerlerini mükemmel bir şekilde haritalayan bir fonksiyonun olmadığı durumlar olabilir. Bu durumlar bazı nedenlerin kombinasyonu için gerçekleşebilir:

- Hipotez uzayı, girdi değerlerini çıktı değerlerine mükemmel bir şekilde haritalayan fonksiyonu dışlayacak şekilde sınırlanmıştır. Örneğin, hipotez uzayı yalnızca doğrusal fonksiyonları içerecek şekilde sınırlanmış olabilir, ancak girdi değişkenlerinin hiçbiri gözlemlenen çıktı değerlerini çoğaltamaz. Aynı eğitim verileri kümesine (siyah noktalar) uyan dört farklı fonksiyonda (mavi çizgiler) Şekil 2.27 (a-c) verileri yeniden üretir ve Şekil 2.27 (d) oluşturmaz
- Gözlemlenen çıktı değerleri, içsel olarak belirsiz olan bir sürecin sonucudur.

Doğru çıktı değerlerini hesaplarken ilgili olan bazı girdi verileri eksik ve/veya bilinmemektedir.



Şekil 2.27. Aynı eğitim verileri kümesine (siyah noktalar) uyan dört farklı fonksiyonda (mavi çizgiler) (a), (b) ve (c) verileri yeniden üretir ve (d) oluşturmaz (Bishop, 2006)

Bu durumlarda, hipotez uzayındaki herhangi bir fonksiyon, tahmin edilen değerlerde bazı hatalara neden olacaktır. Bu hatayı hesaba katmak için çıktı değerleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$y = f(x) + E \quad (1)$$

burada f , hipotez uzayında bulunan bir fonksiyondur ve E rastgele bir hata olarak adlandırılır. E 'nin çekildiği olasılık dağılımı g ile temsil edilirse, başka bir deyişle, $g(a)$, $y - f(x) = a$ olduğunda olasılık yoğunluğudur. Dağılım g , girdi verilerine bağlı olabilir, ancak basitlik için genellikle bağlı olmadığını varsayılır. Genel olarak hem fonksiyon f hem de olasılık dağılımı g bilinmemektedir.

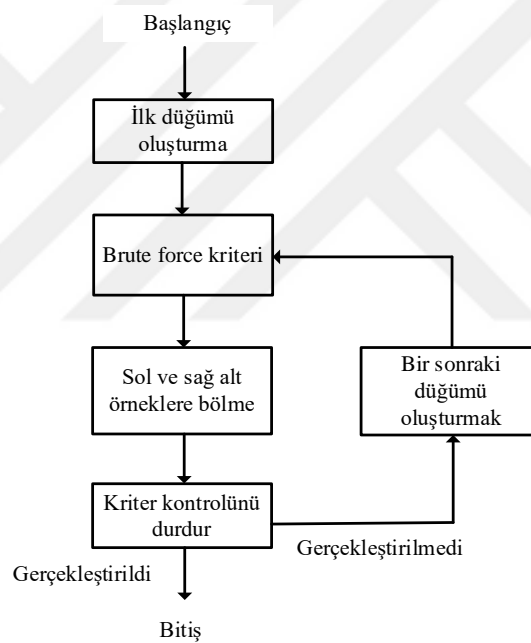
Malzeme bilimi açısından gözetimli öğrenme ele alındığında karar ağaçları, SVM ve KNN yöntemlerinin en yaygın kullanıldığı görülmektedir (Liu ve ark., 2017) (Bock ve ark., 2019).

2.3.1.1 Karar Ağaçları

Gözetimli öğrenme tahmin yöntemlerinden yaygın kullanılanlardan birisi de Karar Ağaçlarıdır. Bu yöntem, olası sonuçları ve olay sonucunu tahmin etmek ve değerlendirmek için bir karar modeli kullanmaktadır (Bishop, 2006).

Karar ağacı tekniği, verinin sınıflandırılması için iki aşamalı bir işlemi içerir: öğrenme ve sınıflama. Öğrenme aşamasında, önceden bilinen eğitim verisi sınıflama algoritması tarafından analiz edilerek bir model oluşturulur. Oluşturulan model, sınıflama kuralları veya bir karar ağacı olarak ifade edilir. Sınıflama aşamasında test verisi,

sınıflandırma kurallarının ve/veya karar ağacının doğruluğunu kontrol etmek için kullanılır. Eğer doğruluk kabul edilebilir seviyede ise, kurallar yeni verilerin sınıflandırılması için kullanılır. Şekil 2.28'de örnek bir karar ağacı öğrenme algoritmasının akış diyagramı gösterilmiştir (Peng ve ark., 2012). Karar ağacı ile sınıflandırma, tümevarımsal bir yaklaşımla bilgi öğrenmeyi hedefler. Örneklerin özelliklerine göre arama yaparak ve verilen örnekleri en iyi şekilde sınıflandırmaya çalışır. En iyi şekilde sınıflandırıldığında işlem sona erer. Ancak uygun bir sınıflandırma yapılmadığında, bir özelliğe ait olası değerlerin miktarı kadar bölümlere ayrılmış alt kümeler üzerinde işlemler tekrar edilir. Bu algoritmada, en iyi değerler seçildiğinden önceki seçimleri yeniden değerlendirmeye almaz bu da bazı hatalı sınıflandırmalara neden olabilir. Karar ağacının temel işlevi, ağaçtaki her düğümü test ederek özellikleri belirlemektir (Bishop, 2006).

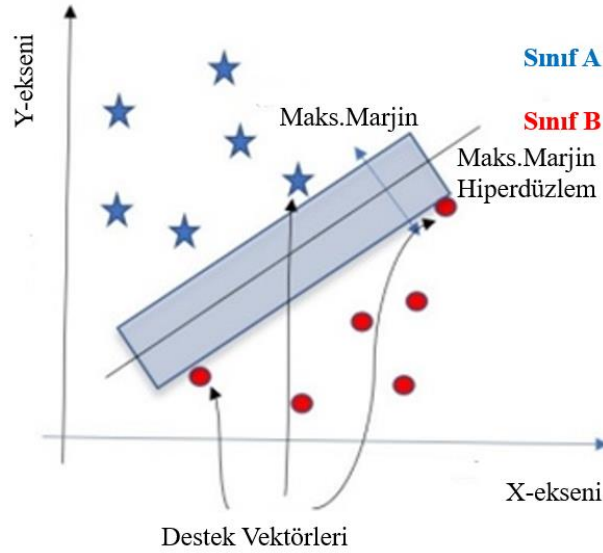


Şekil 2.28. Karar ağacı öğrenme algoritması

2.3.1.2 Destek Vektör Makineleri (SVM)

Destek Vektör Makineleri, denetimli makine öğrenimi algoritmaları arasında yer alan bir sınıflandırma yöntemidir ve istatistiksel öğrenme kavramına dayanır. SVM, daha çok büyük veri setleriyle kullanılan en hızlı ve verimli algoritmalarından biridir. SVM, regresyon, el yazısı tanıma ve sınıflandırma gibi makine öğrenimi alanına giren çeşitli problemlerin çözümünde başvurulan yöntemlerden biridir (Zhou ve ark., 2018).

SVM'nin temel prensibi, karar sınırlarını belirleyerek, noktalar arasında en iyi ayrımı sağlayan çizgiyi seçmektir. En iyi çizgi, Şekil 2.29'da gösterildiği gibi noktalardan mümkün olan en uzak çizgidir.



Şekil 2.29. Destek vektör makinesi sınıflandırma (Al-Azzawi, 2021)

SVM, başlangıçta nispeten düşük boyutlu verilerle çalışır, bu verileri daha yüksek boyutlara dönüştürür ve sonuç olarak yüksek boyutlu verileri iki kategoriye ayıran bir çizgi bulur. Bu çizgiye, kenardaki ve içerideki gözlem noktaları nedeniyle destek vektör sınıflandırıcısı veya kısaca destek vektörleri adı verilir. Marjin, gözlem ve sınıflandırma eşiği arasındaki mesafeyi ifade eder. Marjin ne kadar geniş olursa, sınıflandırıcının genelleme hatası o kadar az olacaktır (Hastie ve ark., 2001).

Gola ve ark. (2019) çalışmasında piksel tabanlı ve morfoloji tabanlı parametrelerle bir SVM kullanarak mikroyapı görüntülerine dayalı güvenilir bir sınıflandırmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Parametreleri belirlemek için korelatif mikroskopi, farklı çelik mikroyapıları hakkında geniş bir bilgi toplamak için bu yöntemin kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

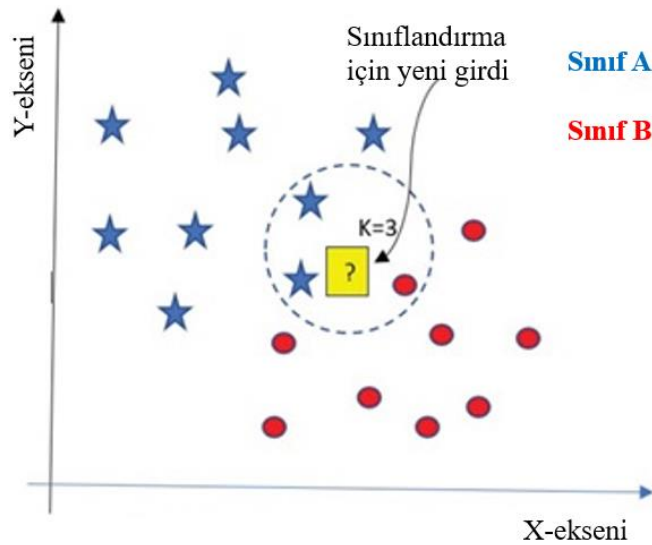
2.3.1.3 K-En Yakın Komşu (KNN) Algoritması

K-en yakın komşu algoritması, gözetimli makine öğrenmesi algoritmaları arasında en yaygın kullanılanlar arasında yer alır ve hem sınıflandırma hem de regresyon

görevlerinde kullanılır. KNN, örnek tabanlı bir sınıflandırma tekniğidir ve eğitim verisini özetlerken herhangi bir soyutlama yapmaz.

Bu algoritmanın temel çalışma prensibi, bir mesafe veya benzerlik fonksiyonu yardımıyla bilinen örneklerle bilinmeyen bir örneği ilişkilendirmektir. KNN'de, sınıflandırma için gelen yeni girdi verisinin, eğitim kümesinde olan tüm diğer girdilere olan mesafesi hesaplanır. Kendisine en yakın k tane girdi komşu olarak seçilir. Bu k komşunun, sınıf değerlerine bakılır. Hangi sınıfa ait komşu sayısı daha fazla ise, yeni girdinin sınıfı da o olur. Regresyon problemlerinde ise, k adet komşunun çıkışının ortalaması genelde yeni girdinin çıkışı olarak döndürülür. Şekil 2.30'da yeni girdinin 3 komşusundan 2 tanesi A sınıfı, bir tanesi B sınıfına ait olduğu için yeni girdi A sınıfı olarak etiketlenir.

KNN'nin anlaşılması kolaydır, çünkü özellik-benzerlik yaklaşımına dayanır. Yeni veriler, sınıflandırıcıyı yeniden eğitmeden, en yakın komşu olarak kabul edilen k 'ye bağlı olarak belirli bir sınıfa atanır. Yeni veri için en yakın komşular, Şekil 2.30'de gösterildiği gibi mesafe ölçümüyle bulunur. Bu mesafeler Öklid, Hamming, Manhattan ve Minkowski gibi çeşitli uzaklık metrikleriyle ölçülebilir.



Şekil 2.30. K-En yakın komşu algoritması sınıflandırma (Al-Azzawi., 2021)

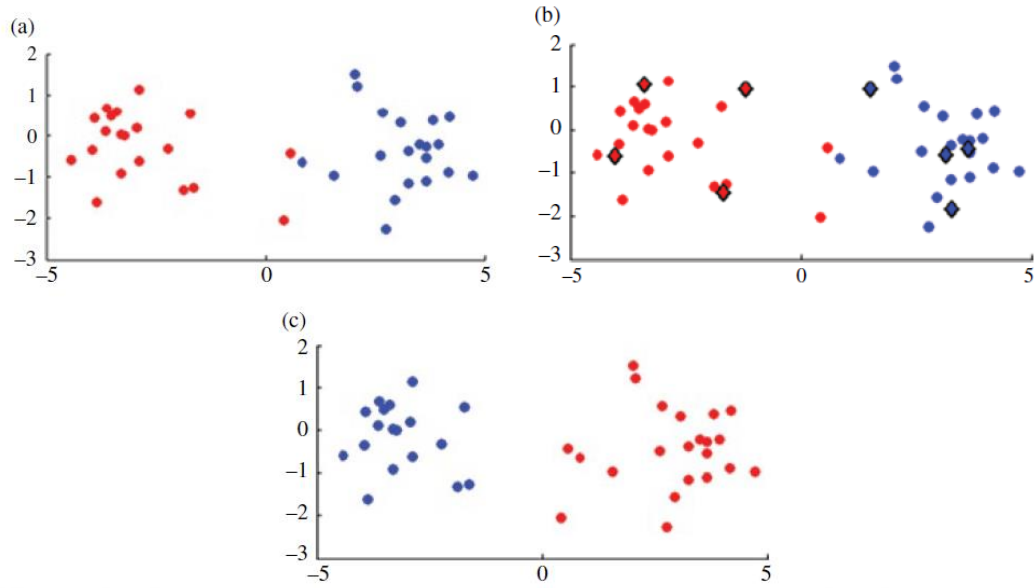
Yüksek hassasiyetli makine öğrenimi tekniklerinin malzeme bilimi alanına tanıtılmasından sonra yeni malzemelerin keşfi artmıştır. (Liu ve ark., 2017) (Bock ve ark., 2019). Birçok araştırmacı, farklı malzemelerin özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin etmek için veri analizi tekniklerini kullanmıştır, araştırmalarda, yapay sinir ağı (YSA) ve

K-en yakın komşu (KNN) algoritması kullanarak mukavemet özellikleri (UTS, YS ve sertlik gibi) tahmin etmek için bir metodoloji geliştirilmiştir (Liu ve ark., 2017) (Bock ve ark., 2019).

2.3.2 Gözetimsiz Öğrenme

Gözetimli öğrenme, giriş verilerini (x) karşılık gelen bir çıkış değeri (y) ile eşleyen fonksiyonu (f) bulmaya odaklanırken, gözetimsiz öğrenme giriş verileri x arasındaki ilişkiyi bulmayı amaçlar. Başka bir deyişle, gözetimli öğrenme, x ve y arasındaki ilişkiyi koşullu yoğunluk $P(f | x, y, g)$ üzerinden belirlemeye çalışırken, gözetimsiz öğrenme, ortak marjinal yoğunluk $P(x)$ özelliklerini belirlemeye çalışır.

Temel bir örnek ile açıklamak gerekirse: 20 veri noktası iki Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonundan (PDF) çekilir ve her biri birim standart sapmada, biri $(-3, 0)$ noktasında diğeri $(3, 0)$ noktasında merkezlenir (Şekil 2.31 (a)). Noktalar, kaynak PDF 'lerini belirlemek için renkli kodlanır. Her bir PDF 'den dört ek nokta (baklava şekiller) çekilir ve uygun şekilde etiketlenir (y değerleri verilir). Diğeri veri noktaları hangi PDF 'den geldiklerine göre sınıflandırılması istendiğinde bu görevi gerçekleştirmek için birçok denetimli öğrenme sınıflandırma algoritması kullanılabilir, elde edilen renk kodlaması Şekil 2.31 (b) 'de gösterilmiştir. Burada SVM yöntemi kullanılmıştır ve sonuçların gerçek etiketlerle iyi bir eşleşme olduğu görülmektedir. K-ortalamalar gözetimsiz öğrenme algoritması uygulandığında Şekil 2.31 (c)'de görülen sonuçlar elde edilir (Bishop, 2006).



Şekil 2.31. Birim standart sapması ve ortalamaları -3 ve 3 olan iki Gauss PDF'sinden oluşturulan veri noktaları (a). Baklava desenleriyle gösterilen dört etiketli noktaya sahip SVM kullanılarak yapılan sınıflandırma sonuçları (b). Sonuçların k-ortalamlarla kümelenmesi (c).

2.3.3 Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları (YSA)

Bulanık mantık ve YSA gibi yeni nesil yöntemler son yıllarda malzeme biliminde karar vermede kullanılan metotlar arasındadır (Chukwuma ve ark., 2024).

2.3.3.1 Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık Kavramları

Zadeh (1965) tarafından ilk olarak tanımlanan bulanık mantık, bir karar verme ve kontrol sistemi olarak özetlenebilir. Bu kavram, temelde sözel ifadelerin ve bu ifadeler arasındaki mantıksal ilişkilerin üzerine kurulmuştur. Sözel ifadeler aslında matematiksel bir temele dayanmaktadır, bu temel ise bulanık küme teorisi ve bulanık mantık olarak bilinir. Bulanık mantık, geleneksel mantıkla farklı olarak yalnızca 0 veya 1 gibi iki seviyeli değil, $[0,1]$ aralığında çok seviyeli işlemlerin ifadesinde kullanılır.

Klasik mantık düşünme biçimi, bir elemanın bir kümeye ya ait olup olmadığını belirtir. Bu yaklaşım, Aristoteles Mantığı, Klasik Mantık veya İkili Mantık gibi isimlerle anılır. Bu düşünce yapısında, bir önerme ya doğrudur (1) ya da yanlıştır (0) şeklinde ifade edilir. Bu temel, günümüz bilgisayar sistemlerinin de altyapısını oluşturur (ikili-binary-sistem). Ancak bulanık mantık, bir elemanın birden fazla kümeye ait olabileceğini kabul eder. Bulanık mantık, sadece doğru ile yanlış arasında değil, aynı zamanda ara değerlerde bir geçiş sağlar. Bu durum, bazı durumların ikili mantık yerine çok değerli mantıkla ele alınmasını gerekli kılar. Zadeh (1965), çok değerli mantık değer kümesini $[0,1]$ aralığında

tanımlayarak, ortaya koyduğu teoriye Bulanık Mantık Teorisi adını vermiştir. Karmaşık sistemlerde, lineer olmayan sistemlerde ve yüksek belirsizlik içeren durumlarda, bulanık mantık sistemleri ideal olarak kullanılır. Bu sistemler, insanların kullandığı gibi "sağduyu" benzeri bir yaklaşımla işlemleri gerçekleştirebilir, hatta yetersiz bilgiye rağmen etkili sonuçlar elde edebilirler.

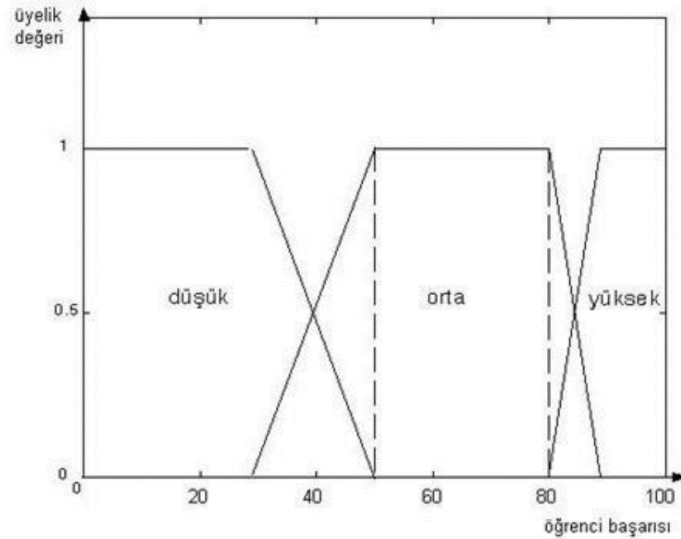
2.3.3.2 Bulanık Kümeler ve Üyelik Fonksiyonları

Klasik küme yaklaşımında bir eleman bir kümeye aittir ya da değildir. Bu fonksiyon olarak $\mu_A: X \rightarrow \{0,1\}$ biçimde ifade edilir. Bulanık kümelerde ise bir elemanın kümeye ait olup olmadığı üyelik dereceleri ile ifade edilir. Bulanık küme, değişik üyelik seviyelerinde öğeleri olan bir topluluktur.

Örnek olarak; bulanık A kümesi, "A={0'a yakın reel sayılar}" olarak tanımlandığında, üyelik fonksiyonu $\mu_A(x) = \frac{1}{1+x^2}$ olması durumunda 0 sayısı A kümesinin bir elemanıdır ve üyelik derecesi 1'dir. Ancak 1 sayısının 0'a yakın reel sayılar kümesine üyelik derecesi, tanımlanan üyelik fonksiyonu kullanılarak 0,5 olarak bulunur ($\mu_A(0) = \frac{1}{1+0^2} = 1, \mu_A(1) = \frac{1}{1+1^2} = 0,5$).

Klasik küme kuramındaki kesin ayırım var iken bulanık küme yaklaşımında bulunmaz. Bulanık kümelerde eleman, bir bölümüyle (örn.: 0.4) kümeye ait iken bir bölümüyle (örn.: 0.6) de kümenin dışındadır. Bulanık kümelerde, klasik kümelerdeki üyeliği tanımlayan karakteristik fonksiyon $\mu_A: E \rightarrow \{0,1\}$, yerini üyelik fonksiyonuna $\mu_A: E \rightarrow [0,1]$ bırakır.

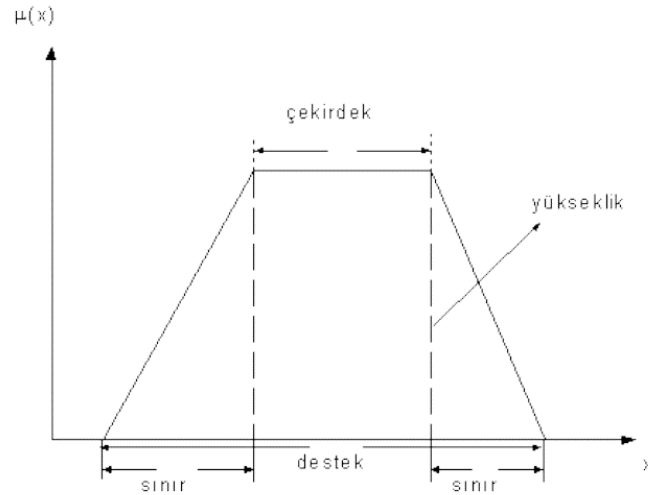
Şekil 2.32'de yamuk biçimindeki üyelik fonksiyonları kullanılarak bir uygulama gerçekleştirilmiş ve öğrenci başarısı için örnek bulanık küme gösterimi verilmiştir (Kruse ve ark, 1994). Orta-düşük ve orta-yüksek geçişlerinde paylaşım bölgesi söz konusu olup katı bir ayırım geçerli değildir.



Şekil 2.32. Öğrenci başarıları için bulanık küme gösterimi (Tütmez, 2008)

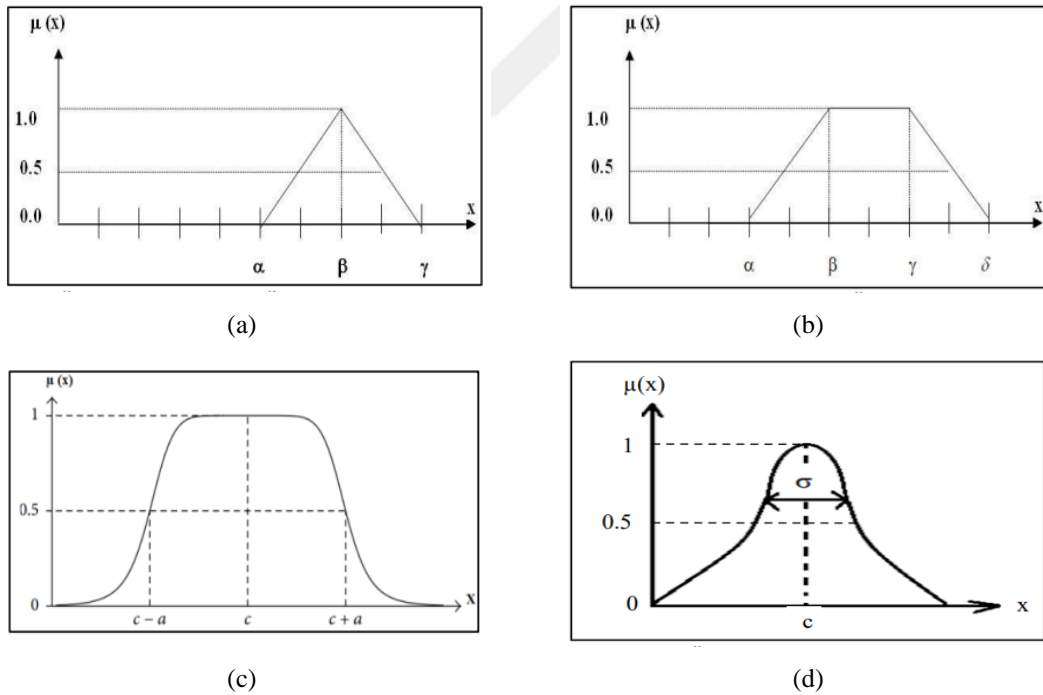
Üyelik fonksiyonu seçiminde özellikle “basitlik ve amaca uygunluk” en önemli parametrelerdir. Sürekli ve kesikli fonksiyonlarda değişmeyen yapısal parçalar; çekirdek (core), destek (support), yükseklik (height) ve sınır (boundary) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.33). Çekirdek, üyelik fonksiyonun 1’e eşit olduğu bölgedir ($\mu_A(x) = 1$) ve bu bölgede fonksiyon tam üyeliğe (full membership) sahiptir. Fonksiyonun 0’dan büyük olan ($\mu_A(x) > 0$) kısmı Destek bölümüdür. Tam üyeliğe ulaşamamış fonksiyonun iki yanında yer alan sınırlar, 0 ile 1 arasında üyelik değeri alan ($0 < \mu_A(x) < 1$) kısımları tanımlar.

Uygulamada yaygın olarak; Üçgen (triangular), Yamuk (trapezoidal), Normal dağılım (Gaussian) ve Çan şekilli (bell-shaped) fonksiyonlarından yararlanılmaktadır. Ayrıca, sigmoidal ve S-tipi üyelik fonksiyonları da kullanım amacına bağlı olarak sınırlı oranda kullanılabilirlerdir.



Şekil 2.33. Üyelik fonksiyonları bileşenleri (Tütmez, 2008)

Üçgen, yamuk, genelleştirilmiş çan eğrisi ve Gauss üyelik fonksiyonlarına ait matematiksel denklemler sırası ile Denklem (2), Denklem (3), Denklem (4), Denklem (5)'te ve görseller Şekil 2.34'te sunulmuştur (Passino ve Yurkovich, 1998).



Şekil 2.34. Üçgen üyelik fonksiyonu (a), Yamuk üyelik fonksiyonu (b), Genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonu (c) ve Gauss üyelik fonksiyonu (d) (Passino ve Yurkovich, 1998)

Denklem (2): Üçgen (Triangular) Üyelik Fonksiyonu

Fonksiyon $\Lambda: x \rightarrow [0,1]$ $x: X$ evreninde herhangi bir eleman

$$\Lambda(x; \alpha, \beta, \gamma) = \left\{ \begin{array}{l} 0, x < \alpha \\ \frac{(x - \alpha)}{(\beta - \alpha)}, \alpha \leq x \leq \beta \\ \frac{(\gamma - x)}{(\gamma - \beta)}, \beta \leq x \leq \gamma \\ 0, x > \gamma \end{array} \right\} \quad (2)$$

Denklem (3): Yamuk (Trapezoidal) Üyelik Fonksiyonu

Fonksiyon $\pi: x \rightarrow [0,1]$

$$\pi(x; \alpha, \beta, \gamma, \delta) = \left\{ \begin{array}{l} 0, x < \alpha \\ \frac{(x - \alpha)}{(\beta - \alpha)}, \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, \beta \leq x \leq \gamma \\ \frac{(\delta - x)}{(\delta - \gamma)}, \gamma \leq x \leq \delta \\ 0, x > \delta \end{array} \right\} \quad (3)$$

Denklem (4): Genelleştirilmiş Çan Eğrisi (Generalized Bell-Shaped) Üyelik Fonksiyonu

Fonksiyon $\Omega: x \rightarrow [0,1]$

b : fonksiyonun tavan genişliğini etkileyen parametredir.

$$\Omega(x; a, b, c) = \left\{ \frac{1}{1 + \left| \frac{(x - c)}{a} \right|^{2b}} \right\} \quad (4)$$

Denklem (5): Gauss Üyelik Fonksiyonu

Fonksiyon $\mathbf{G}: x \rightarrow [0,1]$

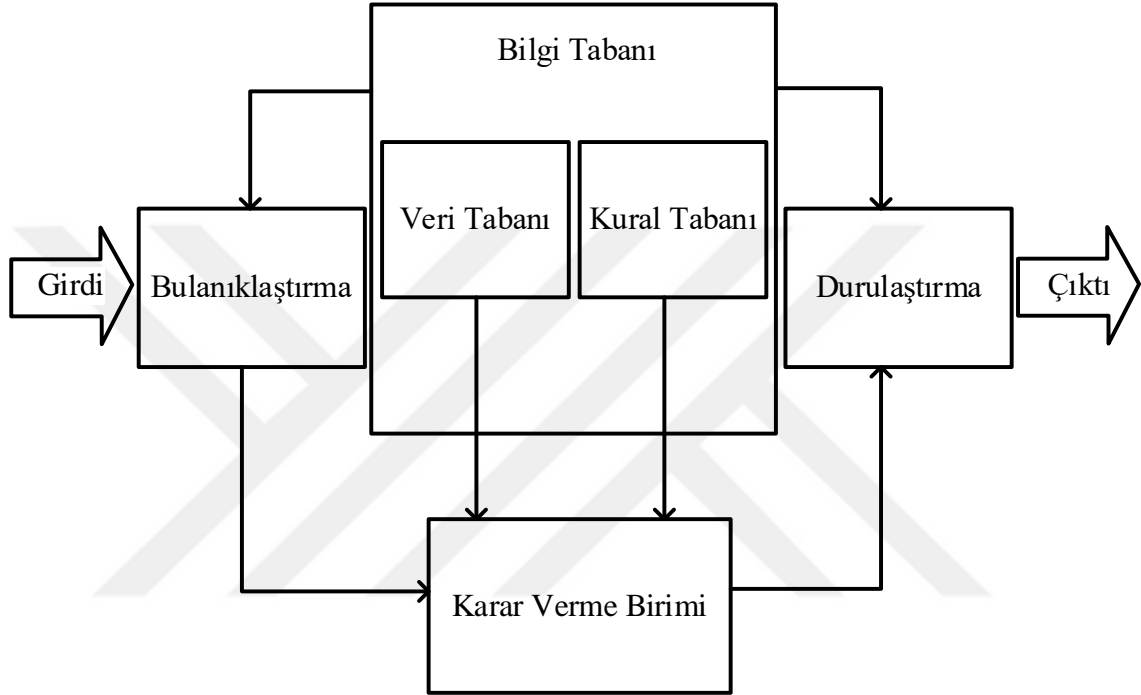
$$\mathbf{G}(x; c, \sigma) = \left\{ \frac{-(x - c)^2}{e^{2\sigma^2}} \right\} \quad (5)$$

Bulanık mantık yönteminde üyelik dereceleri ve küme kuramı her uygulamaya göre farklı sonuçlar verebilmektedir (Karataş ve ark., 2020).

2.3.3.3 Bulanık Kurallar ve Bulanık Çıkarım

Bulanık Kurallar ve Bulanık Çıkarım

Bulanık model içerisinde bulanıklaştırma, kural tabanlarının oluşturulması, toplanması ve değerlendirilmesi, berraklaştırma, işlemleri sırasıyla birbirini takip ederler. Şekil 2.35 bir bulanık sistem sürecini modellemesini göstermektedir (Jang, 1993).



Şekil 2.35. Bulanık çıkarım sistemi modeli (Jang, 1993)

Bulanıklaştırma, sisteme giren her giriş değerini bulanık küme değerine dönüştürmek için kullanılır. Bu süreçte, giriş değişkenlerine büyük, çok büyük, küçük gibi dilsel terimler atanır. Bulanıklaştırma işlemi sürecinde, giriş değerlerinin bulanık kümeler içindeki üyelik düzeyleri üyelik fonksiyonları ile belirlenir. Bu fonksiyonlar, giriş değerlerinin ilgili kümeye ait olma derecesini 0 ile 1 arasında ifade eder. Üyelik fonksiyonlarının sayısının artması, işlemin hassasiyetini artırır. Doğru ve hassas bir model oluşturmak için, giriş değerleri uygun sayıda üyelik fonksiyonuyla belirlenmelidir.

Kural tabanının oluşturulma evresi, üyelik fonksiyonlarını ve "EĞER-İSE" kuralları ile, bulanık kümenin diğeriyle ilişkilendirilmesinden oluşmaktadır. Birden çok girdi söz konusu olduğu durumda "VE-VEYA" işlemcileri ile bu girdiler birbiri ile ilişkilendirilir. Bulanık kümeleri, A_i ifadeleri "EĞER-İSE" kurallarıyla "VE-VEYA"

operatörleri ile birleştirilmesi durumunda, ilişki Denklem (6)'daki gibi kurulabilir (Passino ve Yurkovich, 1998).

$$\text{EĞER, } A_1 \text{ VE } A_2 \text{ VE } \dots \text{ VE } A_n \text{ İSE } B_i \quad (6)$$

Bulanık çıkarım sistemlerinin temelini bulanık kurallar oluştururlar ve belirsiz ortamlarda insan düşünce ve muhakeme yeteneğini yansıtabilme kabiliyetini taşırlar.

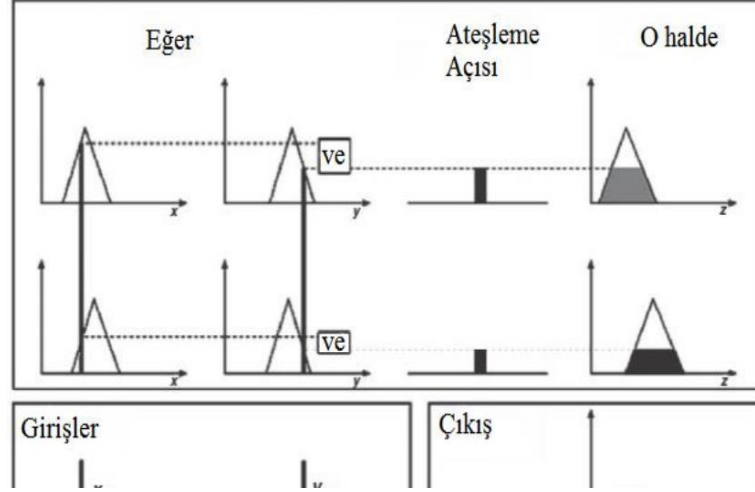
Oluşturulan kurallar içerisinde “çıkarm” olarak tanımlanan kavram, muhakeme ile sonuç değeri oluşturulması işlemidir. İlk olarak, çıkarm işlemi için seçilen yönteme bağlı olarak giriş işaretinin değerlendirilmesi gerçekleşir. Sonrasında, bu değeri kuralın "hareket etme derecesi" olarak adlandırılır. Eğer aynı çıkış derecesine sahip iki veya daha fazla kural varsa, belirlenen yönteme göre bir değeri seçilir ve çıkış işaretinin değeri belirlenir. En yaygın kullanılan çıkarm yöntemleri arasında Mamdani Yöntemi ve Takagi-Sugeno-Kang Yöntemleri (TSK) bulunmaktadır (Mamdani, 1974) (Takagi ve Sugeno, 1985). Ayrıca, Tsukamoto Yöntemi ve Larsen Yöntemi kullanılan diğer çıkarm yöntemleri arasında sayılabilir. Çıkarm kümelerinin bir araya getirilerek tek bir küme olarak gösterilmesi ise kural toplama olarak adlandırılır (Baykal ve Beyan, 2004). Mamdani kurallarını formüle etmek nispeten daha kolay anlaşılabilir. Sugeno tipi ise hesaplama olarak daha etkilidir ve matematik analizinde daha kullanışlıdır.

2.3.3.4 Mamdani Tipi Yapı için Çıkarm Mekanizması

Mamdani ve Assilian (1975), tarafından yapılan bu çıkarm mekanizmasında, kural tabanında bulunan giriş ve çıkışlardaki dilsel değişkenler Denklem (7)'de verildiği gibi tanımlanır.

$$K_i: \text{Eğer } x = A_i \text{ ise o halde } y = B_i \quad (7)$$

Denklem (7)'de, x ölçekleri, A_i 'ler giriş B_i 'ler de çıkış dilsel değişkenlerini ifade etmektedir. Mamdani çıkarm mekanizmasında, çıkış üyelik fonksiyonları bulanık kümelerden oluşmaktadır. Bu çıkarm mekanizmasında işlemi çalıştırdıktan sonra her bir kural için durulaştırma gerektiren bulanık kümeler oluşmaktadır. İki girişli ve iki kurallı Mamdani tipi yapı çıkarm mekanizması Şekil 2.36'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.36. İki giriş iki kural Mamdani tipi yapı için çıkarım mekanizması (Yaman, 2014)

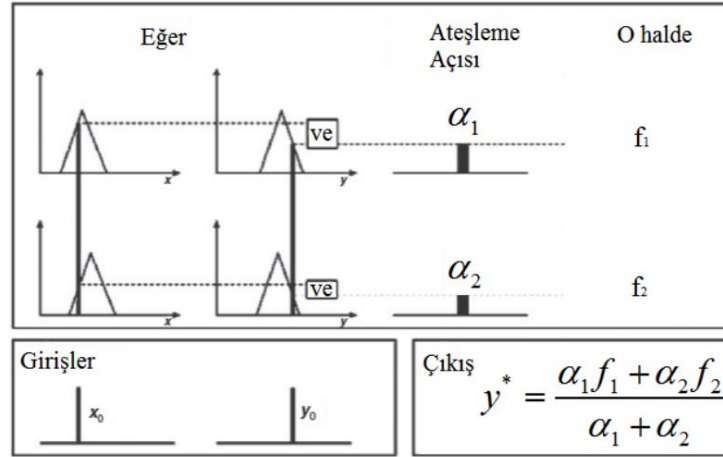
2.3.3.5 Takagi - Sugeno Tipi Yapı için Çıkarım Mekanizması

Sugeno tipi modelleme kural tabanında bulunan kurallardaki girişleri dilsel değişkenler, çıkışları ise keskin fonksiyonlar ile Denklem (8)'de verildiği gibi tanımlamıştır (Takagi ve Sugeno, 1985).

$$K_i: \text{Eğer } x = A_i \text{ ise o halde } y = f_i(x) \quad (8)$$

Şekil 2.37'deki sistemde iki girişli ve iki kurallı Takagi - Sugeno tipi yapı için çıkarım mekanizması verilmiştir.

Bulanık çıkarım sonrasında elde edilen bulanık çıkış değerinin gerçek çıkış işaretine dönüştürülmesi Durulaştırma işlemidir. Bazı durulaştırma metotları olarak; En Büyük Üyelik Metodu, Ağırlık Merkezi Metodu, Ortalama Ağırlık Metodu, En Büyüklerin Ortalaması Metodu, Alanı İkiye Bölen Nokta Metodu olarak sıralanabilir. En yaygın kullanılan durulaştırma yöntemleri, ağırlık ortalaması ve ağırlık merkezi yöntemidir (Espinosa ve ark. 2005).

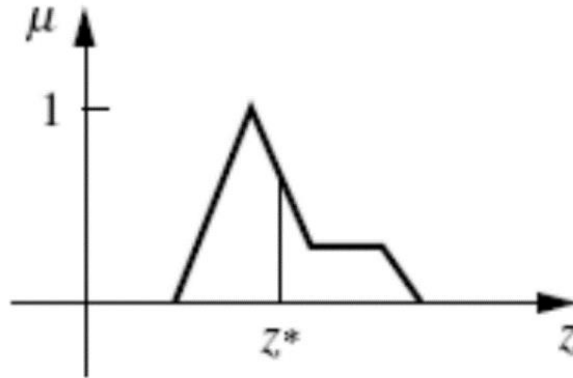


Şekil 2.37. İki giriş iki kural Takagi-Sugeno tipi yapı için çıkarım mekanizması (Yaman, 2014)

Ağırlık merkezi yöntemi

Ağırlık merkezi yönteminde çıkarım mekanizması sonucunda oluşan alanların ağırlık merkezi bulunur ve durulaştırma işlemi ile keskin bir değer olarak hesaplanır. Bu yöntemin formülasyonu Denklem (9)'da ve alanın ağırlık merkezi yöntemi için verilen grafik Şekil 2.38'de verilmiştir.

$$z^* = \frac{\int \mu_z z dz}{\int \mu_z dz} \quad (9)$$



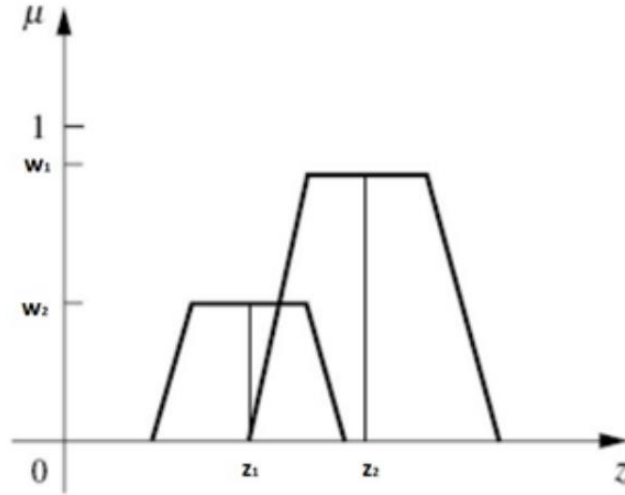
Şekil 2.38. Alanın ağırlık merkezi (Yaman, 2014)

Ağırlık ortalaması yöntemi

Simetrik çıkış üyelik fonksiyonları oluşturduğunda kullanılan bu yöntem ile her bir üyelik fonksiyonu maksimum değeri ile ağırlıklandırılarak çıkış değerleri hesaplanır.

Denklem (10)'da ağırlık ortalaması yönteminin hesaplaması ve Şekil 2.39'de alanın ağırlık ortalaması yöntemi için verilen grafik gösterilmektedir.

$$z^* = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2}{w_1 + w_2} \quad (10)$$

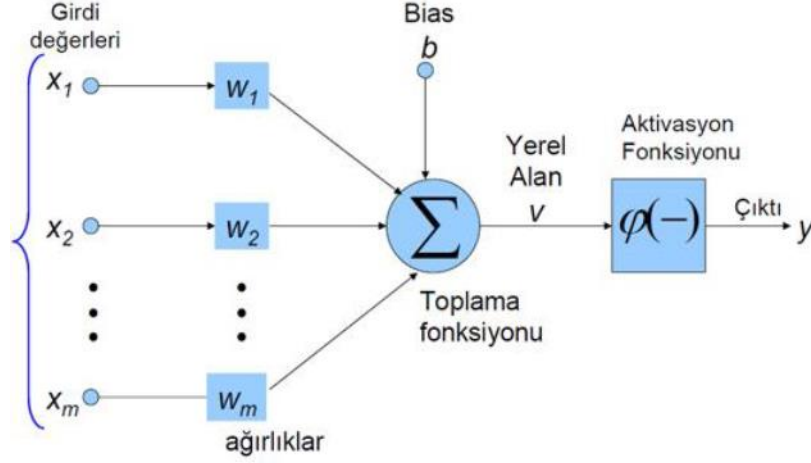


Şekil 2.39. Alanın ağırlık ortalaması (Yaman, 2014)

2.3.4 Bulanık Mantık ve Sinir Ağları Entegrasyonu

2.3.4.1 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları, insan beyninin yeteneklerini taklit ederek, öğrenme yoluyla yeni bilgiler üretebilme, bilgi oluşturma ve keşfetme gibi özellikleri otomatik olarak gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen bilgisayar sistemleridir. Bu sistemler, insan beyninin işlevsel özelliklerine benzer şekilde öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, özellik belirleme, optimizasyon gibi alanlarda başarıyla kullanılmaktadır (Öztemel, 2012). Yapay sinir hücreleri, öğrenme ve uygulama olmak üzere iki temel işlevi yerine getirirler. Öncelikle, bu hücreler, belirlenmiş geçmiş verilere dayanarak girdi ve çıktı arasındaki ilişkiyi öğrenmek için eğitilirler. Bu eğitim süreci, yapay sinir hücresinin öğrenme yeteneğiyle yakından ilişkilidir. Daha sonra, bu hücreler, güncel girdileri alır ve öğrendikleri yapı üzerinden çıktıları belirlerler, bu da hücrenin uygulama işleviyle ilgilidir. YSA; sınıflandırma, modelleme, tahmin ve örüntü tanıma uygulamaları gibi pek çok alanda kullanılmaktadır (Tokmak ve ark., 202). Şekil 2.40'da verilen Yapay nöron yapısı, Denklem (11)'de matematiksel olarak tanımlanmıştır.



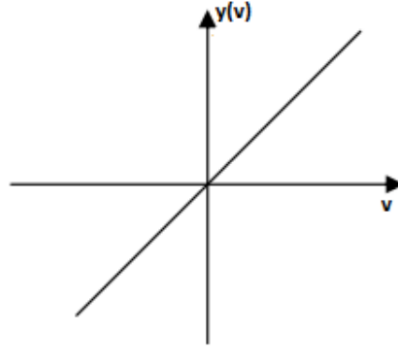
Şekil 2.40 Yapay sinir hücresi yapısı (Keskenler ve ark.,2017).

$$\begin{aligned}
 u_k &= \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \\
 v_k &= u_k + b_k \\
 y_k &= \varphi(v_k)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Yukarıdaki şekilde m ($j = [1, m]$) toplam girdi sayısını belirtmektedir. Denklem (11)'de x_j olarak belirtilen değişkenler, YSA'nın girişleri olup, w_{kj} olarak belirtilen katsayılar ise "ağırlıklandırma" olarak tanımlanır. Aynı ifadede bulunan b_k , YSA için bias girişidir ve pozitif veya negatif olması durumuna göre, aktivasyon fonksiyonunun girişi olan v_k değeri üzerinde arttırıcı ya da azaltıcı etkisi olur.

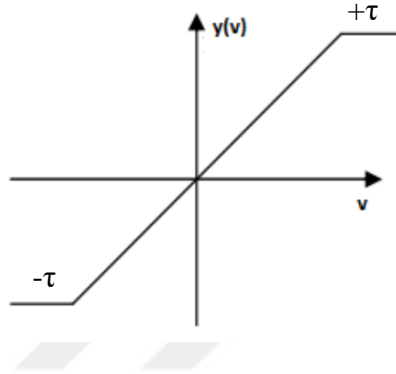
Aktivasyon Fonksiyonları

Aktivasyon fonksiyonları $\varphi(v)$ ifadesi ile gösterilmektedir ve v için nöronun çıkışını sonuç olarak ifade etmektedir. Şekil 2.41'de verilen ve Denklem (12) ile ifade edilen lineer fonksiyon, $[+\tau, -\tau]$ değerleri arasında kısıtlandığında Şekil 2.42'de verilen rampa eşik fonksiyonu olur ve Denklem (13)'te verildiği gibi oluşur. Şekil 2.43'de İşaret fonksiyonu bağıntısı ile ifadesi Denklem (14)'te, Şekil 2.44'de ise sigmoid fonksiyonu bağıntısı ile ifadesi Denklem (15)'te verilmiştir (Yaman, 2014).



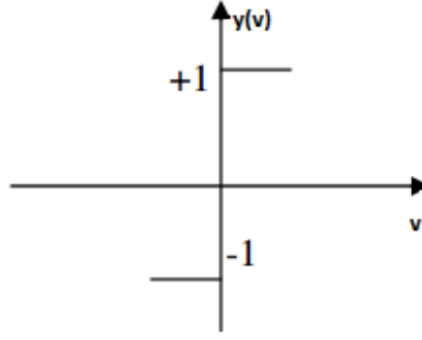
Şekil 2.41. Lineer fonksiyon

$$y^{linear} = v \quad (12)$$



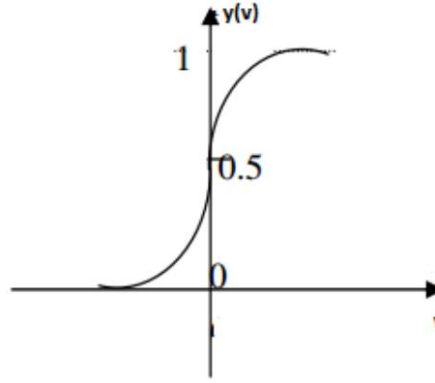
Şekil 2.42. Rampa eşik fonksiyonu

$$y^{ramp} = \begin{cases} +\tau: v \geq \tau \\ v: |v| < \tau \\ -\tau: v \leq -\tau \end{cases} \quad (13)$$



Şekil 2.43. İşaret fonksiyonu

$$y^{sign} = \begin{cases} +1: v \geq 0 \\ -1: v < 0 \end{cases} \quad (14)$$

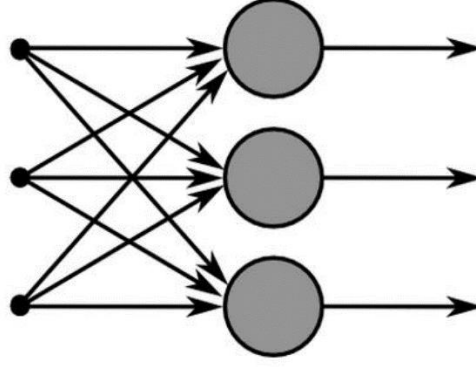


Şekil 2.44. Sigmoid fonksiyonu

$$y^{sigmoid} = \frac{1}{1 + e^{-v}} \quad (15)$$

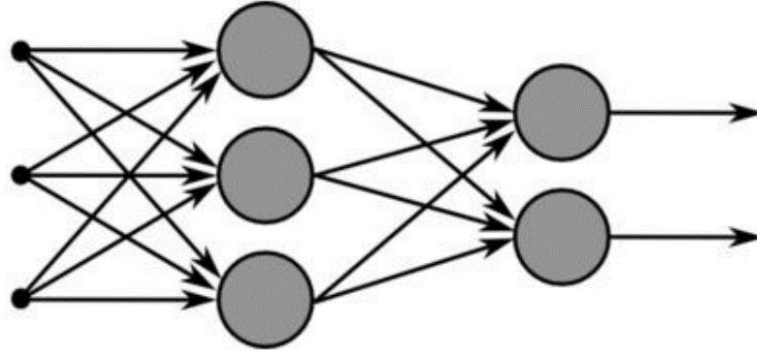
Ağ Yapıları

Tek katmanlı ileri beslemeli YSA yapısı Şekil 2.45'te gösterilmiştir ve bu tek katmanlı yapıdaki nöronlar, katmanların biçimine göre düzenlenirler. Geri besleme yapısı içermeyen YSA'ların, kaynak düğümlerinden meydana gelen giriş katmanı vardır ve nöronların çıkış katmanına bunlar etki eder, fakat tersi mümkün değildir (Şen, 2004).



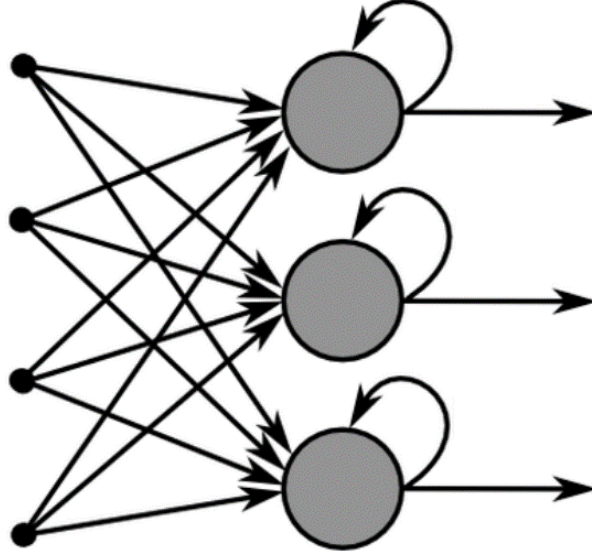
Şekil 2.45. Tek katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı (Yaman, 2014)

Çok katmanlı bir ileri beslemeli ağ yapısı, her katmanın çıkışı, takip eden katmanın girişi olacak şekilde planlanır ve ağın isimlendirmesi sırasıyla kaynak düğümleri sayısı, gizli nöronlar ve çıkış nöronları olarak tanımlanır. Örneğin, ağ yapısı 3-3-2 ağ olarak planlanan bir katman Şekil 2.46’de verilmiştir.



Şekil 2.46. Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı (Yaman, 2014)

Tekrarlı YSA yapısı farkı ileri beslemeli YSA yapılarına nazaran en az bir geri besleme döngüsü içermesi ile farklılık gösterir. Ağın performansı ve öğrenme kapasitesi üzerinde geri besleme döngüsü oldukça etkilidir. İlave olarak, geri besleme yolu üzerinde olan birim geciktirme elemanları, ağın yapısına lineer olmayan bir özellik katmaktadır (Haykin, 2009). Tekrarlı YSA yapısı için verilen bir örnek Şekil 2.47’de görülmektedir.



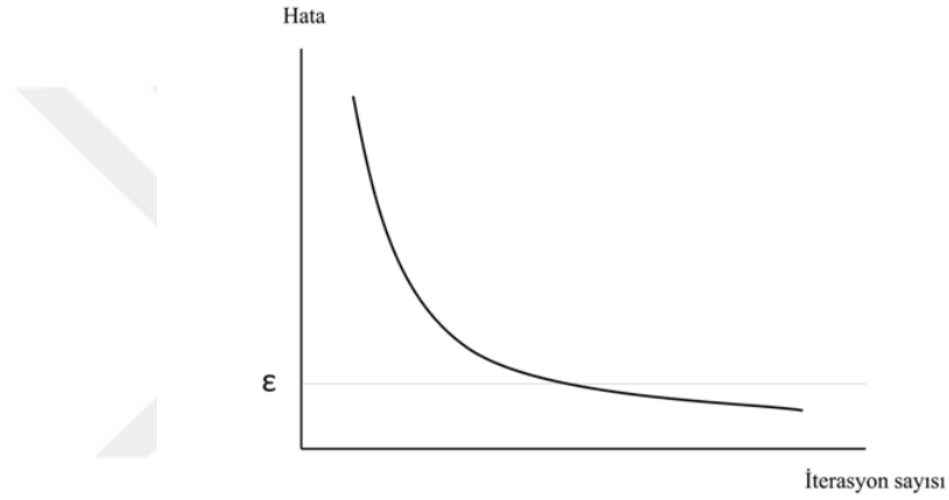
Şekil 2.47. Tekrarlı yapay sinir ağı yapısı (Yaman, 2014)

Şekil 2.40’da YSA hücrelerinin girişi $x = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m\}$ ve ağırlık kümeleri $w = \{w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_m\}$, $i = 1 \dots m$, m giriş sayısı olarak tanımlanmıştır. Burada; x_m girdi sinyallerini, w_m ise o sinyallerin ağırlık katsayılarının değerlerini göstermektedir. Çekirdek tüm girdi sinyallerinin ağırlıklı toplamlarını ifade etmektedir. Sistemdeki toplam sinyal v ile gösterilirken, sinapsise aktivasyon fonksiyonuna girdi olarak yönlendirilmiştir. Aktivasyon fonksiyonundan çıkan sonuç sinyali y ile ifade edilmiş ve diğer hücreye beslenmek üzere yönlendirilmiştir.

Kısaca, YSA’nın görevi; x giriş değerleri kümesine karşılık y çıktısı sinyalini oluşturarak bu sinyali diğer hücrelere iletmektir. Her giriş değerleri kümesi, x ile y arasındaki girişleri uygun çıkışlara atayacak şekilde ağırlıkların optimize edilmesi öğrenme işlemi olarak adlandırılıyor. Öğrenmenin tamamlanması; girdi örüntüleri, w_m ağırlıklarındaki değişim stabil olana kadar sistemin beslenmesidir. Sistemde stabilite sağlandığı zaman hücre öğrenmesini tamamlanmıştır. YSA’nın öğrenme sürecinde de dış ortamdan girişler alınabilir, bununla aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek bir tepki çıkışı üretilir. Bu çıkış tecrübeyle verilen çıkışla karşılaştırılarak hata tespit edilir. Gerçek çıkışa yaklaşmak için, çeşitli öğrenme algoritmalarıyla hata azaltılmaya çalışılır ve bu YSA’nın ağırlıklarının optimize edilmesi olarak ifade edilir. Amaca ulaşmak için bu ağırlıklar her bir çevrimde yenilenir. Eğer YSA amaca ulaşmış ise verilen giriş-çıkış çiftleriyle ağırlık değerleri saklanır. Ağırlıkların sürekli yenilenerek istenilen sonuca ulaşılan kadar geçen zamana “Öğrenme” adı verilir. YSA sistemlerinin öğrenme başarısı

gerçekleştirilen testlerle değerlendirilir. Test işlemi, eğitim setinde kullanılmayan verilerden oluşan test seti kullanılarak yapılır. Test setindeki girdiler YSA sistemine verilerek YSA'nın çıktı değeri ile beklenen çıktı değerleri karşılaştırılır. Burada, YSA modelinin yeterli bir genelleme yapıp yapamadığının sınanması yapılır. Eğitim ve test aşamalarında beklenen başarı elde edilirse YSA modeli kullanılabilir (İsen, 2017).

Bir ağın öğrenmesi hata grafiği çizilerek gösterilebilir. Öğrenme sürecindeki bir ağ için her iterasyonda oluşan hatanın grafiği çizildiğinde Şekil 2.48'dekine benzeyen bir hata grafiği meydana gelir.



Şekil 2.48. Örnek bir öğrenme eğrisi (Doğan, 2016)

Şekil 2.48'da belirli sayıdaki bir iterasyondan sonra hatanın daha fazla azalmadığı görülmektedir. Bu durum ağın öğrenmesinin durduğu ve daha iyi bir sonuca ulaşamayacağı anlamına gelir.

Yapılarına göre YSA ileri beslemeli ağlar ile geri beslemeli ağlar olmak üzere iki gruba ayrılır. İleri beslemeli ağlarda nöronlar girişten çıkışa doğru düzenli katmanlar şeklindedir ve bir katmandan sadece kendinden sonraki katmanlara bağ bulunmaktadır. YSA'ya gelen bilgiler giriş katmanına ve daha sonra sırasıyla ara katmanlardan ve çıkış katmanından işlenerek geçer ve çıktıya dönüşür. Geri beslemeli YSA'larda ileri beslemeli olanların aksine bir nöronun çıktısı sadece kendinden sonra olan nöron katmanına girdi olarak verilmez fakat kendinden önceki katmanda veya kendi katmanında bulunan herhangi bir nörona girdi olarak bağlanabilir. Geri besleme özelliğini kazandıran bağlantıların bağlantı sekline göre geri aynı yapay sinir ağıyla farklı davranışta ve yapıda geri beslemeli yapay sinir ağları elde edilebilir (Cemil, 2015) (İsen, 2017).

2.3.5 Bulanık Sistemler ve Sinir Ağlarının Özellikleri

Sinir ağları verilerden öğrenebilirken sinir ağları ile öğrenilen bilgiyi anlamak oldukça zordur. Sistem, giriş ve çıkış değerlerinden oluşan veri setini kullanarak nöronlar arasındaki ağırlıkların güncellenmesi esasına göre çalışır ve bunların kaç katman olacağı, bu katmanlardaki nöronun sayılarının ne olacağının belirli olmaması ve nöronlar arasındaki ağırlıkların bir anlamının olmaması YSA'nın dezavantajlarından biridir. Tersine bulanık sistemler, sözel terimler ve "EĞER-İSE" kurallarını kullandıklarından dolayı kolayca anlaşılabilirken, öğrenme algoritmaları yoktur. YSA ile bulanık mantık arasındaki farklılıklar Çizelge 2.7'de gösterilmiştir (Baykal ve Beyan, 2004).

Çizelge 2.7. Bulanık sistemler ve sinir ağlarının özellikleri (Baykal ve Beyan, 2004)

Yetenekler		Bulanık Sistemler	Sinir ağları
Bilgi Edinimi	Girdiler	İnsan uzmanlar	Örnek kümeler
	Araçlar	Etkileşim	Algoritmalar
Belirsizlik	Bilgi	Nicel ve nitel	Nicel
	Bilişsellik	Karar verme	Algı
Akıllı Yürütme	Mekanizma	Deneyimsel araştırma	Paralel bilgi işlem
Uyarlanma	Hata toleransı	Düşük	Çok yüksek
	Öğrenme	İndüksiyon	Ayarlanmış ağırlıklar
Doğal Dil	Gerçekleştirme	Açık	Gizli
	Esneklik	Yüksek	Düşük

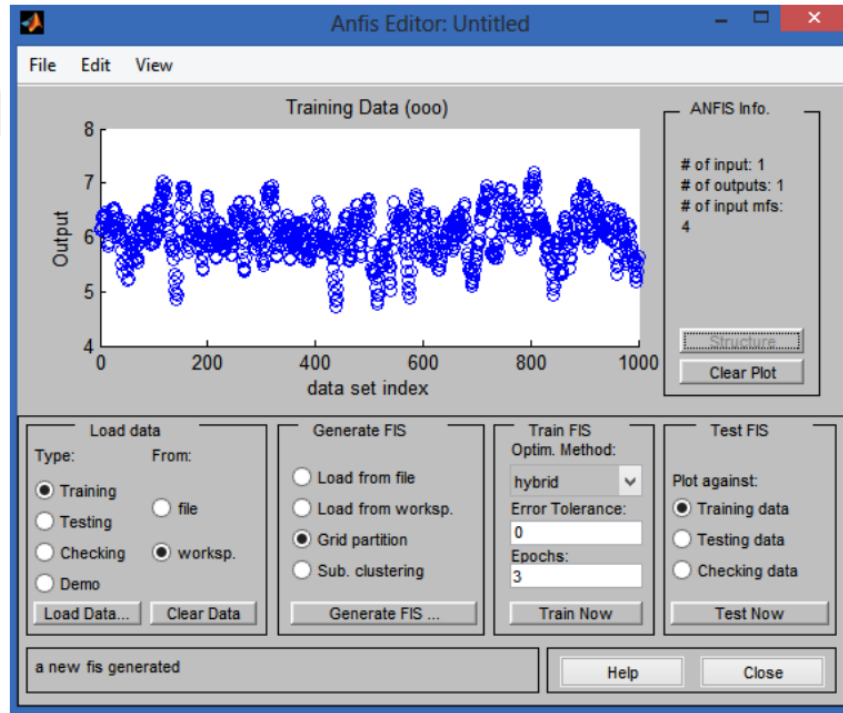
Beyan ve Baykal (2004)'a göre bulanık mantık ve YSA'nın sentezinde 5 farklı kategoriden bahsedilebilir; bulanıklığı sinir ağı çatısına sokmak, bulanık mantık ile sinir ağı tasarlamak, sinir hücrelerinin temel özelliğini değiştirmek, ağı kararsızlığı ya da hatası olarak bulanıklık değerini kullanmak, her bir sinir hücrelerini bulanıklaştırmak olarak sıralanabilir.

Bulanık mantık ve YSA'nın entegre kullanıldığı hibrid sistemlerin çoğu, bulanıklığı sinir ağı çatısına sokmak ve sinir hücrelerinin temel özelliklerini değiştirerek yapılmaktadır. Günümüzde kullanılan bulanık sistemleri ileri beslemeli ve çok katmanlıdır. Bu sistemler, ANFIS, FALCON, FuNe, RuleNet, GARIC, NEFCLASS, NEFCON, NEFPROX olarak sıralanabilir. Sugeno benzeri bulanık sistem içeren ANFIS

modelinde, geri yayımlı algoritma kullanılırken GARIC, NEFCON, NEFCLASS ve NEFPROX modellerin de ise Mamdani tipi bulanık sistemler kullanılmaktadır (Baykal ve Beyan, 2004).

2.3.5.1 Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

Bulanık mantık ve YSA'nın bir araya gelmesi ile hibrit bir yapay zekâ tekniği olan Uyarlamalı (Adaptif) Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) ortaya çıkmıştır. ANFIS, 1993 yılında Jang tarafından YSA'ları ve bulanık mantığın avantajlarından faydalanarak oluşturulan bir tekniktir (Jang, 1993). ANFIS nonlinear fonksiyonların modellenmesinde, kontrol sisteminde nonlinear bileşenlerin belirlenmesinde ve kaotik oluşumların tahmininde kullanılmıştır. MATLAB yazılımında Bulanık Mantık Modülü olarak bir Kullanıcı Arayüzü (GUI) aracılığı ile kullanılabilme imkanı vardır. Şekil 2.49'da ANFIS'in kullanıcı arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 2.49. ANFIS kullanıcı ara yüzü (Yaman, 2014)

Uzman bilgilerinden faydalanılarak oluşturulan Bulanık mantık güçlü bir yapıya sahipken, YSA algoritması ile öğrenme yeteneği de kazanır. ANFIS, çözülecek problem için kurallar atayabilme özelliği sunmasının yanı sıra bu kuralların bir uzman tarafından

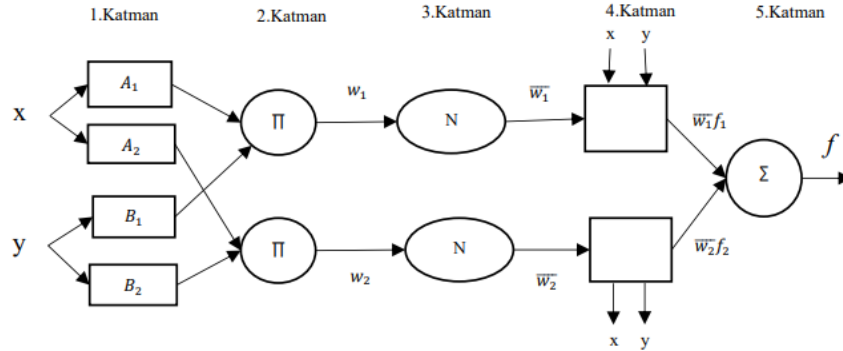
atanmasına da imkan sağlar. ANFIS temelde Sugeno tipi bulanık sistemlerin sinirsel öğrenme yapısına sahip bir ağ yapısı temsilinden ibarettir ve her biri belli bir fonksiyonu gerçekleştirmek için, katmanlar halinde yerleştirilmiş düğümlerin birleşiminden oluşmuştur (Hamed ve ark., 2014).

YSA'ya benzer bir yapıya sahip olmakla birlikte ANFIS 5 katmandan oluşmaktadır ve YSA'lardan farklı olarak 2. ve 3. katmanda bulanık mantık kullanılmaktadır. Bu katmanlarda uzman bilgilerinden faydalanılır.

2.3.5.2 ANFIS Mimarisi

Yapı yönünden ANFIS, bulanık çıkarım sistemindeki EĞER-İSE kuralları ile giriş çıkış bilgi çiftlerinden oluşur. Sistem eğitiminde YSA öğrenme algoritmaları kullanılır. ANFIS, çok girişli tek çıkışlı (ÇGTÇ) sistemler için bulanık model geliştirebilir. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonu parametreleri adaptif sinir ağı yapısı ile tanınır veya kestirilir.

Şekil 2.50'de iki giriş, iki kural, tek çıkışlı Sugeno Bulanık çıkarımına eşdeğer ANFIS yapısı verilmiştir (İsen, 2017). Düğümlerin 4. katmana kadar ileri gidişlerinde son parametreler en küçük kareler yöntemi ile belirlenirken, geriye doğru gidişte ise ilk parametreler eğilim azaltımı yöntemi ile belirlenir.



Şekil 2.50. İki girdi, bir çıktı ve iki kuraldan oluşan ANFIS mimarisi (İsen, 2017)

Şekil 2.50'de gösterilen ANFIS modeli 2 girdi, 1 çıktı değeri ve 2 kuraldan oluşmaktadır. Kural 1: Eğer x değeri A_1 ve y değeri B_1 ise,

$$f_1 = p_{1x} + q_{1y} + r_1 \quad (16)$$

Kural 2: Eğer x değeri A_2 ve y değeri B_2 ise,

$$f_2 = p_{2x} + q_{2y} + r_2 \quad (17)$$

A ve B , x ve y üyelik fonksiyonları için tanımlanmış öncül kısımdaki bulanık kümeler; p , q ve r ise soncul parametrelerdir. Böylece her bir kural için bir çıktı değeri elde edilir.

2.3.5.3 ANFIS Yapısındaki Katmanlar

Şekil 2.50'de gösterildiği üzere ANFIS yapısı 5 katmandan oluşmaktadır ve yapısındaki her katmana ait düğüm işlevleri ve bu katmanların işleyişi aşağıda açıklanmıştır;

1. Katman: Bulanıklaştırma katmanı olarak tanımlanır. Giriş değerlerini bulanık kümelere ayırma Jang'ın (Jang, 1993) ANFIS modeli, üyelik fonksiyonu olarak genelleştirilmiş Bell aktivasyon fonksiyonunu kullanılır. Bu katmanda, her düğümün çıkışı, giriş değerlerine ve kullanılan üyelik fonksiyonuna bağlı olan üyelik derecelerinden oluşur ve 2. katmandan elde edilen üyelik dereceleri $\mu_{A_i}(x)$ ve $\mu_{B_i}(y)$ şeklinde kullanılacaktır. Üçgensel, genelleştirilmiş Çan eğrisi ve Gauss üyelik fonksiyonları gibi üyelik fonksiyonları da bu katmanda kullanılmak üzere seçilebilir. mevcuttur. Katman sayısı l , düğüm sayısı, i olmak üzere her katmandaki düğüm çıkışları $O_{l,i}$ ile ifade edilir (Denklem (18)). Ayrıca $\mu_{A_i}(x)$ açılımı Denklem (5) te detaylı olarak anlatılmıştır. Bu çalışmada Gauss üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} O_{l,i} &= \mu_{A_i}(x) \text{ for } i = 1,2 \\ O_{l,i} &= \mu_{B_{i-2}}(y) \text{ for } i = 3,4 \end{aligned} \quad (18)$$

Burada x ve y olarak gösterilen ifadeler girişleri, A_i ve B_i ile gösterilen ifadeler ise dilsel değişkenleri göstermektedir. Üyelik fonksiyonları için $\mu(x)$ ifadesi kullanılır. Bu düğümler uyarlanabilir olup, parametrelerine “Girdi (Öncül) Parametreler” denilmektedir.

2. Katman: Kural katmanıdır ve bu katmandaki her bir düğüm, Sugeno bulanık mantık çıkarım sistemi tabanında oluşturulan kuralları ve kural sayısını oluşturmaktadır. Her bir kural düğümünün çıkışı μ_i , ikinci katmandan gelen üyelik derecelerinin çarpımı

olmaktadır. μ_i değerlerinin elde edilişi ise, ($j = 1,2$) ve ($i = 1, \dots, n$) şeklindedir (Denklem (19)).

$$y_i^3 = \Pi_i = \mu_{Aj}(x) \times \mu_{Bi}(y) \quad (19)$$

Denklem (19)'da çıkış değeri, y_i^3 , olan üçüncü katmanın düğüm sayısı n ile tanımlanır. İkinci katmanda kurallar kullanılarak girişler için T -normu (N_i) işlemi yapılır. Bu katmandaki her düğümdeki işlemi Denklem (20)'deki gibi yapılır.

$$\mu_{Bi}(y) = N_{i,B} \quad (20)$$

3. Katman: Kural katmanının çıktı değerleri normalizasyon katmanı için girdi değeri olarak kabul edilir ve Normalleştirilme katmanındaki tetiklenme değeri olan $\bar{\mu 1}$ 'nin hesaplanması ise, Denklem (21) göre gerçekleştirilir.

$$y_i^4 = N_i = \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} = \bar{\mu 1}, \quad (i = 1, n) \quad (21)$$

Üçüncü katman kurallardaki tetiklenme değeri normalize edilirken, i dereceli düğüm, i dereceli kuralın tetiklenme değerinin toplamına oranını hesaplar (Denklem (22)).

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \text{ for } i = 1,2 \quad (22)$$

Bu katmanın çıkışlarına “normalize edilmiş tetiklenme değeri olarak ifade edilir ve bu düğümler sabit düğümlerdir.

4. Katman: Bu katman berraklaştırma katmanı olarak ifade edilir ve katmanda bulunan düğümlerde verilen bir kuralın ağırlıklandırılmış sonuç değerleri hesaplanır ve sonuç parametreleri olarak adlandırılır. Katmandaki her düğüm, uyarlanabilir düğümlerdir ve Denklem (23) ile hesaplanabilir.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \text{ for } i = 1,2 \quad (23)$$

Burada p_i , q_i ve r_i ile verilen ifadeler, bu düğümün parametre takımıdır ve “sonuç parametreleri” olarak isimlendirilir.

5. Katman: Toplam katmanıdır, katmanda sadece bir düğüm vardır ve \sum ile ifade edilir. Katmandaki her bir düğümün çıkış değeri toplanarak, ANFIS sisteminin çıktı değeri elde edilir. Sistemin çıkış değeri olan y 'nin hesaplanması Denklem (24)'e göre yapılmaktadır.

$$y = \sum_{i=1}^n \bar{\mu}_i [p_i x_1 + q_i x_2 + r_i] \quad (24)$$

Beşinci katmanda kestirilmiş çıkış değeri hesaplanır ve bu katmandaki tek düğüm, gelen tüm sinyallerin toplamı olarak, tüm ağın çıkışını Denklem (25) hesaplar.

$$O_{5,1} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (25)$$

f fonksiyonu Denklem (26) ile tanımlanabilir.

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \quad (26)$$

$$f = \bar{w}_1 (p_1 x + q_1 y + r_1) + \bar{w}_2 (p_2 x + q_2 y + r_2)$$

2.3.5.4 ANFIS Öğrenme Algoritması

ANFIS öğrenme algoritması, hem girdi değişkenlerini hem de çıktı değişkenlerini optimize etme özelliğine sahiptir. ANFIS öğrenme işlemini gerçekleştirirken melez öğrenme algoritmasını kullanmaktadır (Çizelge 2.8). Melez öğrenme algoritması, en küçük kareler yöntemi ile geri yayımlı öğrenme algoritmasının beraber kullanılmasını içerir. Melez öğrenme algoritması, ileri besleme ve geri besleme olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. İleri beslemede, girdi parametreleri sabit alınarak çıktı parametrelerinin değerleri en küçük kareler yöntemi ile hesaplanırken, geri beslemede ise çıktı parametreleri sabit alınarak girdi parametreleri geri yayımlı öğrenme algoritması ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 2.8. ANFIS öğrenme algoritması detayları (Yaman, 2014)

Melez Öğrenme Algoritması	İleri beslemeli	Geri Beslemeli
Girdi Parametreleri	Sabit	Geri Yayılmalı Öğrenme
Çıktı Parametreleri	En Küçük Kareler Yöntemi	Sabit

ANFIS'te ileri ve geri besleme işleyiş döngüsü, uzman kullanıcı tarafından belirlenen bir hata değerinden küçük olana kadar devam etmektedir. Hesaplanan hata değeri ise, hata kareler ortalamasının karekök değerine yani sistemin standart sapma değerine eşit olacaktır. Hata kareler ortalamasının karekök değeri (RMSE) formülü aşağıdaki gibidir:

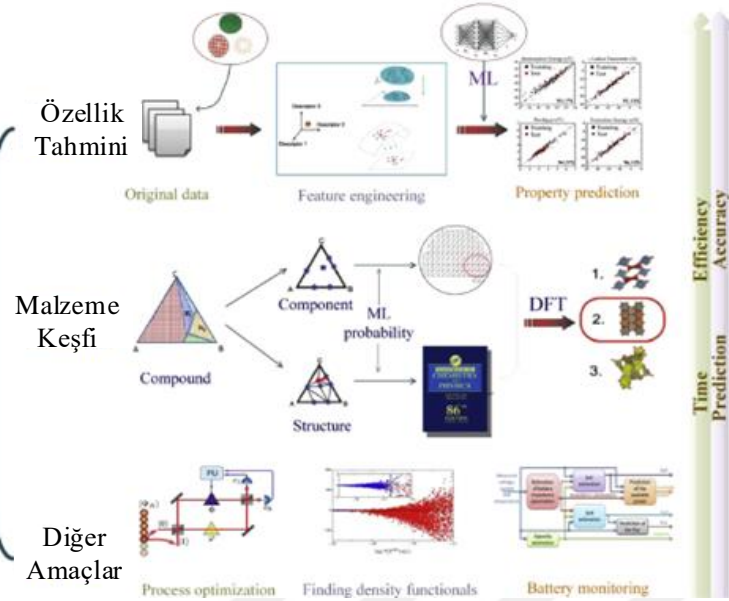
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_i^*)^2} \quad (27)$$

Denklem (27)'de f_i gerçek değerleri, f_i^* ANFIS'den elde edilen değerleri, n ise örnek büyüklüğünü göstermektedir.

Sinir ağları ile bilgi değerlendirme zorluğu bulanık mantığın sözel terimleri ve EĞER-İSE kuralları ile ortadan kaldırılmıştır. ANFIS, uzman tarafından ortaya konan olası tüm kuralları atayabilmektedir. Bu nedenle birçok tahmin probleminde yapay sinir ağlarına uzman görüşlerinden faydalanma imkânı tanıdığı için ortalama hata kareler kriterine göre daha iyi sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Cemil, 2015).

2.4 Makine Öğrenme (ML) Algoritmalarının Malzeme Özellik Tahmininde Uygulamaları

Yeni malzeme keşfi ve malzeme özelliği tahmini gibi malzeme bilimindeki çeşitli konuları ele almak için ML uygulamaları kullanılmıştır. Şekil 2.51'de gösterildiği gibi, malzeme keşfi ve tasarımında ML uygulamaları; malzeme özelliği tahmini, yeni malzeme keşfi ve diğer çeşitli amaçlar olmak üzere üç ana sınıfa ayrılabilir.

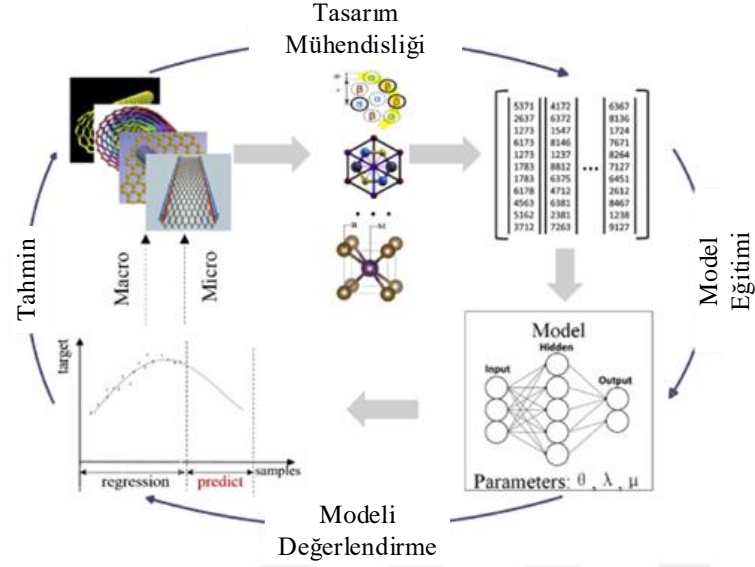


Şekil 2.51. Malzeme biliminde makine öğrenimi uygulamasına genel bir bakış (Liu ve ark., 2017).

Malzeme özelliklerinin incelenmesinde iki yaygın yöntemi vardır bunlar; Hesaplamalı Simülasyon ve Deneysel Ölçümdür. Bu iki yöntem, karmaşık işlemleri ve deneysel düzeneği içerirler. Bu nedenle, bir malzemenin özellikleri ile bunlarla ilgili faktörler arasındaki karmaşık mantıksal ilişkileri tam olarak yakalayan hesaplamalı simülasyonlar oluşturmak oldukça zordur. Ayrıca, bileşiklerin özelliklerini ölçmek için yapılan deneyler genellikle malzeme seçiminin sonraki aşamalarında gerçekleşir ve sonuçlar tatmin edici değilse, o noktaya kadar yatırılan muazzam miktarda zaman ve deneysel kaynak boşa gidebilir.

Bu nedenle, malzemelerin özelliklerini düşük bir zamansal ve hesaplama maliyetiyle doğru bir şekilde tahmin edebilen akıllı ve yüksek performanslı tahmin modellerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Malzeme özelliği tahmini için ML yöntemlerini kullanmanın temel fikri, bir malzemenin özellikleri ile ilgili faktörleri arasındaki ilişkileri (çoğu durumda doğrusal olmayan (nonlinear)), mevcut deneysel verilerden bilgi çıkararak analiz etmek ve haritalamaktır.

Şekil 2.52, malzeme özellik tahmininde makine öğreniminin uygulanması için temel çerçeveyi göstermektedir. Birinci olarak, özellik tahminiyle ilgili koşullu nitelikleri belirlemek için elle ayarlama veya özellik (feature) mühendisliği (özellik çıkarma (feature extraction) ve seçme gerçekleştirilir. İkinci olarak, bu koşullu faktörler ile karar nitelikleri arasındaki eşleştirme ilişkisi, model eğitimi yoluyla bulunur. Son olarak, eğitilmiş model özellik tahmini için kullanılabilir.



Şekil 2.52. Malzeme özelliği tahmininde makine öğreniminin uygulanması için temel çerçeve (Liu ve ark., 2017)

Analizin ölçeğine bağlı olarak, malzeme özellik tahmininde ML uygulamaları iki geniş kategoriye ayrılabilir: Makroskobik Performans Tahmini ve Mikroskobik Özellik Tahmini.

Malzemelerin makroskobik performansı üzerine yapılan araştırmalar, esas olarak bir malzemenin makroskobik (örneğin, mekanik ve fiziksel) özellikleri ile mikro yapısı arasındaki yapı-aktivite ilişkisine odaklanır. Regresyon ve sınıflandırma ile ilgili problemleri çözümedeki iyi performansları nedeniyle, YSA ve SVM algoritmalarını optimizasyon algoritmalarıyla birlikte içeren ML yaklaşımları, makroskobik performans tahmini çalışmasında yaygın olarak uygulanmaktadır. YSA'larla karşılaştırıldığında, SVM modelleri küçük örneklere uygulama için daha uygundur ve “aşırı öğrenme” sorunlarının başarıyla üstesinden gelebilir. Doğrusal olmayan ve yüksek boyutlu problemleri çözmek için avantaj sergilerler.

Bir malzemenin makroskobik performansı, kafes sabiti gibi atomik ve yapısal özellikleri dahil olmak üzere mikroskobik özellikleriyle belirlenir. Makine öğreniminin mikroskobik özellik tahminindeki uygulamaları, kafes sabiti, bant enerjisi, elektron afinitesi ve moleküler atomizasyon enerjisi dahil olmak üzere çeşitli yönlere odaklanma eğilimindedir. Makine öğrenimi, bileşen tahmininde kristal yapı tahmininden daha yaygın olarak uygulanır.

Matematiksel modellere olan üstünlüğü nedeniyle modern zamanlarda YSA, ANFIS, bulanık mantık, genetik algoritma (GA), benzetilmiş tavlama (SA), parçacık sürü

optimizasyon (PSO), vb. gibi hesaplama teknikleri malzeme modelleme ve optimizasyonunda tercih edilen araçlar olmuştur. (Liu ve ark., 2017) (Bock ve ark., 2019) (Wu ve ark., 2019a) (Chen ve ark., 2021) (Majdi ve ark., 2022) (Abdullatef ve ark., 2023).

2.5 Alüminyum Alaşımlarına YSA ve ANFIS Algoritması Uygulamaları ile İlgili Literatür Çalışmaları

Bu bölümde 2010 yılından günümüze bazı Al alaşımları üzerine yapılan YSA ve ANFIS modelleme çalışmaları özetlenmiştir.

Makine öğrenimindeki en popüler algoritmalarından biri YSA'dır (Tan ve ark., 2005). YSA, mekanik özelliklerin tahmini, proses-mikroyapı-özellik ilişkilerinin modellenmesi dahil olmak üzere malzeme biliminin birçok alanında geniş çapta uygulanmıştır (Anijdan ve ark., 2006) (Shabani ve Mazahery, 2011) (Haghdadi ve ark., 2013) (Yang ve ark., 2013) (Ashtiani ve Shahsavari, 2016) (Karkalos ve ark., 2017) (Zhang ve ark., 2019) (Merayo ve ark., 2020) (Mishra ve ark., 2021) (Lan ve ark., 2022) (Soofi ve ark., 2022) (Uyan ve ark., 2023) (Nunes ve ark. 2024).

Son yıllarda Al alaşımlarında YSA ve ANFIS modelleri, mekanik özelliklerin, deformasyon davranışlarının, kalıp ve döküm parametrelerinin, ısıl işlemin, tane boyutunun, kaynak özelliklerinin, işlenebilirlik vb. malzeme özelliklerinin tahmininde kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2012) (Yang ve ark., 2013) (Haghdadi ve ark., 2013) (Babajanzade Roshan ve ark., 2013) (Hossain ve Ahmad, 2014) (Vijayan ve Rao, 2016) (Dewan ve ark., 2016) (Karkalos ve Markopoulos, 2017) (Kannadasan ve ark., 2017) (Zhang ve ark., 2019) (Merayo ve ark., 2020) (Saha ve ark., 2020) (Mishra ve ark. 2021) (Kocaman ve ark., 2021) (Lan ve ark., 2022) (Soofi ve ark., 2022) (Gaikwad ve Chinchani, 2022) (Uyan ve ark. 2023)

Mekanik özelliklerin tahmininde, Yang ve ark., (2013) A357 Al alaşımı için geri yayılım (BP) algoritmasına sahip bir YSA modeli kullanmış ve ısıl işlemin mekanik davranışları üzerindeki etkileri araştırmıştır. Sonuçlar, YSA tahmin sonuçları ile deneysel veriler arasındaki nihai UTS'nin ortalama doğruluk % 70 olduğunu göstermiştir. BP modelinin A357 Al alaşımının mekanik özelliklerinin tahmini için doğru bir model olarak kullanılabilirliği rapor edilmiştir. Babajanzade Roshan ve ark. (2013), 7075 Al plakaların istenen mekanik özelliklerine ulaşmak için sürtünme karıştırma kaynak işleminin (FSW) deneysel araştırması, modellenmesi ve optimizasyonunu çalışmışlardır. Proses giriş değişkenleri olarak; takım pimi profili, takım dönme hızı, kaynak hızı ve kaynak eksenel kuvveti iken, çıktı olarak ise; UTS, YS ve kaynaklı bölgenin sertliğidir. Süreç faktörleri

ve ana tepki arasındaki ilişkileri belirlemek için ANFIS kullanılmıştır. Optimal mekanik özellikler için doğrulama testi yapılmış ve ANFIS sisteminin kaynak işleminin modellenmesinde ve optimizasyonunda etkili olduğu görülmüştür. Vijayan ve Rao (2016), sürtünme karıştırma kaynaklı (FSWed) AA2024 ve AA6061 Al alaşımlarının UTS değerlerini tahmin etmek için yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) ve ANFIS modelleri kullanılmıştır. Sonuçlar, geliştirilen ANFIS modellerinin RSM modelinden kıyasla bağımlı değişkenlerin değerlerini belirlemede daha etkili olduğunu göstermiştir. Dewan ve ark. (2016), sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) yoluyla üretilen kaynaklı Al alaşımlı bağlantıların UTS değerlerini tahmin etmek için ANFIS ve YSA'yı kullanmıştır. ANFIS ve YSA'ya girdi olarak mil hızı (N), dalma kuvveti (F_z) ve kaynak hızı (V) dahil olmak üzere üç kritik işlem parametresi kullanmışlardır. ANFIS ve YSA modellerinin tahmin sonuçları karşılaştırıldığında optimize edilmiş ANFIS modellerinin YSA'ya göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Karkalos ve Markopoulos (2017) yaptıkları çalışmada, 7017 Al alaşımının mekanik özelliklerinin tahmin edilmesi için bir YSA modeli geliştirmişler ve YSA'nın malzeme UTS değerlerini yeterli düzeyde doğrulukla tahmin etmede kullanılabileceğini göstermiştir. Zhang ve ark. (2019), 6181H18 Al alaşımının (AlSi1Mg0,8) UTS değerleri için geri yayımlı (BP) sinir ağının genelleme yeteneğini ve yakınsama oranını geliştirmek amacıyla parçacık sürü optimizasyonu (ATPSO) ve BP sinir ağının hibriti olan ATPSO-BP modeli kullanılmasını önermişlerdir. BP ve ATPSO-BP modelleri tarafından tahmin edilen 6181H18 Al alaşımının UTS değerlerini, ATPSO-BP modelinin kesinliğini doğrulamak için deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, ATPSO algoritmasının BP modelinin ağırlıklarının ve eşik değerlerinin optimizasyon yeteneğini arttırdığını göstermiştir. Başka bir çalışmada (Merayo ve ark., 2020), 3 girişli (sertlik, ısıl işlem ve kimyasal bileşim), YS ve UTS olan 2 çıkışlı 3 katmanlı bir YSA modeli kullanılarak çok çeşitli Al alaşımlarının plastik deformasyon davranışlarını incelenmiştir. Sonuçlar, tahmin edilen değerlerin rapor edilen deneysel değerlere %95 oranında yakın olduğunu göstermiştir. Saha ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, yaşlanabilir Al alaşımlarının (2XXX, 6XXX ve 7XXX) bileşimi ve ısıl işlem parametrelerinin modifikasyonu yoluyla mukavemeti geliştirmek için yapay zeka tabanlı bir hesaplamalı tasarım yaklaşımı kullanılmıştır. UTS, YS ve ϵ için veriye dayalı modellerin geliştirilmesi amacıyla alaşımlar ile ilgili yayınlanmış literatür verileri kullanılmıştır. Bulanık C ortalamalar kümesi, kümelemenin veri tabanındaki değişkenlerini farklı düzeylerde kümelemek ve bu değişkenleri ilişkilendiren bulanık kural oluşturmak için kullanılmıştır. ANFIS, alaşımların söz konusu özellikleri için veriye

dayalı bulanık tahmin modelleri geliştirmek için bulanık kuralları kullanılmıştır. Bu modeller daha sonra, alaşımları tasarlamak için sünekliği ve mukavemeti geliştirmeye yönelik çelişkili hedefleri ele almak için genetik algoritma (GA) kullanan çok amaçlı optimizasyon için amaç fonksiyonlarının rolünü oynamıştır. Üretilen Pareto çözümleri, amacı karşılayan uygun bileşim ve işlem parametrelerini bulmak için analiz edilmiştir. Son zamanlarda yapılan bir başka çalışmada (Mishra ve ark. 2021), A356 ve A357 Al alaşımlarını da içeren Al-Si-Mg alaşımlarının mekanik özelliklerinin tahmin çalışmalarında kullanılan çok katmanlı ileri beslemeli YSA'ya dayanan model sonuçları rapor edilmiştir. Alaşımın kimyasal bileşimleri, kullanılan modifiye edici, imalat teknikleri ve ısıl işlem parametreleri girdi olarak, ağırlık olarak ise UTS, YS, ϵ ve malzemenin sertliği seçilmiştir. Çalışmalarında, modelin etkin bir şekilde tahmin edilmesi için mevcut literatürden girdi-çıkış çiftleri toplanarak 112 veri seti oluşturulmuş ve tahmin edilen sonuçların bağıl hata değeri $\pm\%10$ aralığında çıkmıştır. Lan ve ark. (2022), A380 Al alaşımının Fe/Mn oranı, Sr içeriği, soğuma hızı ve gözeneklilik içeriğinin UTS ve ϵ arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için iki YSA modeli (BP-ANN ve PSO-BP-ANN) kullanmıştır. PSO-BP-ANN modelinin BP-ANN modelinden daha iyi güvenilirliğe ve tahmin doğruluğuna sahip olduğunu bildirilmiştir. Yarı mamül kütük Al alaşımları kullanılarak ML destekli alaşım tasarımı çalışmasına yönelik örnek başka bir çalışma Soofi ve ark. (2022) tarafından rapor edilmiştir. Bu çalışmada, kütük Al alaşımları için; UTS, YS, ϵ , sertlik, yorulma, korozyon direnci, gerilimli korozyon çatlama direnci, soğuk işlenebilirlik, işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik gibi gereken özellikler incelenmiştir. Çalışmada, 236 giriş içeren küçük kapsamlı bir veri seti derlenmiştir. Bu çalışmada, alaşım tasarımının gerçekçi küçük veri kümeleri üzerinde ML ve veri madenciliği tekniklerinin kullanılmasıyla desteklenebileceğini göstermiştir. Gaikwad ve Chinchani (2022) tarafından yapılan çalışmada, sürtünme karıştırma kaynaklı AA7075-T651'in UTS, kaynak dolgusundaki mikro sertlik ve kaynak dikişindeki yüzey pürüzlülüğü için tahmin modeli geliştirilmiştir. Modellerin geliştirilmesinde ANFIS kullanılmıştır. Modeller üçgen, yamuk, Gauss ve genelleştirilmiş çan üyelik fonksiyonları kullanılarak geliştirilmiş ve tahmin edilen değerler karşılaştırılmıştır. UTS, kaynak dolgusundaki mikro sertlik ve yüzey pürüzlülüğü için doğrulama deneyinden sonra elde edilen gözlemlenen değerler, tahmin edilen ANFIS çıktısına yakın olduğu rapor edilmiştir.

Döküm parametrelerinin tahmininde Zhang ve ark. (2012) tarafından A356 Al alaşımı için LPDC proses değişkenlerinin (döküm ve kalıp sıcaklığı, uygulanan basınç

hızı) YSA ve Genetik Algoritma (GA) yönteminin kombinasyonu kullanılarak optimizasyonu çalışılmıştır. Sonuçlar, YSA/GA yönteminin birleştirilmesinin, LPDC parçalarının süreç parametreleri ve parça kalite indeksi arasındaki karmaşık ilişkiyi haritalamak için etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Makalede önerilen modelleme ve optimizasyon yöntemlerinin karmaşık endüstriyel uygulamalarda büyük potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir. Haghdadi ve ark. (2013), döküm A356 Al alaşımının döküm akış davranışını tahmin etmek için YSA modelini kullanmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, eğitilmiş YSA modelinin, döküm A356 Al alaşımının yüksek sıcaklıkta akış davranışını tahmin etmek için kullanılabilecek sağlam bir araç olduğunu göstermiştir. Kocaman ve ark. (2021), çalışmasında, AlSi10Mg döküm alaşımlarında tane boyutunu kontrol etmek için bir YSA modeli uygulanmıştır. Model için girdi olarak, tane inceltici miktarı, bekletme süresi ve dökme sıcaklığı gibi tane inceltme parametreleri dikkate alınmıştır. Modelleme ile deneysel ölçümler ve model tahmini arasında ortalama mutlak yüzde hatanın 0.99'da olduğu rapor edilmiştir. Uyan ve ark. (2023), döküm A356 Al alaşım jantlarda gözeneklerin oluşumunda döküm parametrelerinin etkisini anlamak için Extreme Boosted Karar Ağacı (XGBoost) modelini uygulamışlardır. XGBoost sınıflandırma algoritması, proses koşulları (kaplama kalınlığı) ile kusurlu jantların oluşturulması arasındaki karmaşık ilişkiyi haritalandırmak için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, XGBoost modelinin, sağlam parçalar için %87 doğruluk ve kusurlu parçalar için %74 doğrulukla tahmin ettiğini rapor etmişlerdir.

Al alaşımlarının işlenebilirlik tahmini üzerine yapılan çalışmada Hossain ve Ahmad (2014) Al'un frezelemesinde 49 eğitim verisi ile kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi için tahmin modelleri geliştirmek amacı ile YSA, RSM, ANFIS ve teorik denklemler kullanmışlardır. 25 test verisi ile tüm tahmin modellerinin doğruluğunu test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda ise ANFIS modelinin, eğitim ve test verileri için ortalama karekök hatası (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hatasının (MAPE) en küçük değeri verdiği için daha iyi tahmin modeli olarak seçildiğini ifade etmişlerdir.

Alüminyum sacların şekillendirilebilirliği, Kannadasan ve ark. (2017) tarafından Gerilme-gerinme, düzlemsel gerinim ve çekme-sıkıştırma gibi farklı durumlarda oluşan sınır gerinimleri kullanılarak YSA ve ANFIS kullanılarak optimizasyonu yapılmıştır. YSA tarafından tahmin edilen gerinim değerleri kullanılarak şekillenebilir limit eğrileri (FLD) oluşturulmuştur. Öngörülen gerinim değerleri, deneysel gerinim değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, deneysel FLD YSA tarafından tahmin edilen FLD ve ANFIS tarafından tahmin edilen FLD'nin iyi bir uyum içinde olduğunu ortaya koymuştur.

Literatür, YSA ve ANFIS yaklaşımının mühendislik ve bilimsel uygulamalar için AI alarımının özelliklerinin modellenmesi, tahmin edilmesi ve optimizasyonu için iyi modelleme araçları olduğunu işaret etmekle birlikte, yukarıdaki çalışmalardan elde edilen çıkarım; ANFIS'in çoklu girdi ve çıktılarla doğrusal olmayan ilişkinin tahmininde daha iyi performans gösterdiği yönündedir.



3 MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Veri Seti

A357 Al alaşımının eğitim veri seti (toplam 215) ve test seti (toplam 50) için her bir alaşıma ait veriler Er Döküm A.Ş. ve MCM Savunma ve Makine Ltd.'den temin edilmiştir. Bu çalışmada, 710°C'de LPDC yöntemiyle dökülen parçaların işlem parametreleri; modifiye edici olarak Sr, tane inceltici olarak Ti, gaz giderici olarak N2 kullanılan, homojenizasyon işlemi (540°C, 10h) ve T6 yaşlandırma işlemi (170°C, 6h) uygulanan döküm parçalar dikkate alınmıştır. Firmalardan alınan döküm parçalara ait kimyasal bileşimler (Si, Mg, Fe, Cu ve Ti % ağ.) ve mekanik özellikleri (UTS, YS ve ϵ) Excel programında veri seti olarak işlenmiştir.

Veri setinde kullanılan çekme numunelerine ait veriler gerçek döküm parçalardan işlenerek elde edilen verilerdir. Şekil 3.1'de HGK ve LGK kitlerine ait gerçek döküm parçalarına ait görseller verilmiştir. Döküm parçalar T6 yaşlandırma işleminden önce homojenleştirildiklerinden çekme numunelerinin parçaların kesitlerinden bağımsız olarak benzer çekme özellikleri vermesi gerektiğine dikkat edilmelidir.



Şekil 3.1. HGK ve LGK kitlerine ait döküm parçaları

3.2 Döküm İşlemi

Eğitim ve test verileri gerçek döküm parçalardan işlenen numunelerden elde edildiğinden, ML tahmin sonuçları ile karşılaştırılması amacıyla sınırlı sayıda standart

çekme çubuğu dökümü Er-Döküm A.Ş.'de yapılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında 710°C döküm sıcaklığında metal kalıba dökümler yapılarak silindirik çekme numuneleri üretilmiştir. Döküm işlemi LPDC işlemi için hazırlanan alaşım özel ergitme ocağında ergitildikten sonra 300 kg kapasiteye sahip taşıma potasına alınmıştır. Ergitme ocağından taşıma potasına alınan ergiyik A357 Al alaşımı, döner gaz giderme sisteminde bulunan döner çarkın ergiye uygulanan N₂ gazı 3 dk. boyunca üflenerek sıvı metal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Temizlenen sıvı metal, 1 ton kapasiteye sahip Kurtz marka LPDC makine haznesine dökülmezden hemen önce, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, bir poşement yardımıyla metal çekme numunesi kalıbına dökümü gerçekleştirilmiştir. Standart çekme numuneleri 6mm çapında ve 120mm uzunluğunda dökülmüştür. Şekil 3.3'de dökümü yapılan deney numunelerinin fotoğrafları verilmiştir.

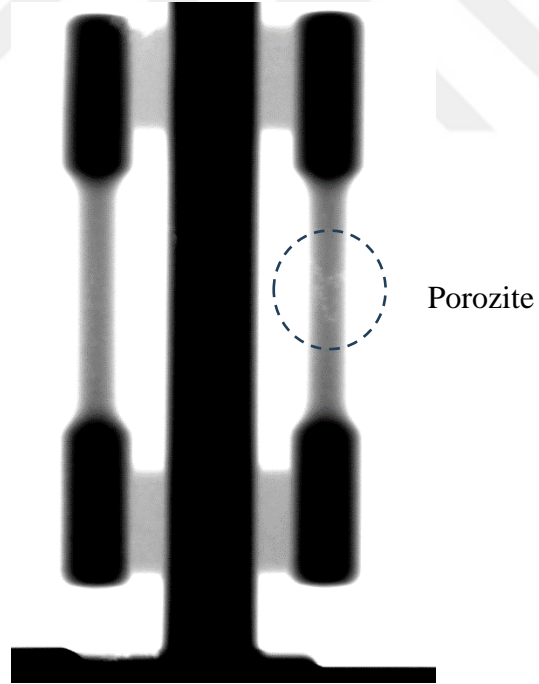
Çekme testi sırasında beklenmedik arızaları önlemek amacıyla dökümlerdeki iç kusurları sınıflandırmak için Er-Döküm A.Ş.'de radyografik inceleme yapılmıştır. Şekil 3.4'de A357 Al alaşımına ait hatalı ve sağlam radyografi muayene görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.2. A357 Al alaşımı standart numune döküm işlemi



Şekil 3.3. Dökümü yapılan A357 Al alaşımı standart deney numuneleri



Şekil 3.4. A357 Al alaşımına ait dijital röntgen muayene sonuçları (örnek sağlam ve hatalı numune)

Er Döküm AŞ'den temin edilen standart çekme çubukları, döküm (A357-DKS) ve T6 ısıl işlemlili (A357-T6S) olarak kodlanmıştır. Ayrıca, MCM Savunma Ltd'den deneysel çalışmalarda standart numunelerle kıyaslama amaçlı çekme ve mikroyapı çalışmaları için (veri setinden ayrı olarak) gerçek döküm parçalardan alınan döküm hali

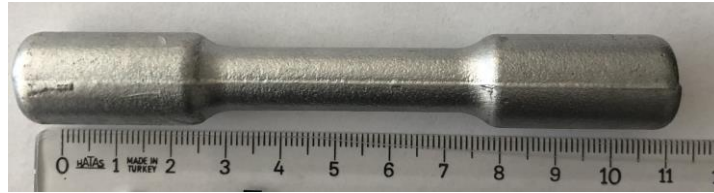
(A357-DK) ve T6 ısıtma işlemi uygulanmış (A357-T6) numuneler temin edilmiştir. Çizelge 3.1, Optik Emisyon Spektroskopik (OES) yöntemi ile elde edilen A357 Al alaşımı numunelerine ait kimyasal kompozisyonu göstermektedir.

Çizelge 3.1. A357-DK ve A357-DKS alaşımlarının kimyasal bileşimi (% ağırlık)

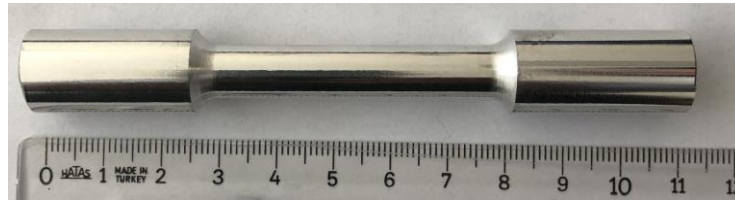
Alaşım	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Al
A357-DK	6,51	0,54	0,12	0,02	0,15	Kalan
A357-DKS	7,40	0,64	0,08	0,009	0,19	Kalan

3.3 Isıl İşlem

Dökülen standart çekme numunelerine homojenleştirme ve T6 ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Şekil 3.5 (a)'da A357 Al alaşım numunesine ait döküm ve T6 ısıtma işlemi uygulanmış çekme çubuğu, Şekil 3.5 (b)'de ise çubuğun çekme işlemi öncesi ASTM E8/E8M'ye uygun olarak işlenmiş fotoğrafları görülmektedir. Çekme çubuklarına ilk olarak 540°C'de 10 sa. süre ile ısıtma işlemi uygulanmıştır. Homojenleştirme işlemi sonrası numuneye oda sıcaklığında su verilmiştir. Daha sonra numuneler 170°C'de 6 sa. T6 (yaşlandırma) ısıtma işlemine tabi tutulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3.5. Döküm test çubuğu (a) ve ASTM E8/E8M'ye uygun olarak işlenmiş çekme deney numunesi (b)

3.4 Mikroyapı Analizleri

Mikroyapı karakterizasyonu için optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskopları (SEM) kullanılmıştır.

Hem döküm hem de T6 ısıtma işlemi görmüş silindirik çekme çubuğundan elde edilen numuneler, metalografik numune hazırlığına başlamadan önce 6mm çapında 5mm

kalınlığında kesilmiştir. Mikroyapısal inceleme çalışmalarının gerçekleştirilmesi için soğuk kalıba alma, zımparalama (400, 600, 800, 1000, 1200 mesh zımparalar) ve parlatma (6-1 μm elmas solüsyon) işlemlerinden sonra numuneler dağlanmıştır. Dağlayıcı olarak Keller (1 ml HF, 1ml HCl, 2,5 ml HNO₃, 95 ml saf su, 5 ml) kullanılmıştır.

Dağlanan numunelerin Olympus marka (GX41) optik mikroskop ile farklı büyütme oranlarında (100, 200, 500 ve 1000) mikroyapı görüntüleri alınmıştır.

Mikroyapıda bulunan fazların daha detaylı incelenmeleri için Hitachi-SU1510 marka SEM ile sekonder elektron (SE) ve geri saçılan elektron dedektörü (BSED) kullanılarak görüntüler alınmıştır. Fazların element konsantrasyonlarını tespit etmek amacıyla alansal EDS analizler alınmıştır.

3.5 Mekanik Testler

3.5.1 Sertlik Testi

Brinell (HB) sertlik ölçümleri soğuk kalıba alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir ve sertlik ölçümü öncesinde numuneler yukarıda açıklandığı gibi metalografik hazırlık işlemlerinden geçmiştir. Sertlik ölçümü Emcotest-Durascan G5 (Brinell ve Vickers) marka sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Brinell sertlik ölçümü için numunenin yüzeyine toplamda 62,5 kgf yük uygulanmıştır. Her bir numuneden 10 adet ölçüm alınmıştır ve sonuçların değerlendirilmesinde elde edilen verilerin ortalaması kullanılmıştır.

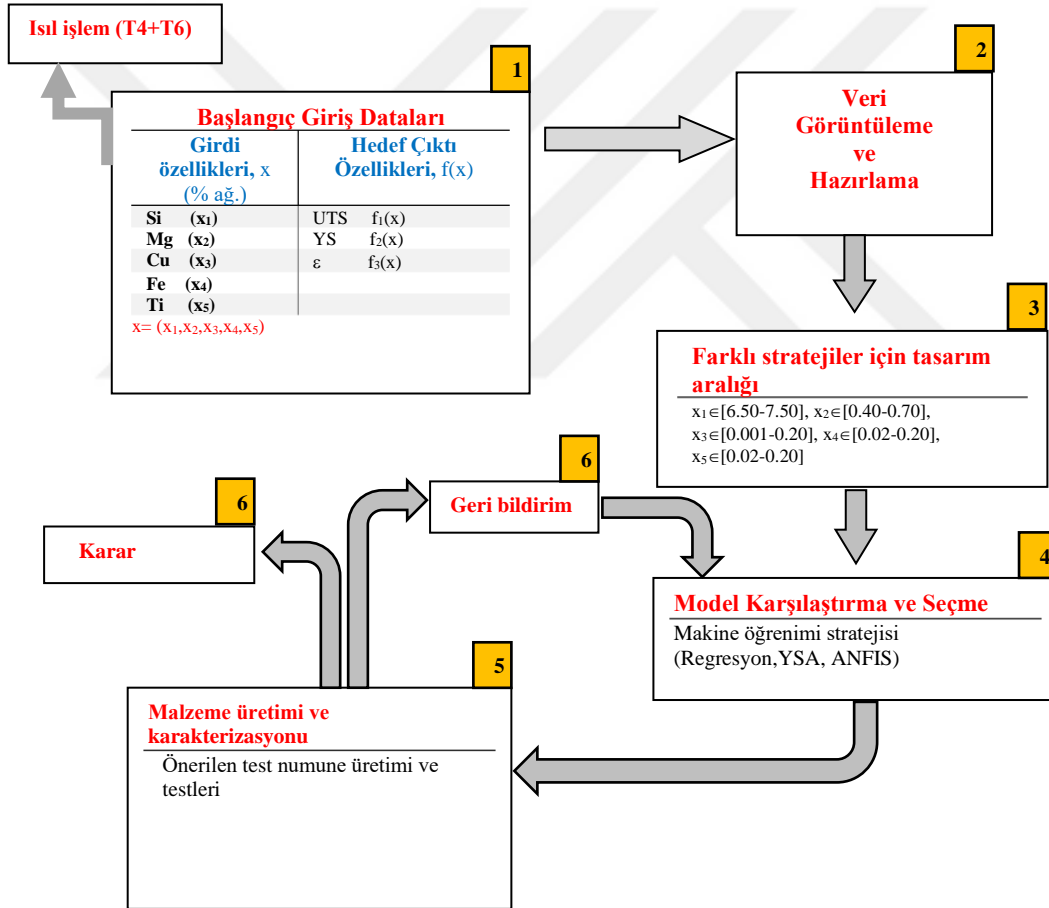
3.5.2 Çekme Testi

Silindirik çekme numunelerinin YS (MPa), UTS (MPa) ve ϵ (%) uzama özelliklerinin belirlenmesi için çekme testleri Shimadzu AGS-X (100 kN) çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri sırasında % uzama değerlerinin doğru tespit edilebilmesi için Epsilon marka ekstensometre kullanılmıştır. Silindirik çekme çubukları için gerçekleştirilen çekme testleri, ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Uygulanan çekme hızı standart kapsamında 0,6 mm/dk olarak belirlenmiştir. Çekme deneyleri dörder numune üzerinden gerçekleştirilmiş olup sonuçların değerlendirilmesinde elde edilen verilerin ortalaması kullanılmıştır.

3.6 Makine Öğrenmesi Yöntemleri

3.6.1 Materyal Öğrenme Döngüsü

Şekil 3.6'da ML yöntemlerinin kullanıldığı materyal öğrenme döngüsü verilmiştir. Öğrenme döngüsü, Şekil 3.6'da gösterilen altı bölüme ayrılmıştır. (1) İlk veri tabanı, farklı bileşimlerdeki numuneler için ısıtılardan sonra mekanik özellikler, (2) veri görüntüleme ve hazırlama, (3) farklı stratejiler için tasarım aralığı, (4) model karşılaştırma ve seçme, (5) yöntemin önerdiği numunelerin üretilmesi ve (6) beklenen özellikler elde edilirse işlem durur; aksi takdirde, yeni model seçilerek işlem yeniden başlatılır.



Şekil 3.6. Materyal öğrenme döngüsü

Bu çalışmada aşağıda verilen ML yöntemleri kullanılmıştır:

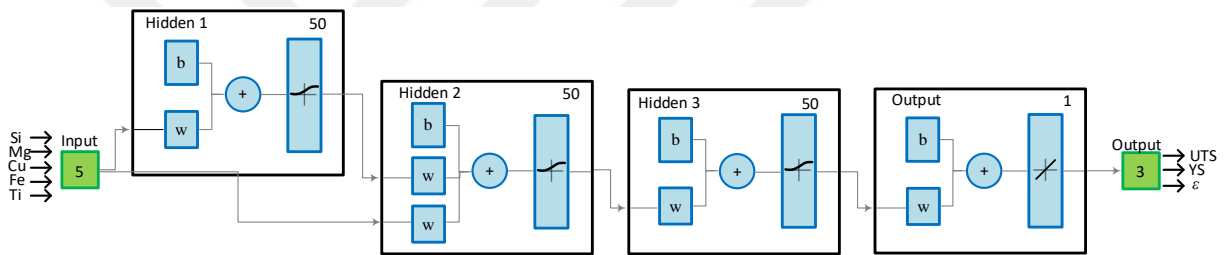
- Regresyon algoritmaları
- YSA ve,
- ANFIS.

3.6.2 Regresyon Algoritmaları

Regresyon algoritmaları için MATLAB programında 265 satır veri setindeki A357 Al alaşımı kompozisyonundaki 5 elementin (Si, Mg, Cu, Fe, Ti) ağırlıkça % değerleri girdi olarak ve UTS, YS ve ϵ değerleri ise çıktı olarak tanımlanmıştır.

3.6.3 YSA

Makine öğrenmesi yöntemlerinden YSA ile A357 Al alaşımı kompozisyonundaki 5 elementin (Si, Mg, Cu, Fe, Ti) ağırlıkça % değerleri girdi katmanı olarak, UTS, YS ve ϵ değerleri ise aynı anda çıktı katmanı olarak belirlenmiştir. Girdi katmanı ile çıktı katmanı arasında 50 adet nörona sahip 3 ara katman ile YSA modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.7). Oluşturulan YSA modeline ilişkin parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.7 YSA modeli

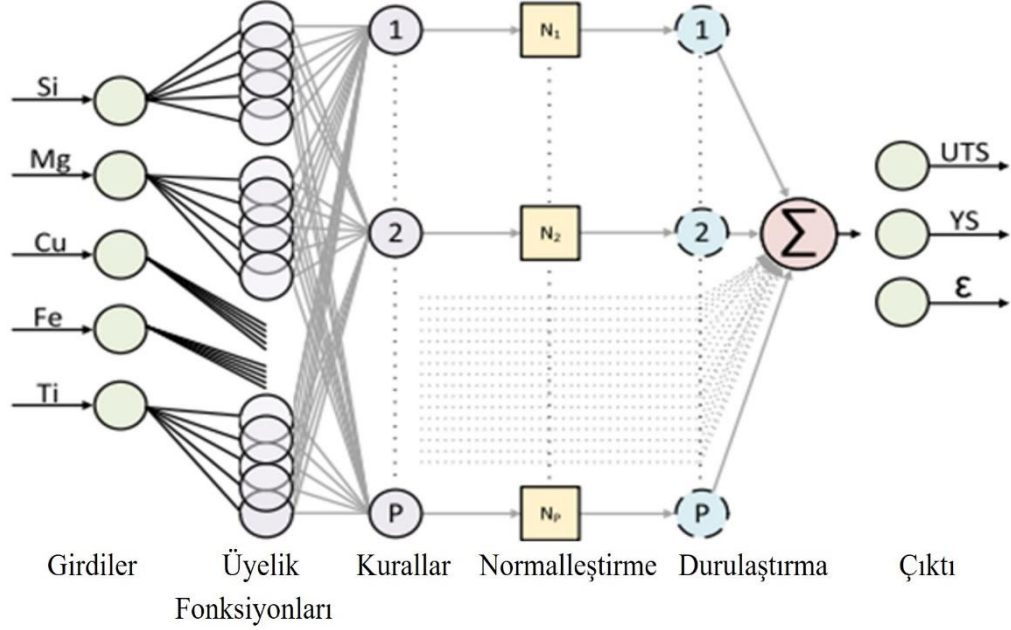
Çizelge 3.2. YSA modeli parametreleri

YSA	Parametre
Eğitim Algoritması:	Lavenberg-Marquardt
Eğitim Performans Kriteri:	Ortalama Kareler Hatası
Epoch:	9

3.6.4 ANFIS Yönteminin Tasarımı

Al alaşımlarının mekanik özelliklerini tahmin etmek için literatürde (Liu ve ark., 2017) (Karkalos ve Markopoulos, 2017) (Bock ve ark., 2019) (Li ve ark., 2020) (Mishra ve ark., 2021) çeşitli ML yöntemleri bulunmaktadır. Ancak doğru bir tahmin elde etmek, filtrelenmemiş veri gürültüsü, yetersiz veri sayısı ve/veya yetersiz özdeğerler gibi çeşitli problemler nedeniyle zorlu bir iştir. Bu nedenle, bu çalışmada, en iyi performansa sahip algoritma olması nedeniyle ANFIS yöntemi önerilmiştir.

Bu çalışmada, Sugeno FIS yaklaşımını (Jang, 1993) temel alan ANFIS uygulanmasıyla hem FIS hem de YSA'nın avantajlarından yararlanılmıştır. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi ANFIS'in yapısı; Girdiler ile Üyelik Fonksiyonları (MF'ler), Kurallar, Normalleştirme, Durulaştırma ve Çıktı olmak üzere 5 bölümden oluşmaktadır: UTS, YS ve ε değerlerinin tahmininde bağımsız ve dağıtılmış yapı kullanılmış ve ANFIS modeli, çıktı değerleri olan UTS, YS ve ε için ayrı ayrı eğitilmiştir.



Şekil 3.8. Uyarlanabilir Nöro-Bulanık yapı.

ANFIS modeli için seçilen girdiler, modelin özelliklerini tanımlayan A357 Al alaşımındaki Si, Mg, Cu, Fe ve Ti elementlerinin ağırlıkça yüzde (%ağ.) değerleridir.

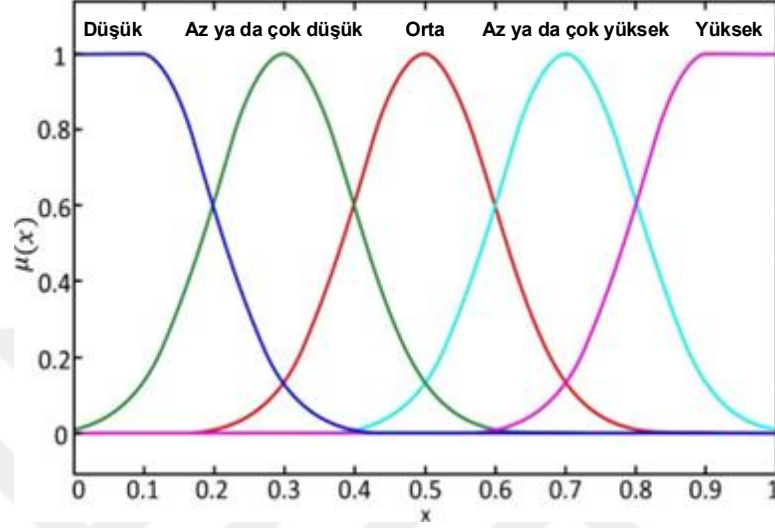
Her bir giriş için, i düğümünün çıkışı, bulanık kümenin üyelik fonksiyonuna karşılık gelir ve bu fonksiyon Denklem (28) deki gibi hesaplanır;

$$O_i^1 = \mu_x(x) \quad (28)$$

burada, $\mu_x(x)$, " x " giriş değeri için ilgili bulanık kümeyle ilişkili üyelik fonksiyonunu temsil eder.

Her değişkenin alanı 5 bulanık alt kümeye bölünmüştür. Üyelik derecesini temsil etmek için yamuk, üçgen, çan şeklinde ve Gauss fonksiyonları dahil olmak üzere çeşitli üyelik fonksiyonları kullanılabilir (Bkz. Bölüm 2.3.3.2). Bu çalışmada basitliği nedeniyle

Gauss üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Şekil 3.9, ANFIS modelinde kullanılan simetrik olarak dağıtılan ve beş önceki üyelik fonksiyonunu içeren Gauss üyelik fonksiyonlarını vermektedir. Bu üyelik fonksiyonları, düşük, az ya da çok düşük, orta, az ya da çok yüksek ve yüksek gibi dilsel bulanık değişkenlerle karakterize edilir.



Şekil 3.9 Gaussian üyelik fonksiyonları

ANFIS modelinde toplam $5^5 = 3125$ kural yer almaktadır. Ek olarak, doğrusal veya sabit bir çıktı değeri elde etmek için Takagi-Sugeno-Kang (TSK) bulanık modeli uygulanmıştır. TSK modeli Mamdani bulanık modeline kıyasla daha hızlı hesaplama süresi sunmaktadır.

Aşağıdaki algoritma, IN, OUT ve MF'nin sırasıyla giriş, çıkış ve üyelik fonksiyonlarını temsil ettiği bulanık kuralı sunmaktadır. (Denklem (29)) Her üyelik fonksiyonu, her giriş değeri için $(.)x$ ile gösterilir.

$$X \leftarrow [1,5]$$

if $(IN_1\mu_x)$ **and** $(IN_2\mu_x)$ **and** $(IN_3\mu_x)$ **and** $(IN_4\mu_x)$ **and** $(IN_5\mu_x)$ **then** f_i
end if (29)

Kuralların tetiklenmesini, durulaştırmadan önce sonuçların normalleştirilmesi takip eder. Normalizasyon formülü Denklem (30)'da verildiği gibidir. P 'nin 1 ile 3125 arasında değiştiği tetikleme kurallarını temsil etmek için N_p 'yi kullanır. Normalleştirme işleminde eğitim veri çıkışının ortalaması (μ) ve standart sapması (σ) kullanılır.

$$N_p = \frac{OUT_p - \mu}{\sigma} \quad (30)$$

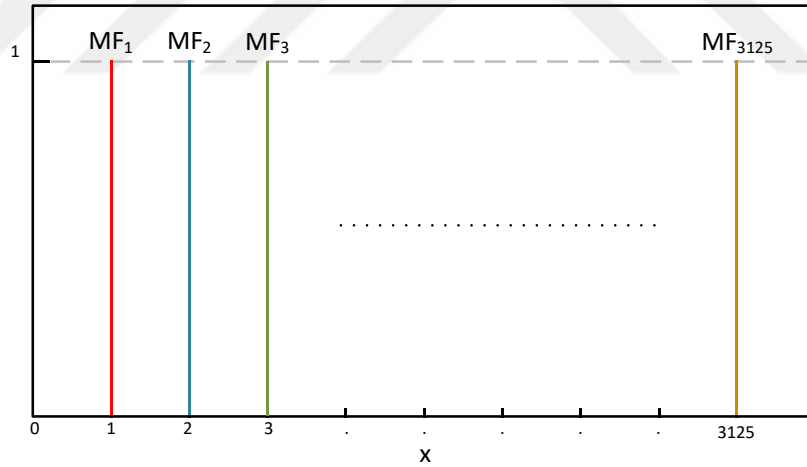
$$O_i^2 = \mu_{A_i}(x) = \exp \left\{ - \left(\frac{x-c_i}{a_i} \right)^2 \right\} \quad (31)$$

$$O_i^3 = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sum \bar{\omega}_i f_i} \quad (32)$$

$$O_i^4 = \bar{\omega}_i f_i \quad (33)$$

$$O_i^5 = \sum \bar{\omega}_i f_i \quad (34)$$

burada $\bar{\omega}_i$ normalize edilmiş tetikleme güçleridir ve f_i fonksiyonlardır. Normalleştirme sonrasında kuralların sonuç kısımları, Denklem (31-34), kullanılan sonuç parametrelere karşılık gelen net tekillikle tanımlanır. Şekil 3.10, kuralların çıktılarının 0 ile 1 arasında ölçeklendirildiği durulaştırmayı ve bunun sonucunda ortaya çıkan çıktıları göstermektedir. Eğitim sürecini geliştirmek ve modelin performans kriterini iyileştirmek için çapraz doğrulama dahil edilir ve bu da modelin Ortalama Karekök Hatasında (RMSE) bir azalmaya neden olur.



Şekil 3.10. Durulaştırma ve sonuç çıktıları

Çizelge 3.3'de spesifik ayrıntıları ve değerleri verilen ANFIS tasarımının, eğitim ve test veri boyutu, çevrim sayısı, RMSE, çapraz doğrulama yöntemi (10-K Folding) ve kullanılan Gauss üyelik fonksiyonu verilmiştir.

Çizelge 3.3. ANFIS tasarımının özellikleri

Özellikler Değeri	Değer
Eğitim Verisi:	215
Test Verisi:	50
Epoch:	10
Üyelik Fonksiyonu:	5 Gaussian

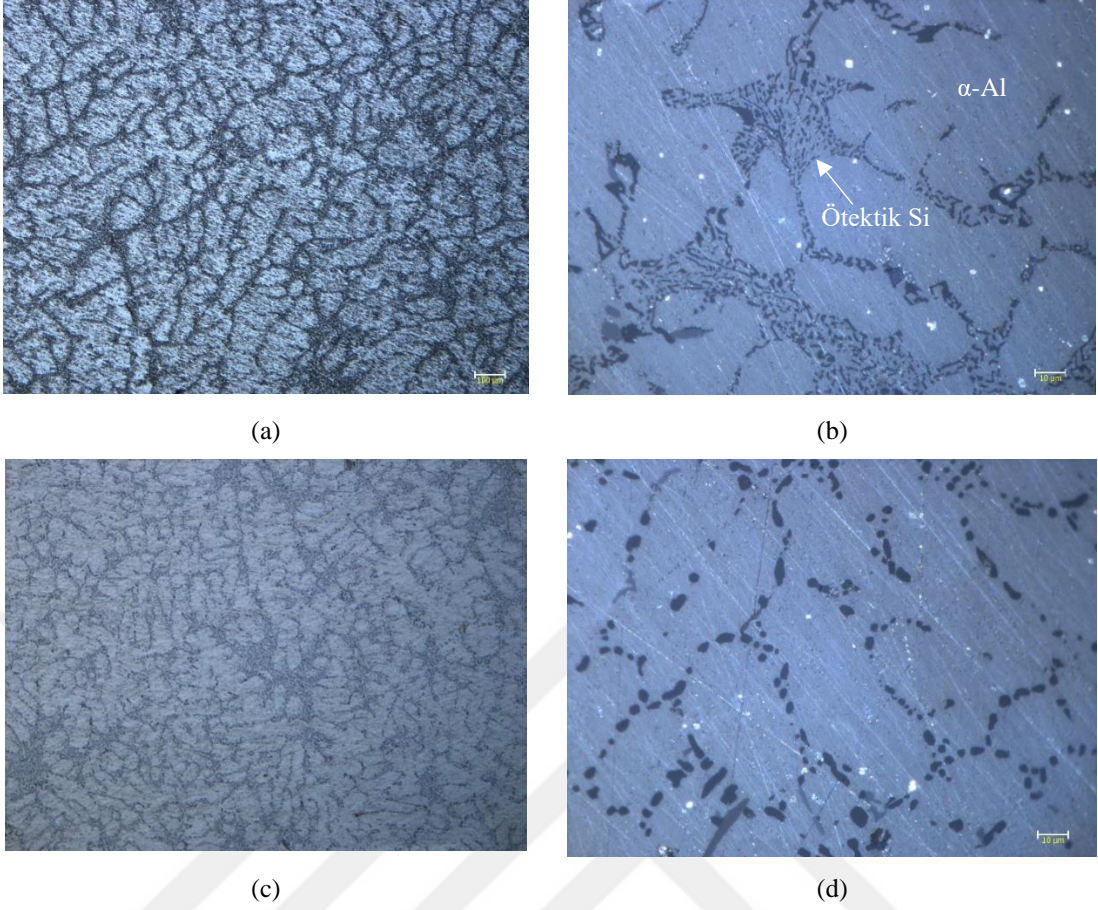
Bu çalışmada ANFIS modeli MATLAB kullanılarak tasarlanmıştır. Doğrudan bir araç kutusu kullanmak yerine esneklik ve istenilen yöntemlerle birleştirilmesi nedeniyle Matlab fonksiyonu oluşturulmuştur.



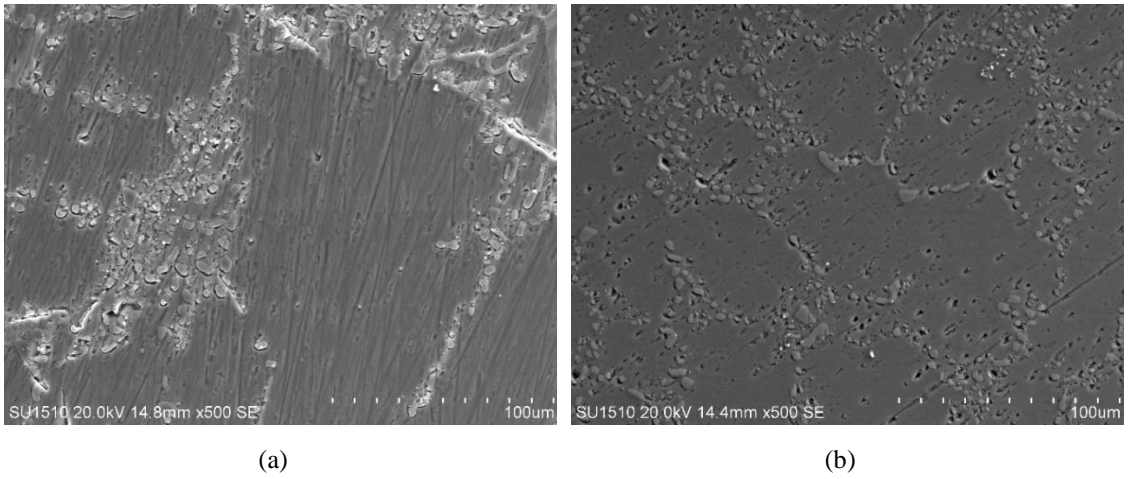
4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

4.1 Mikroyapı Sonuçları

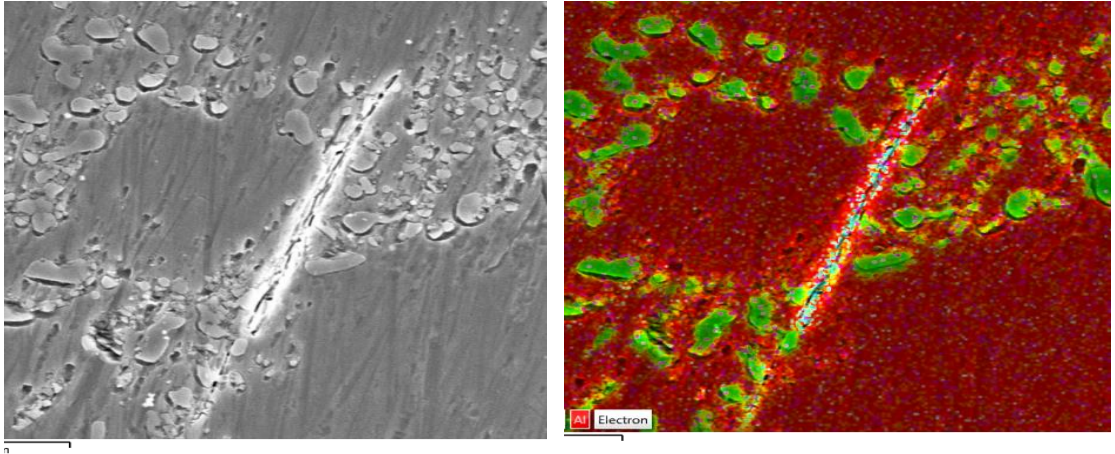
A357 Al alaşımına ait gerçek parçaların döküm (A357-DK) ve T6 ısıl işlem (A357-T6) sonrası 10X ve 100X büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.1 (a-d)'de verilmiştir. A357-DK mikroyapısı dendritik birincil α -Al fazı ile Al-Si ötektik yapıdan (Şekil 4.1 a-b) meydana geldiği görülmektedir. Isıl işlem uygulaması sonucu söz konusu dendritik yapının değiştiği gözlenmiştir (Şekil 4.1 c-d). Tüm mikrograflar Si parçacıklarının aynı şeklini temsil ettiğinden, OM görüntülerini inceleyerek faz varyasyonlarını belirlemek ve farklı morfolojideki fazları ayırt etmek zordur. Bu nedenle, SEM ve EDS analizleri ile mikroyapı çalışmaları detaylandırılmıştır. Şekil 4.2 (a) A357-DK ve Şekil 4.2 (b) ise A357-T6 alaşımına ait SEM mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.1 (d), Şekil 4.2 (b) gösterildiği gibi, ötektik Al-Si fazının, T6 ısıl işleminden sonra daha küçük kısmen küresel morfolojiye dönüştüğü gözlenmiştir. A357-DK alaşımının SEM-EDS analizleri Şekil 4.3 (a-f)'de gösterilmektedir. Mikroyapıda Si fazları yanında çok seyrekte olsa iğne benzeri fazlar da gözlenmiştir (Şekil 4.3 a). EDS analizi iğne benzeri bu fazların Fe açısından zengin olduğunu göstermiştir (Şekil 4.3 f). T6 ısıl işlemi uygulanmış alaşıma ait SEM-EDS analizleri Şekil 4.4 (a-f)'de verilmiştir. Burada, gri renkte ve yüzeye aynı seviyede bulunan kısmen küresel parçacıklar Si fazları iken (Şekil 4.4 a,d) küresel siyah noktalar ise Mg içerikli fazları (Şekil 4.4 a,e) işaret etmektedir. A357-DK alaşımı ile kıyaslandığında iğne benzeri Fe'ce zengin fazın (Şekil 4.4 a,f) ısıl işlem sonucu A357-T6 alaşımında, Şekil 4.4 (a) ve Şekil 4.4 (f)' görüldüğü, gibi sivri uçlarının oval bir yapıya dönüştüğü gözlenmiştir.



Şekil 4.1. A357-DK (a,b) ve A357-T6 (c,d) numunelerinin 10X ve 100X optik mikroskop görüntüleri

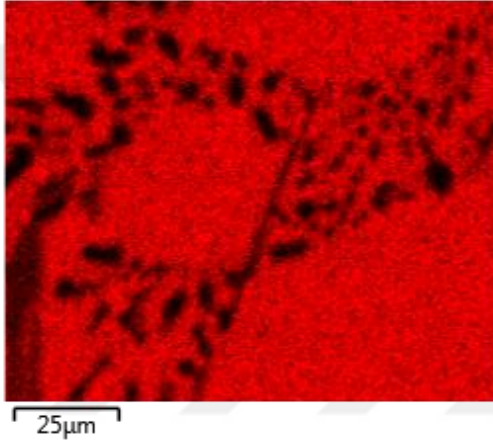


Şekil 4.2. A357-DK (a) ve A357-T6 (b) numunelerinin SEM mikroyapısı

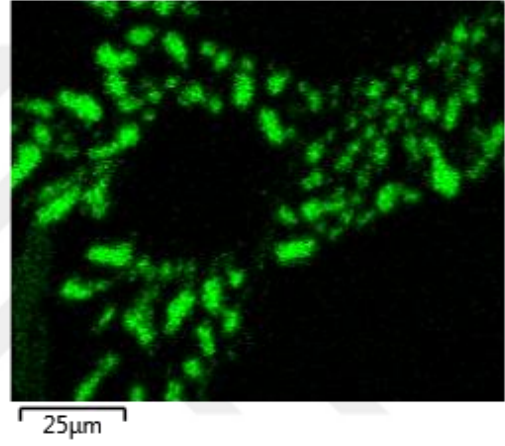


(a)

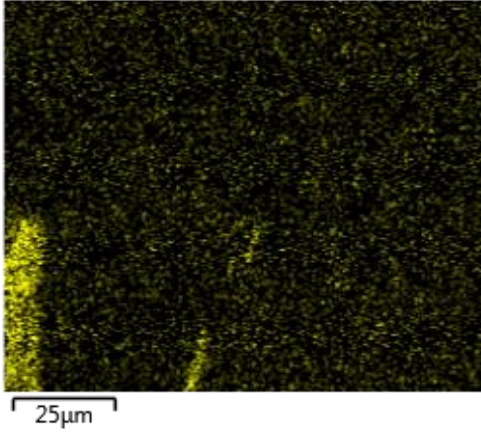
(b)

Al K α 1

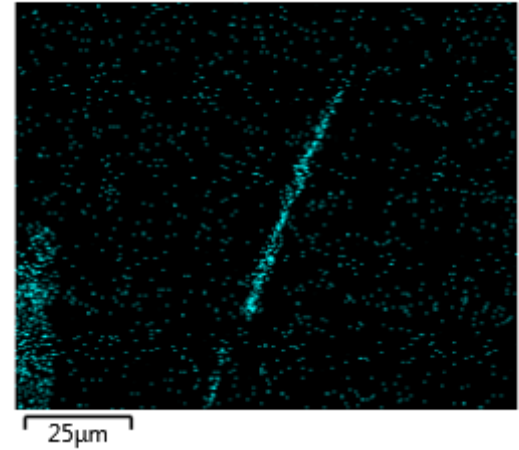
(c)

Si K α 1

(d)

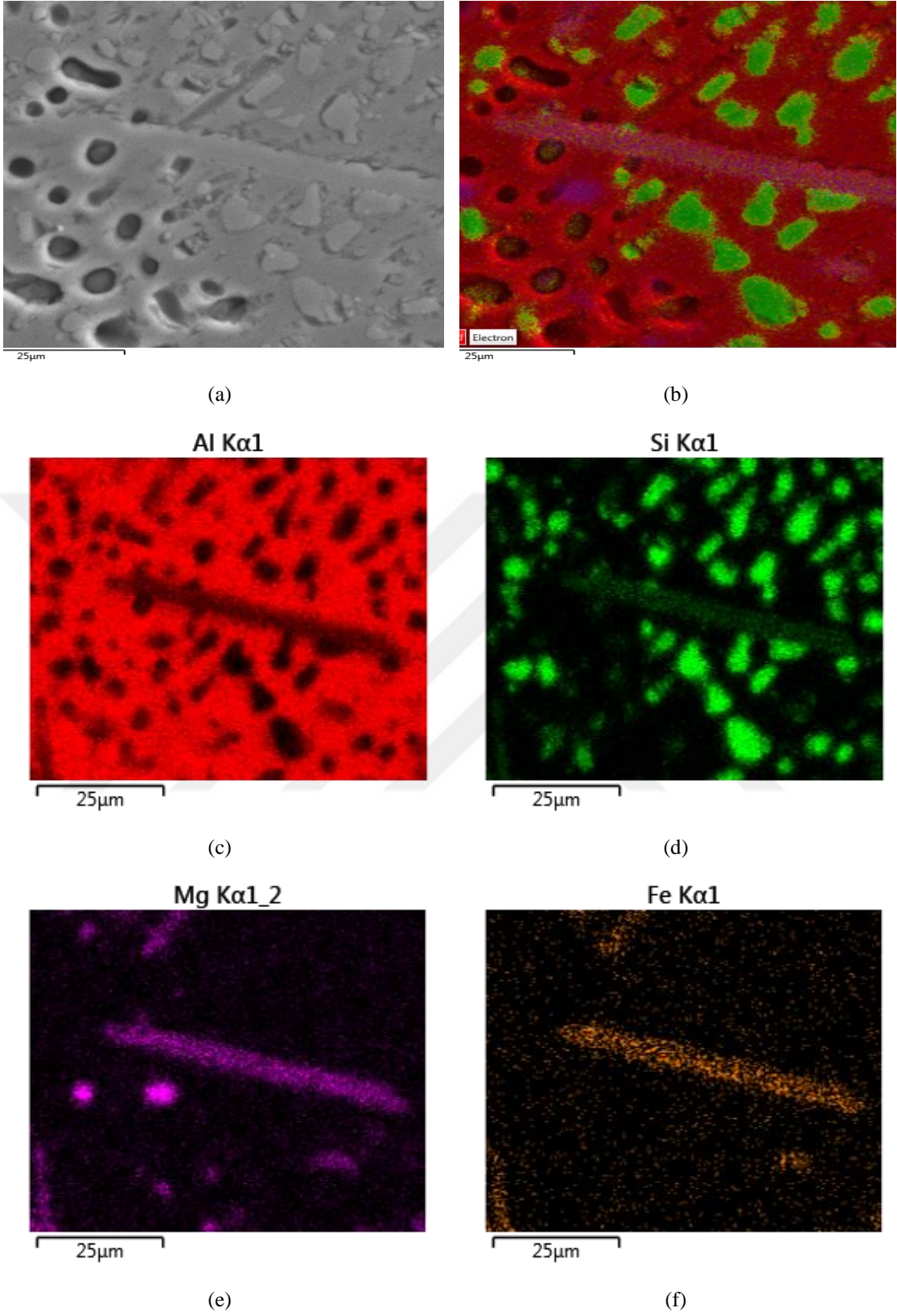
Mg K α 1_2

(e)

Fe K α 1

(f)

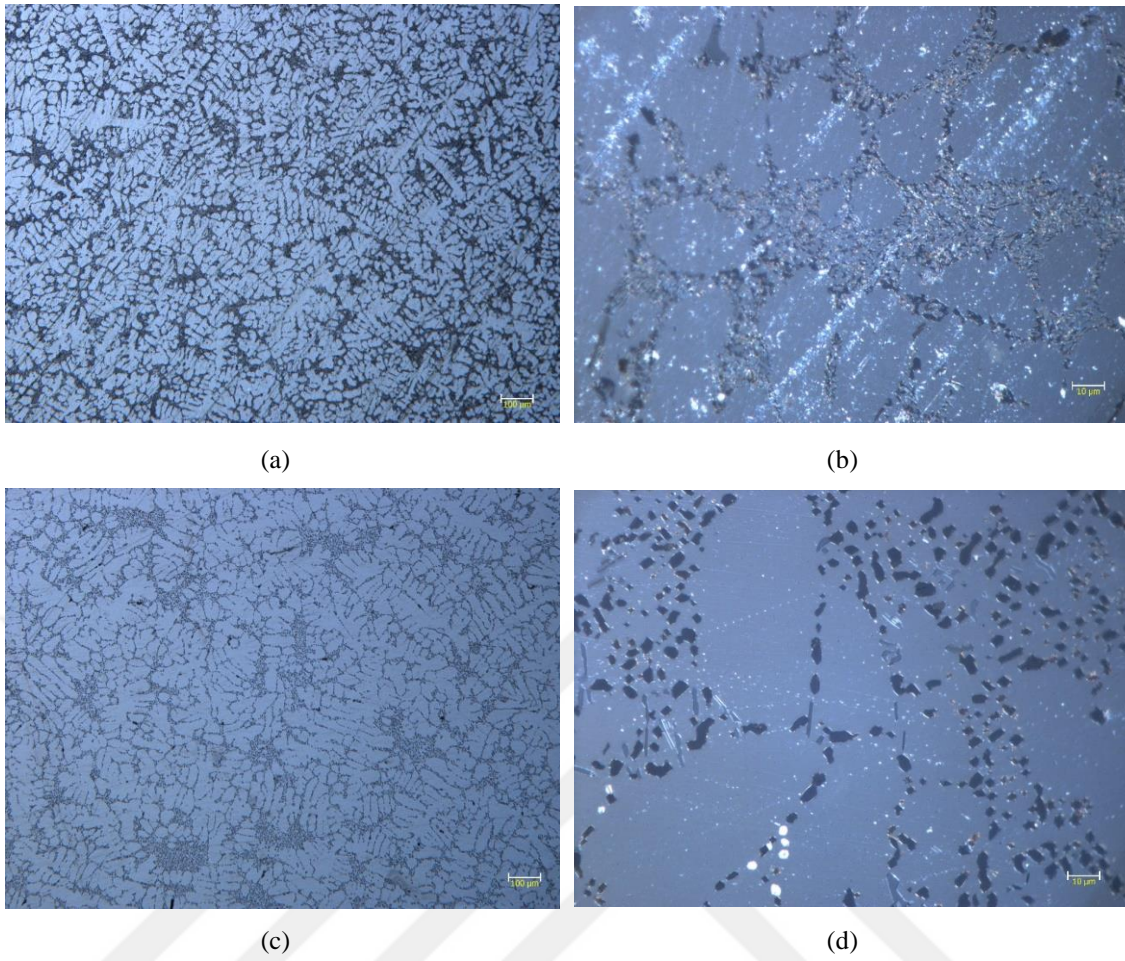
Şekil 4.3. A357-DK alaşımının SEM-EDS elementel dağılımı



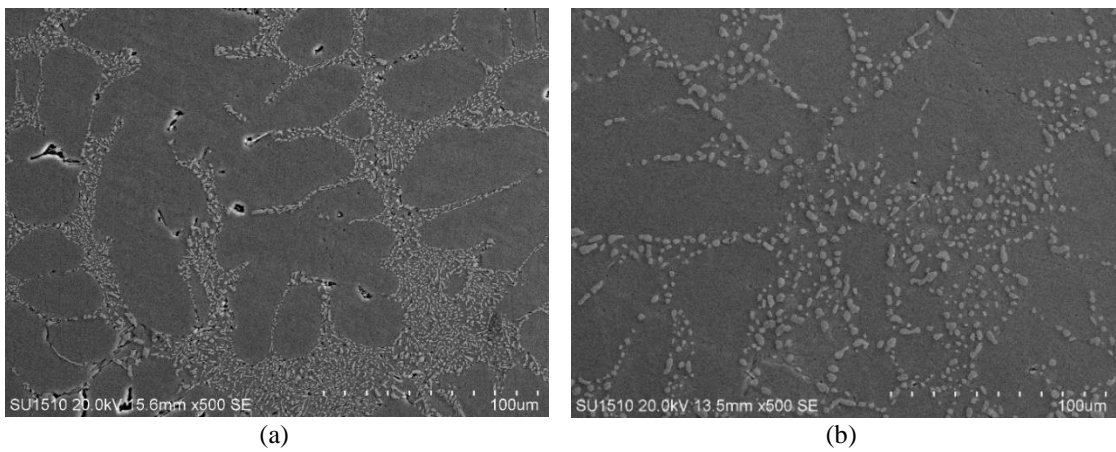
Şekil 4.4. A357-T6 alaşımının SEM-EDS elementel dağılımı

Standart çekme deney çubuğundan alınan A357 Al alaşımına ait numunenin döküm (A357-DKS) ve T6 ısıl işlem (A357-T6S) sonrası optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.5 (a-d)'de verilmiştir. Şekil 4.5 (d)'de görüldüğü gibi ötektik Si, T6 işleminden sonra ince ve kısmen küresel forma dönüşmüştür. Aynı zamanda, SEM mikroyapı incelemelerinde ötektik Si fazının ısıl işlem sonrası kısmen küresel forma dönüştüğü daha net görülebilmektedir (Şekil 4.6 a,b).

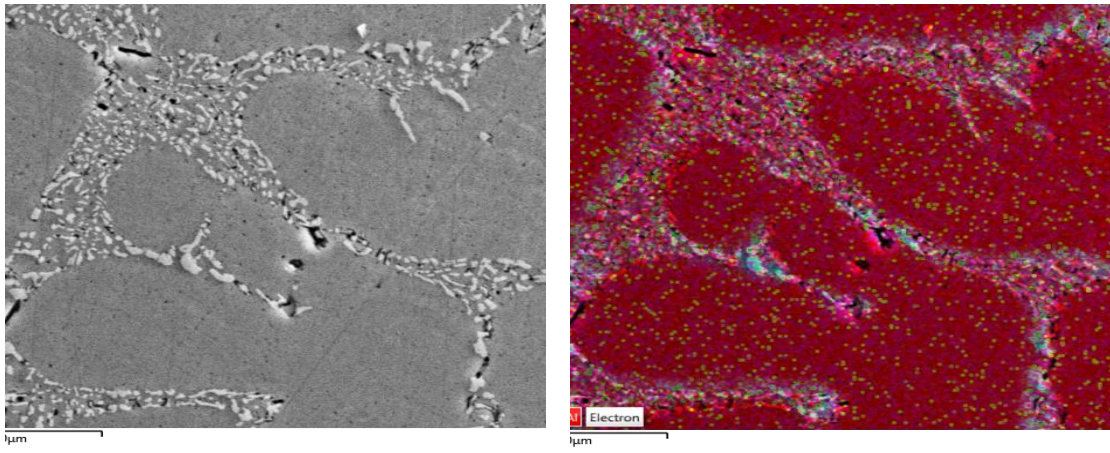
A357-DKS alaşımının SEM-EDS elementel dağılımları Şekil 4.7 (a-f)'de verilmiştir. Ayrıca, matris ve fazlarda bulunan elementlerin spektrum dağılımları Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekil 4.9 (a-f)'de A357-T6S alaşımının SEM-EDS elementel dağılımları gösterilmiştir. Şekil 4.10'da ise matris ve fazlarda bulunan elementlerin spektrum dağılımları gösterilmektedir. Hem döküm parçalardan (A357-DK, A357-T6) alınan mikroyapılar (Şekil 4.1 a-d) hem de standart çekme çubuğundan (A357-DKS, A357-T6S) alınan mikroyapılar birbirine oldukça benzemektedir (Şekil 4.5 a-d). A357-DK alaşımı (Şekil 4.3 a,f) ile kıyaslandığında mikroyapıda nadir bulunan iğne benzeri Fe'ce zengin faza A357-DKS (Şekil 4.7 a,f) mikroyapısında rastlanmamıştır.



Şekil 4.5. A357-DKS (a,b) ve A357-T6S (c,d) numunelerinin 10X ve 100X büyütmeleere ait optik mikroskop görüntüleri

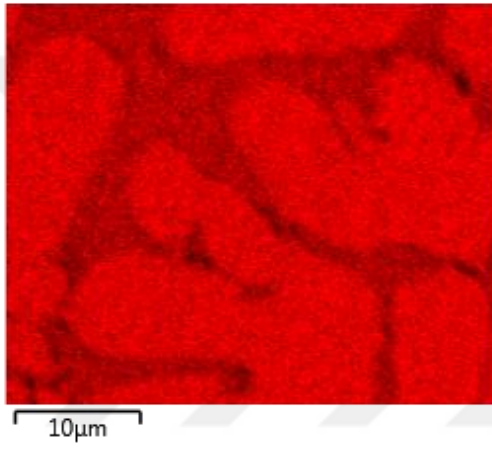


Şekil 4.6. A357-DKS (a) ve A357-T6S (b) numunelerinin SEM mikroyapıları

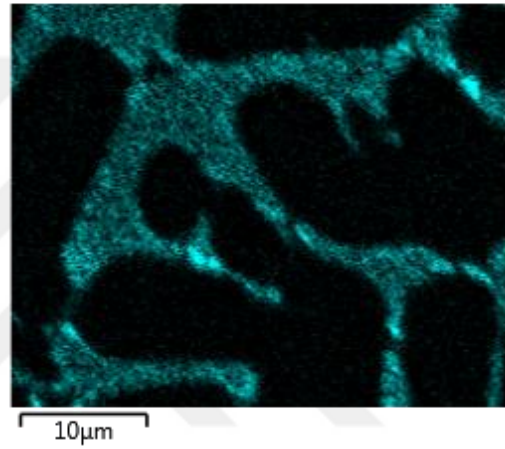


(a)

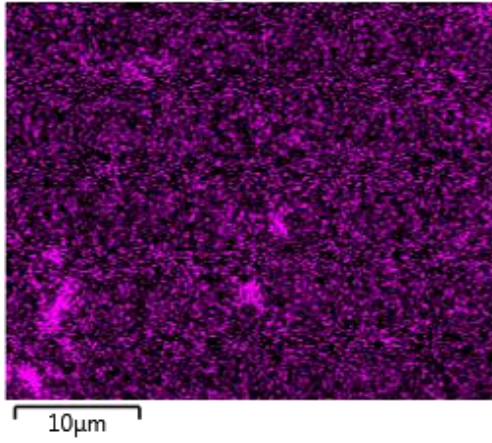
(b)

Al K α 1

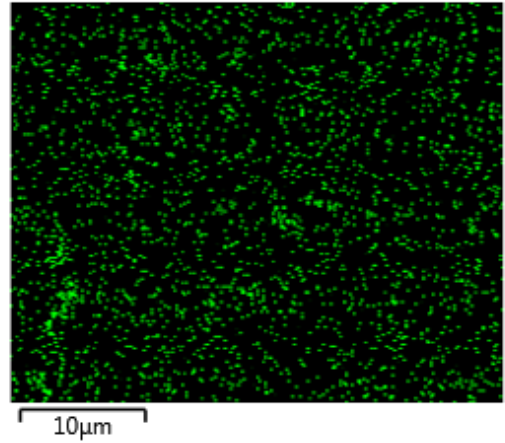
(c)

Si K α 1

(d)

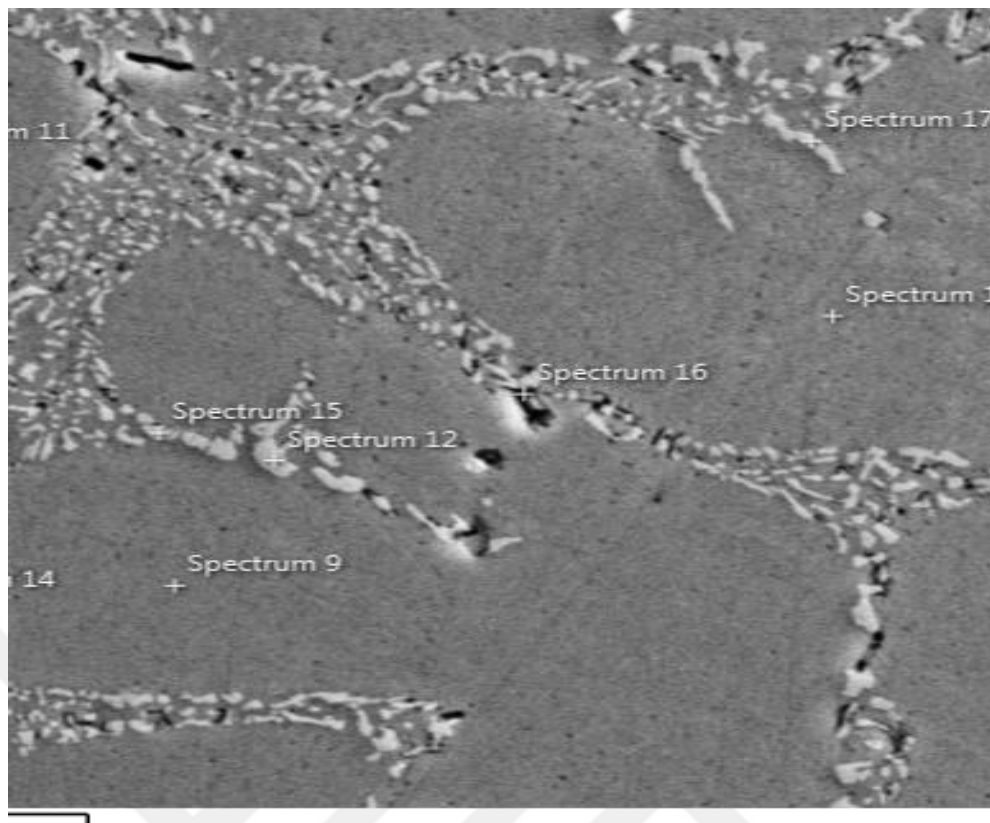
Mg K α 1_2

(e)

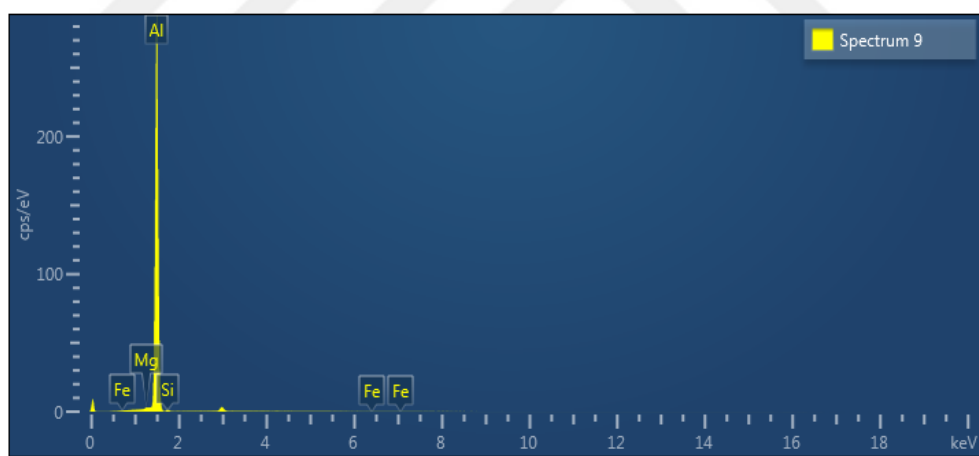
Fe K α 1

(f)

Şekil 4.7. A357-DKS alaşımının SEM-EDS elementel dağılımı

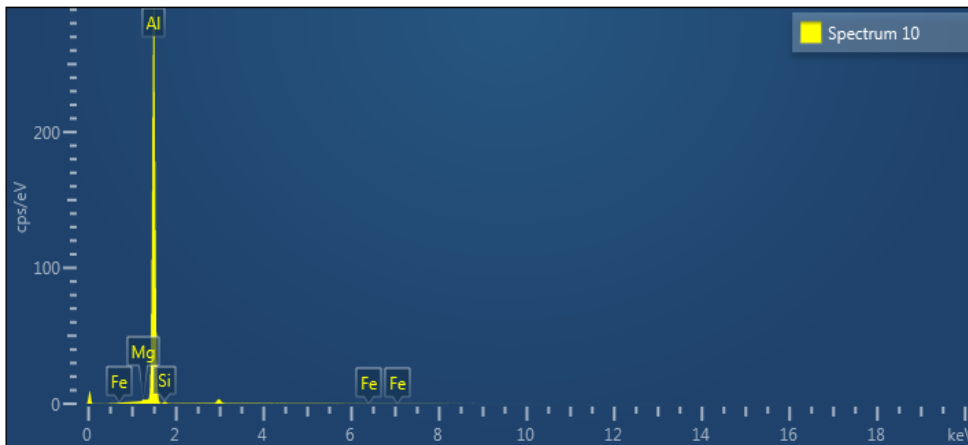


(a)



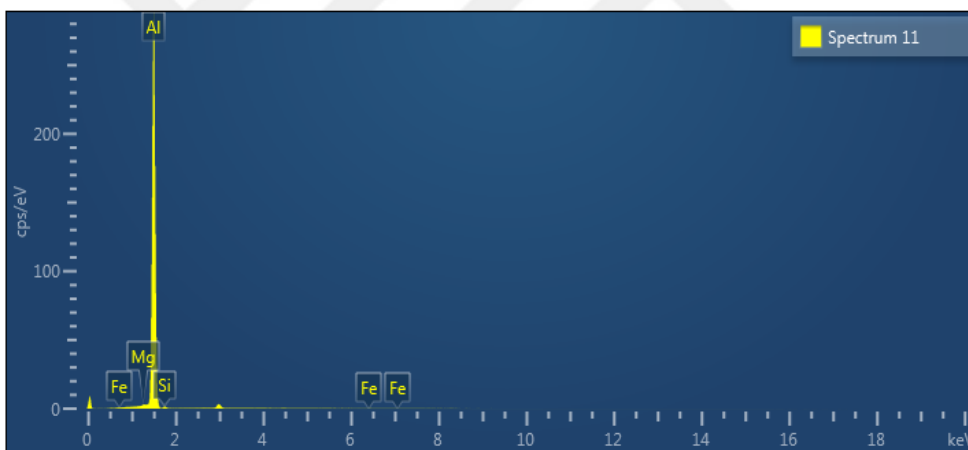
Spectrum 9				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	98.59	0.05	98.59
Si	K series	1.06	0.05	1.02
Mg	K series	0.35	0.03	0.39
Fe	K series	0.00	0.00	0.00
Total		100.00		100.00

(b)



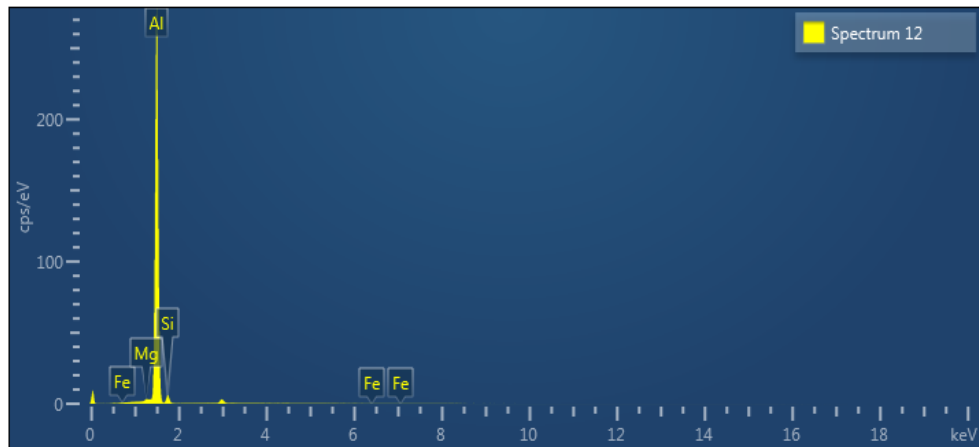
Spectrum 10				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	98.45	0.05	98.46
Si	K series	1.18	0.05	1.14
Fe	K series	0.00	0.00	0.00
Mg	K series	0.37	0.03	0.41
Total		100.00		100.00

(c)



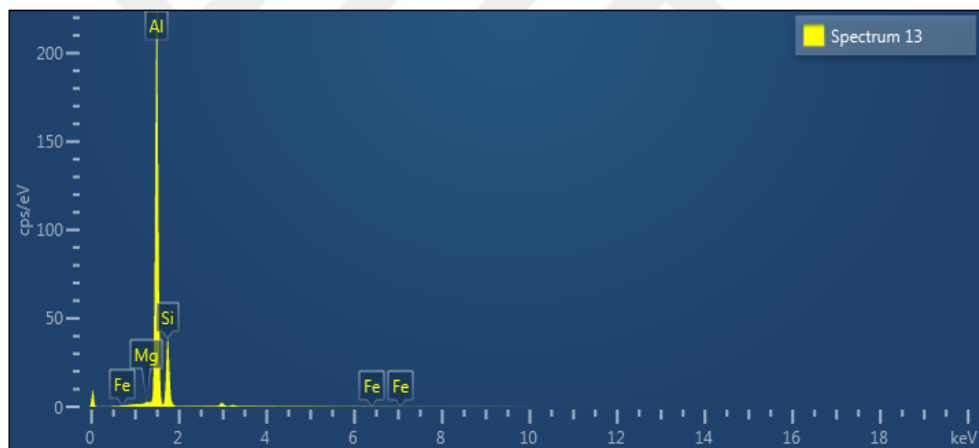
Spectrum 11				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al		98.39	0.07	98.44
Fe	K series	0.08	0.04	0.04
Mg	K series	0.33	0.03	0.37
Si	K series	1.20	0.05	1.16
Total		100.00		100.00

(d)



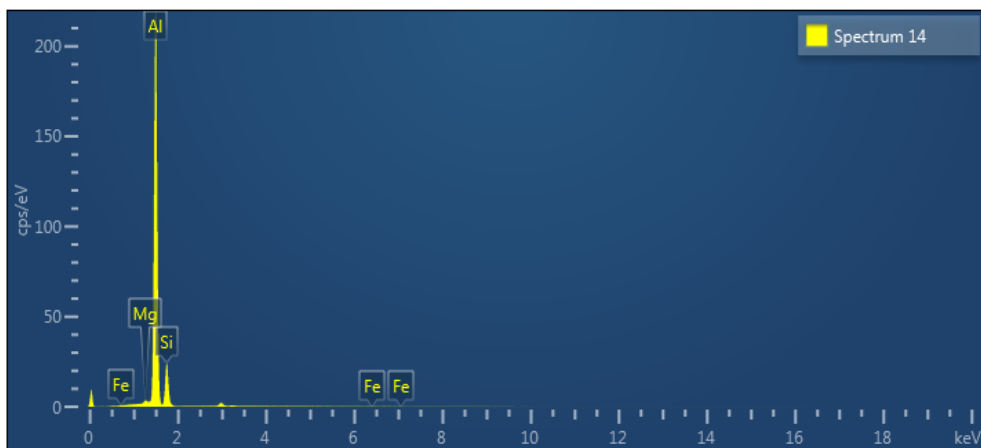
Spectrum 12				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	94.04	0.09	94.20
Si	K series	5.52	0.08	5.31
Fe	K series	0.00	0.04	0.00
Mg	K series	0.43	0.03	0.48
Total		100.00		100.00

(e)



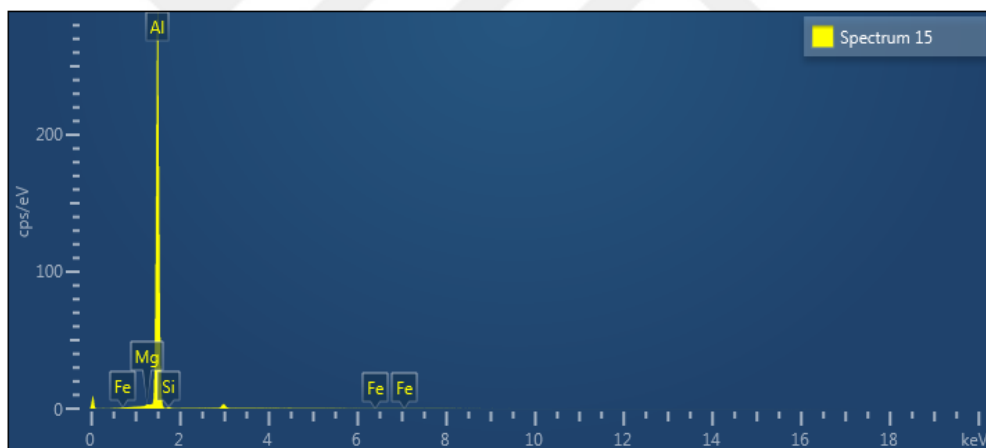
Spectrum 13				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	70.92	0.10	71.72
Si	K series	28.76	0.10	27.94
Fe	K series	0.04	0.04	0.02
Mg	K series	0.28	0.02	0.31
Total		100.00		100.00

(f)



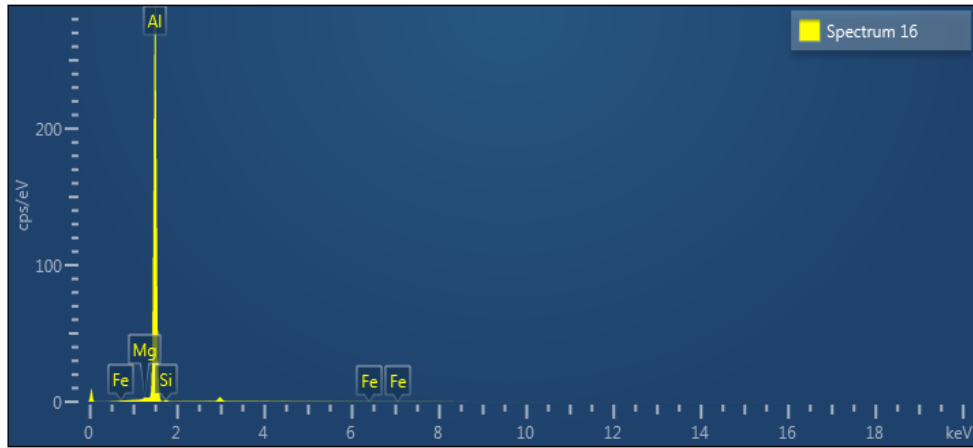
Spectrum 14				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	78.02	0.11	78.65
Si	K series	21.37	0.10	20.69
Mg	K series	0.57	0.03	0.64
Fe	K series	0.04	0.04	0.02
Total		100.00		100.00

(g)



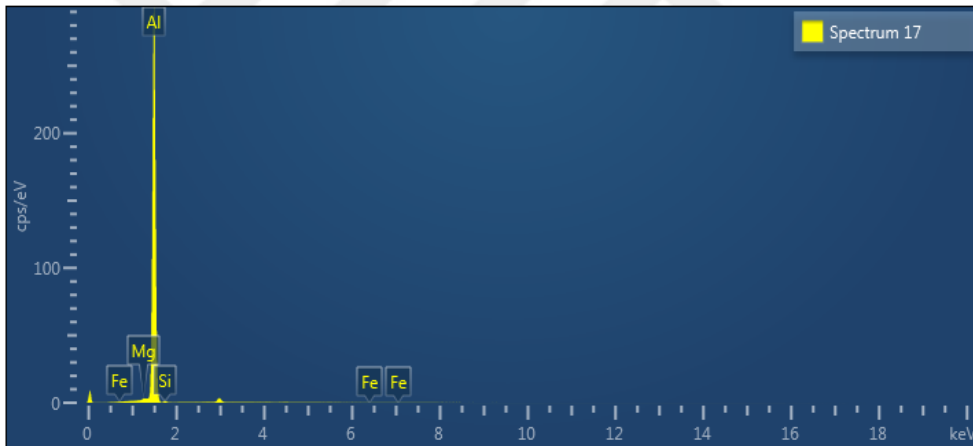
Spectrum 15				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	98.78	0.07	98.79
Fe	K series	0.03	0.04	0.02
Mg	K series	0.39	0.03	0.43
Si	K series	0.79	0.05	0.76
Total		100.00		100.00

(h)



Spectrum 16				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	98.73	0.07	98.74
Si	K series	0.87	0.05	0.83
Fe	K series	0.03	0.04	0.01
Mg	K series	0.37	0.03	0.41
Total		100.00		100.00

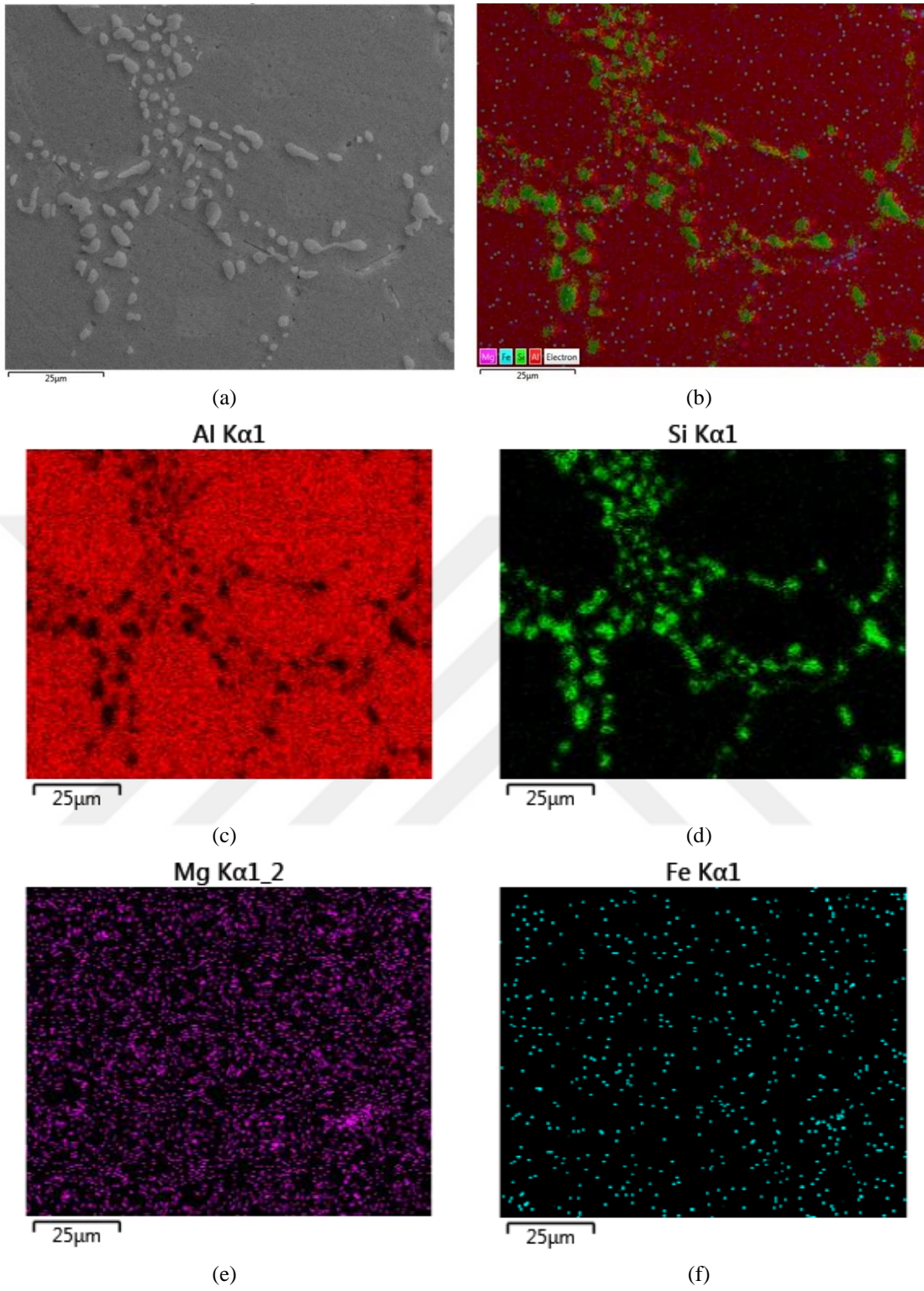
(i)



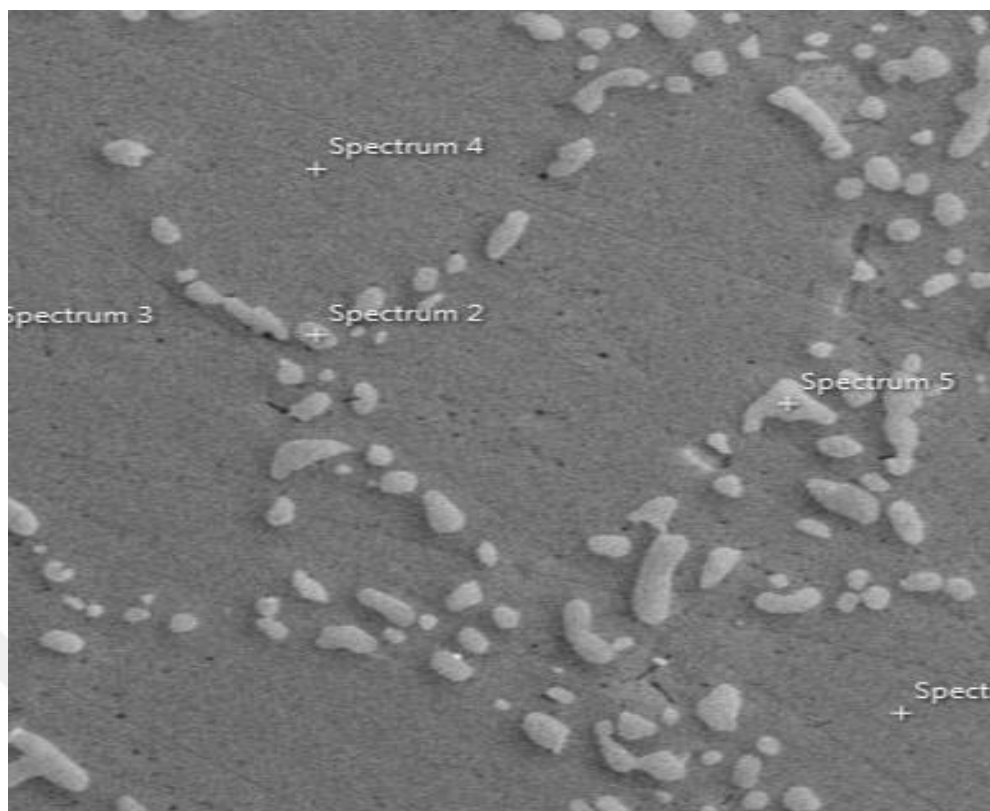
Spectrum 17				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	98.74	0.06	98.74
Si	K series	0.89	0.05	0.86
Fe	K series	0.01	0.04	0.00
Mg	K series	0.36	0.03	0.40
Total		100.00		100.00

(i)

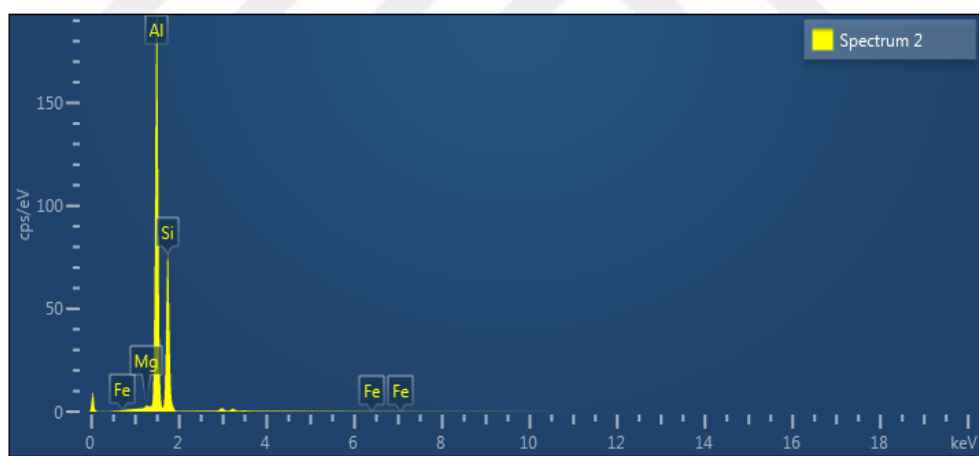
Şekil 4.8. A357-DKS alaşımına ait fazlarının SEM görüntüsü (a) ve EDS elementel spektrumları (b-i)



Şekil 4.9. A357-T6S alaşımının SEM-EDS elementel dağılımı

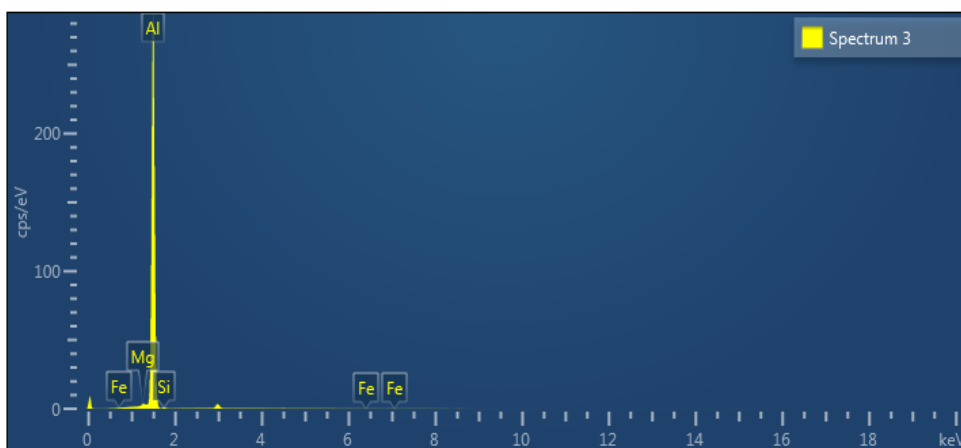


(a)



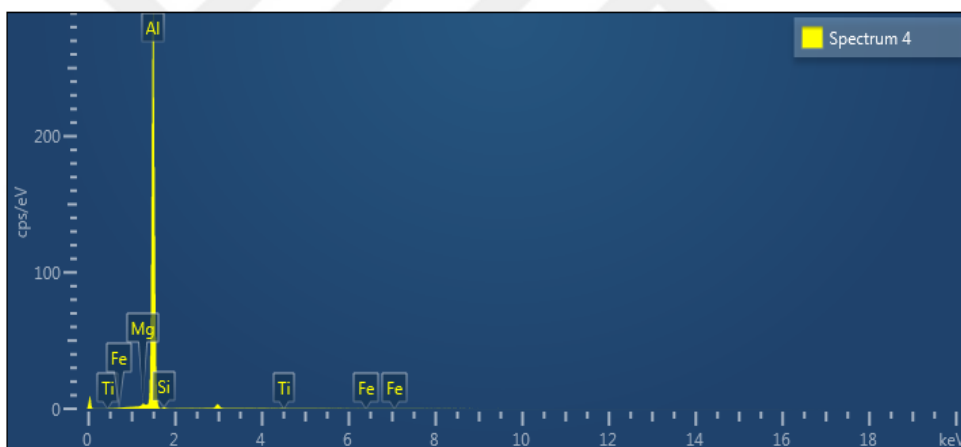
Spectrum 2				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	55.20	0.09	56.16
Si	K series	44.47	0.09	43.46
Fe	K series	0.00	0.00	0.00
Mg	K series	0.33	0.02	0.38
Total		100.00		100.00

(b)



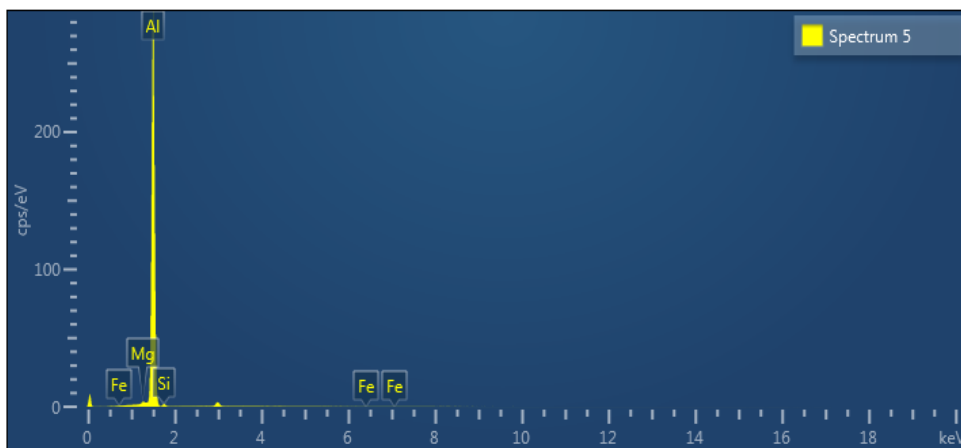
Spectrum 3				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	98.76	0.05	98.72
Si	K series	0.66	0.04	0.63
Mg	K series	0.58	0.03	0.65
Fe	K series	0.00	0.00	0.00
Total		100.00		100.00

(c)



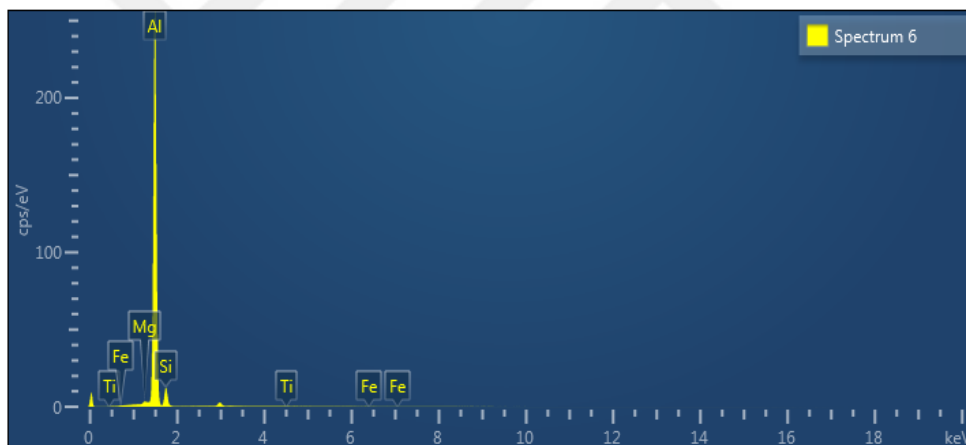
Spectrum 4				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	98.55	0.06	98.55
Si	K series	0.74	0.04	0.71
Fe	K series	0.00	0.00	0.00
Mg	K series	0.61	0.03	0.68
Ti	K series	0.10	0.03	0.06
Total		100.00		100.00

(d)



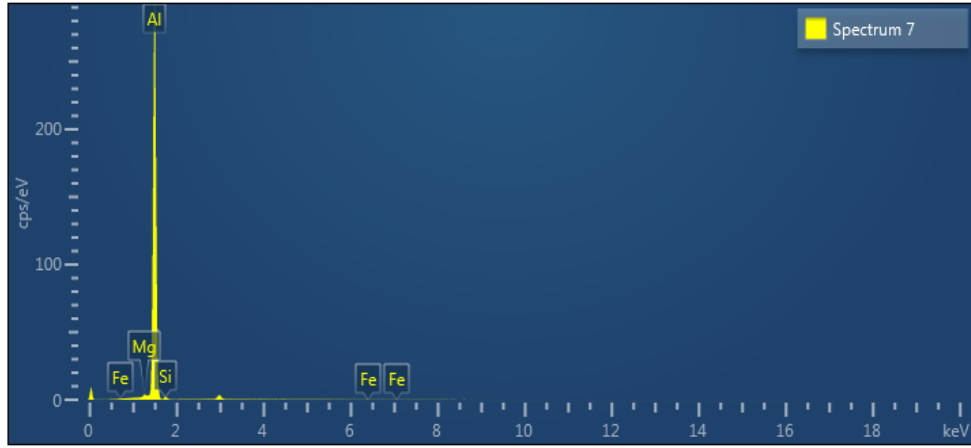
Spectrum 5				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	97.86	0.07	97.86
Si	K series	1.54	0.05	1.48
Fe	K series	0.01	0.04	0.01
Mg	K series	0.59	0.03	0.65
Total		100.00		100.00

(e)



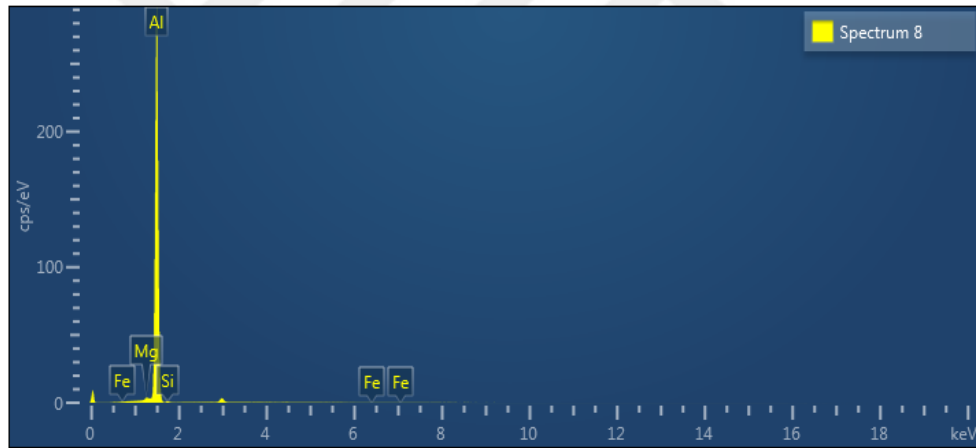
Spectrum 6				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	88.03	0.10	88.41
Si	K series	11.35	0.09	10.96
Mg	K series	0.53	0.03	0.59
Fe	K series	0.01	0.04	0.01
Ti	K series	0.08	0.03	0.04
Total		100.00		100.00

(f)



Spectrum 7				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	97.72	0.07	97.73
Si	K series	1.66	0.05	1.59
Mg	K series	0.59	0.03	0.66
Fe	K series	0.03	0.04	0.02
Total		100.00		100.00

(g)



Spectrum 8				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	98.75	0.06	98.72
Si	K series	0.64	0.04	0.61
Fe	K series	0.02	0.04	0.01
Mg	K series	0.59	0.03	0.66
Total		100.00		100.00

(h)

Şekil 4.10. A357-T6S alaşımına ait fazlarının SEM görüntüsü (a) ve EDS elementel spektrumları (b-h)

4.2 Mekanik Test Sonuçları

A357 Al alaşımının döküm ve T6 ısıl işlem sonrası sertlik (HB) ve çekme testlerinden elde edilen UTS, YS ve ϵ değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. A357-DK ve A357-DKS alaşımları karşılaştırıldığında HB sertlik değerlerinin sırasıyla 68 ve 57 olduğu, diğer taraftan T6 ısıl işlemi sonucu sertlik değerlerinin sırasıyla 111 ve 95 HB’ye yükseldiği gözlenmiştir.

Döküm A357-DK ve A357-DKS alaşımlarının ϵ değerleri UTS performansları karşılaştırıldığında, sırasıyla 170 ve 183 MPa olurken YS performansları sırasıyla 121 ve 127 MPa olduğu tespit edilmiştir. T6 ısıl işleminden sonra ise A357-T6 ve A357-T6S alaşımlarının UTS değerleri sırasıyla 300 ve 310 MPa olurken YS değerlerinin sırasıyla 270 ve 278 MPa’a çıktığı gözlenmiştir.

A357-DK ve A357-DKS karşılaştırıldığında ϵ değerlerinin sırasıyla %5 ve %8 olduğu gözlenmiştir. Diğer taraftan T6 ısıl işlemi sonucu bu değerlerinin sırasıyla %3,5 ve %5,3’e düştüğü gözlenmiştir.

Çizelge 4.1. A357-DK, A357-T6 ve A357-DKS, A357-T6S alaşımlarının Sertlik, UTS, YS ve ϵ değerleri

Alaşım	Sertlik (HB)	UTS (MPa)	YS (MPa)	ϵ (%)
A357-DK	68 \pm 5	170 \pm 10	121 \pm 7	5,0 \pm 2
A357-T6	111 \pm 5	300 \pm 10	270 \pm 10	3,5 \pm 2
A357-DKS	57 \pm 5	183 \pm 10	127 \pm 10	8,0 \pm 2
A357-T6S	95 \pm 5	310 \pm 10	278 \pm 10	5,3 \pm 2

4.3 Mikroyapı ve Mekanik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 4.1 (a-b)’de görüldüğü üzere A357-DK alaşımının mikroyapısı dentritik birincil α -Al fazı ile Al-Si ötektik yapıdan meydana gelmektedir. Dentritik sınırda çok sayıda plaka veya el yazısı benzeri (script-like) intermetalik parçacıklar gözlenmektedir. A357-DK ve A357-DKS alaşımlarının birincil α -Al matrisi ve ötektik Si fazının türleri ve morfolojileri arasında önemli bir fark olmadığı gözlenmemekle birlikte A357-DK’ya ait dentritik yapının A357-DKS’a nazaran biraz daha kaba olduğu görülmektedir (Şekil 4.1 a) (Şekil 4.5 a). Bunun nedeni, her iki numune arasındaki katılma hızına dayandırılmaktadır. A357-DK numuneleri daha kalın kesitli ve dolayısıyla yavaş katılma hızına sahip gerçek döküm parçalarına ait iken A357-DKS numunelerinin daha hızlı katılma hızına sahip daha ince kesitli standart çekme çubuklarına ait olması olarak değerlendirilebilir.

SEM mikroyapıları kıyaslandığında A357-DK alaşımında Si fazları yanında çok seyrekte olsa iğne benzeri fazlar da gözlenmiştir (Şekil 4.2 a) (Şekil 4.6 a). Fakat A357-DKS mikroyapısında iğnemsiz faza rastlanmamıştır. Bunun sebebinin her iki alaşımın Fe oranlarındaki farklılıktan olabileceği düşünülmektedir. Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi A357-DK alaşımında Fe oranı %0,12 iken A357-DKS’de Fe oranı %0,08’dir. Al-Fe denge diyagramından Al içerisinde Fe’in çözünürlüğü 650°C’de %0,05 civarındadır (Campbell, 2003). Bu noktadan, A357-DKS alaşımında Fe oranının %0,08 olduğu göz önüne alındığında %0,05 Fe’in α -matrisi içinde katı çözültide kaldığı ve geriye kalan eser miktardaki Fe bazlı fazların görülmemesinin nedeni olarak açıklanabilir. Literatürde (Caceres ve ark., 1999), Al-Si-Mg alaşımında Mg_2Si bileşikleri ile birlikte %0,05’in üzerinde Fe olması durumunda $\alpha(Fe_2SiAl_8)$, $\beta(FeSiAl_5)$ ve $\pi(FeMg_3Si_6Al_8)$ gibi zararlı Fe bazlı fazların varlığı rapor edilmiştir. β fazı üç boyutta levha (platales) morfolojisine sahip olmasıyla birlikte mikroyapı incelemelerinde iki boyutta gözlem olduğundan iğne şeklinde de gözlenebilir. Al-Si alaşımlarında, Mg bulunduğunda ise $\pi(FeMg_3Si_6Al_8)$ fazı oluşmaktadır (Caceres ve ark., 1999) (Wu ve ark., 2019b). Bu çalışmada Al-Si-Mg alaşımı kullanıldığından mikroyapıda görünen iğne şeklindeki fazın $\pi(FeMg_3Si_6Al_8)$ fazı olduğu düşünülmektedir. Wu ve ark. (2019b), LPDC yöntemiyle dökülmüş Al-7Si xMg alaşımlarında Fe bakımından zengin intermetalikler ile Mg-Si fazı arasındaki etkileşimleri rapor etmiş ve sonuç olarak Mg oranının %0,35’ten %0,60 oranına çıktığında iğne şeklinde π -Fe fazı oranının arttığını rapor etmişlerdir. Bu çalışmada Şekil 4.3 (a,f) ‘de gösterildiği gibi EDS analizi Fe açısından zengin iğne benzeri fazların A357-DK alaşımında olduğunu göstermiştir ki Wu ve ark. (2019b) çalışmaları ile uyumluluk göstermektedir.

Döküm alaşımlarının (A357-DK, A357-DKS) mikroyapıları karşılaştırıldığında T6 ısıtma işlemi işleminden sonra (A357-T6, A357-T6S) alaşımlarının birincil α -Al matrisinde belirgin bir fark gözlenmemiştir (Şekil 4.1 b,d) (Şekil 4.5 b,d). Bununla birlikte Şekil 4.1 (d) ve Şekil 4.5 (d) incelendiğinde ötektik Si fazlarında ve π -Fe fazında değişikliklerin olduğu görülmektedir. Döküm mikroyapısında gözlemlenen ötektik adacıklar ve plaka şeklindeki Si fazı, çoğunlukla tane sınırlarında köşeli kısmi küresel bir görünüm sergilemiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.10’da verilen EDS analizlerinin gerçekleştirildiği α -Al’dan alınan noktaların kimyasal bileşimleri incelendiğinde Si miktarının T6 ısıtma işlemi ile azaldığı buna karşılık Mg miktarının ise arttığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.2). Benzer sonuçlar Vatansver ve ark. (2018), tarafından yapılan

Al-Si alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin T6 ısıt işlemleri ile iyileştirilmesi konulu çalışmalarında rapor edilmiştir.

Çizelge 4.2. A357- DKS ve A357- T6S numunelere ait α -Al'dan alınan noktaların EDS analiz sonuçlarının karşılaştırılması

	A357- DKS				A357- T6S			
	Spektrum 9	Spektrum 10	Spektrum 11	Ortalama	Spektrum 3	Spektrum 4	Spektrum 8	Ortalama
Si	1,06	1,18	1,20	1,15	0,66	0,74	0,64	0,68
Mg	0,35	0,37	0,33	0,35	0,58	0,61	0,59	0,59
Fe	0	0	0,08	0,03	0	0	0,02	0,007

Döküm sırasında ergiyik katılaşmanın ilk aşamalarında, yapısal aşırı soğuma nedeniyle dendrit kollarının önünde tane sınırlarında Si zenginleşmesi meydana gelir. Ön kısımdaki zenginleşmiş Si, α -Al ile ötektik Al-Si fazını oluşturur. Homojenizasyon ile tane sınırlarındaki Si ve Mg'un α -Al içerisinde çözünmesi sağlanır. T6 yaşlandırma ısıt işlemleri ile α -Al içerisinde çözünen Mg, Si ile Mg₂Si fazının oluşmasına neden olur. Mg₂Si fazı nano boyutta çökeltiler olduğu için SEM ile yapılan mikroyapı çalışmalarında gözlenmemiştir. Tzeng ve ark. (2018) ve Wu ve ark. (2019b) A357 Al alaşımında yaptıkları TEM mikroyapı analizlerinde 15-100 nm boyutlarında ince dağılmış olarak çökelen Mg₂Si fazının varlığını rapor etmişlerdir. Homojenizasyon ısıt işleminin, Mg₂Si fazı ve π -Fe fazı dahil olmak üzere Mg içeren bileşenlerin çözünmesine neden olduğu iyi bilinmektedir (Tzeng ve ark., 2018) (Asghar ve ark., 2020). Döküm durumunda el yazısı benzeri veya iğne benzeri bir morfoloji olan π -Fe fazı, ayrı yuvarlak veya oval uçlu çubuk benzeri Fe açısından zengin intermetaliklere bölündüğü rapor edilmiştir (Tzeng ve ark., 2018). Bu çalışmada da, iğne benzeri Fe'ce zengin fazın (Şekil 4.3 a,f) ısıt işlem sonucu A357-T6 alaşımında, Şekil 4.4 (a) ve Şekil 4.4 (f)' görüldüğü, gibi sivri uçlarının oval bir yapıya dönüştüğü gözlenmiştir.

A357 Al alaşımının mekanik özellikleri esas olarak α -Al tane boyutu, ötektik fazın hacim oranı ve boyut dağılımı, döküm kusurları ve çökeltilerden etkilenmektedir. A357-DK ve A357-DKS alaşımları karşılaştırıldığında HB sertlik değerlerinin sırasıyla 68 ve 57 olmasının nedeni A357-DK'de Fe içeriğinin A357-DKS'den yüksek olmasından dolayı iğne şeklindeki π -Fe fazının varlığına dayandırılmıştır. Diğer taraftan, A357-DK ve A357-DKS alaşımları karşılaştırıldığında A357-DK alaşımının HB değerinin yüksek olmasına rağmen UTS değerlerin (170 MPa) A357-DKS alaşımından düşük (183 MPa) olmasının nedeni mikro yapıdaki π -Fe fazının çekme sırasındaki deformasyon sürecinde

çatlak başlangıcına neden olmasına dayandırılmıştır. Döküm Al alaşımlarının mukavemet artışı çökeltme sertleşmesi, deformasyon sertleşmesi, katı çözeltili sertleşmesi ve tane boyutu sertleşmesiyle doğrudan ilişkilidir. Yukarıda değerlendirildiği üzere, dökümden sonraki ısı işlemler (Homojenizasyon + T6), ötektik Si parçacıklarını parçalayarak daha küçük taneli birincil Si fazları oluştururken aynı zamanda Mg_2Si çökeltilerinin oluşumunun yanısıra π -Fe fazının morfolojisinde değişikliği teşvik ederler (Asghar ve ark., 2020) (Wu ve ark., 2019b). A357-T6 ve A357-T6S alaşımlarının sertlik değerleri sırasıyla 111 ve 95 HB olmasının nedeni Mg_2Si çökeltileri ile birlikte π -Fe fazının varlığına dayandırılabilir. A357-T6S alaşımı ile kıyaslandığında A357-T6 alaşımının sertliğinin daha yüksek olması Fe oranının daha yüksek ve buna bağlı π -Fe fazının daha fazla olmasına dayandırılabilir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.3’de döküm ve ısı işlemler uygulanmış A357 Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve çekme dayanım değerleri literatür verileri ile karşılaştırılmıştır. T6 ısı işlemleri ile A357 Al alaşımlarının UTS ve YS değerleri önemli ölçüde artış göstermektedir. A357-DK alaşımının T6 işlemleri sonucu (A357-T6) UTS değeri 170 MPa’dan 300 MPa’a ve YS değerleri benzer oranda 121 MPa’dan 270 MPa’a artmıştır. Bu UTS ve YS dayanım değerlerindeki yüksek artışın nedeni olarak T6 ısı işlemleri sonucu α -Al matrisinde çok sayıda çökelen ince Mg_2Si fazının varlığına dayandırılabilir. Diğer bir deyişle, plastik deformasyon işlemleri sırasında, dislokasyonların Mg_2Si çökeltileri ile etkileşimi altında çalışma sertleşmesi sonucu mukavemetin artmasına neden olmaktadır (Asghar ve ark., 2020). Ayrıca, T6 ısı işlemleri sonucunda, Si fazının ötektik ve plaka formundan daha kısmi küresel yapıya dönüşerek alaşımın gerilme mukavemetini iyileştirmede ek bir etken olabilir.

Çizelge 4.3’te görüldüğü üzere T6 ısı işlemleri ile A357 alaşımlarında UTS ve YS değerlerini önemli ölçüde arttırırken ϵ değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. Bu durum birbirine bağlı iki nedene dayandırılabilir: Birincisi, çekme sürecindeki deformasyon sırasında Mg_2Si çökeltilerinin dislokasyon hareketlerini kısıtlaması, ikincisi, Mg_2Si çökeltilerine nazaran çok daha büyük boyutlardaki π -Fe fazının stres birikimine neden olması ve buna bağlı çatlak başlangıcını kolaylaştırmasına dayandırılabilir (Seifeddine, ve ark., 2008) (Patakhham ve Limmaneevichitr, 2014) (Yang ve ark., 2015). A357 Al alaşımında π -Fe fazının mekanik özelliklerin bozulmasında kritik rol oynadığı literatürde de rapor edilmiştir (Yang ve ark., 2015) (Patakhham ve Limmaneevichitr, 2014).

Çizelge 4.3'teki veriler incelendiğinde, Wu ve ark. (2019b) ve Asghar ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda A357 Al alaşımının T6 ısıtılma işlemi sonrası UTS, YS değerlerinin arttığı ϵ değerlerinin azaldığı görülmektedir. Literatür sonuçları, bu çalışma sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Ancak, Çizelge 4.3'te verilen A357 Al alaşımına ait bazı literatür sonuçlarının kimyasal bileşimlerinin benzer olmasına rağmen (Tzeng ve ark., 2018) (Aldoğan, 2021) (Wei ve ark, 2022) (Dezecot ve Brochu, 2015) UTS, YS ve ϵ değerlerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. UTS, YS ve ϵ değerlerindeki sapmaların bu alaşımların Si, Mg ve özellikle Fe oranlarındaki küçük değişiklikler ile döküm ve ısıtılma işlem koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. Döküm ve ısıtılma işlem uygulanmış A357 Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve çekme dayanım değerleri ve literatür verileri

Alaşım	Kimyasal Bileşim					Döküm / T6	Mekanik Özellikler			Kaynak
	Si	Mg	Fe	Cu	Ti		UTS (MPa)	YS (MPa)	ϵ %	
A357-DK	6,51	0,54	0,12	0,02	0,15	Döküm	170	121	5,0	
A357-T6	6,51	0,54	0,12	0,02	0,15	T6	300	270	3,5	
A357-DKS	7,40	0,64	0,08	0,009	0,19	Döküm	183	127	8,0	
A357-T6S	7,40	0,64	0,08	0,009	0,19	T6	310	278	5,3	
A357	6,97	0,62	0,10	-	0,10	T6	300	250	3,9	Tzeng ve ark. (2018)
A357	7,40	0,55	0,18	-	0,15	Döküm	212	131	6,7	Asghar ve ark. (2020)
A357	7,40	0,55	0,18	-	0,15	T6	343	303	4,8	Asghar ve ark. (2020)
A357	8,05	0,53	0,08	-	0,13	T6	294	278	4,4	Aldoğan (2021)
A357	7,09	0,67	0,04	-	0,08	T6	362	305	4,8	Wei ve ark. (2022)
A357	7,1	0,6	0,06	0,01	0,10	T6	331	272	5,9	Dezecot ve Brochu (2015)
A357	7,12	0,45	0,12	0,08	0,15	Döküm	190	90	9	Wu ve ark. (2019b)
	7,12	0,45	0,12	0,08	0,15	T6	334	267	8,5	Wu ve ark. (2019b)
A357	6,98	0,61	0,11	0,08	0,15	Döküm	190	90	8	Wu ve ark. (2019b)
	6,98	0,61	0,11	0,08	0,15	T6	290	270	4,7	Wu ve ark. (2019b)

4.4 Tahmin Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

4.4.1 Regresyon Algoritmaları

Veri setimizde bulunan 265 satır veri ile yapılan denemelere ilişkin regresyon parametreleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. 215 satır eğitim ve 50 test verisi ile Matlab

Regresyon öğrenme algoritmaları kullanılarak yapılan işlemin sonuçları Çizelge 4.5-4.7’de verilmiştir. Modelin ortalama hata karesi (MSE) ve modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek test verilerin farkının karelerinin ortalamasının karekökü alınarak hesaplanan (RMSE) değerlerinin sıfıra yakın olması istenir. Çizelge 4.5 ve 4.6 incelendiğinde UTS ve YS için MSE ve RMSE değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Çizelge 4.7 incelendiğinde ise ε için MSE ve RMSE değerlerinin sıfıra daha yakın olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak ε değerinin tahmin aralığının UTS ve YS değerlerine (200-350 MPa) kıyasla çok daha dar bir aralıkta (% 2-5) olmasına dayandırılmıştır. Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde, yukarıdaki regresyon algoritmalarının mevcut veri tabanı için uygun olmadığı anlaşılmıştır.

Çizelge 4.4. A357 Al alaşımı için regresyon parametreleri

Sınıflandırma Parametreleri	Gözlem Sayısı	Tahmin Edici (Si,Mg,Cu,Fe,Ti)	Çapraz Doğrulama
UTS	215	5	10
YS	215	5	10
ε	215	5	10

Çizelge 4.5 A357 Al alaşımı UTS regresyon sonuçları

Model No	Model Tipi	RMSE (Val.)	MSE (Val.)	R ² (Val.)	MAE (Val.)	MAE (Test)	MSE (Test)	RMSE (Test)	R ² (Test)
1	Tree	16,441	270,332	0,801	11,779	6,297	81,598	9,033	0,939
2.1	Linear Regression	15,652	244,988	0,820	12,143	11,759	229,855	15,160	0,829
2.2	Linear Regression	15,650	244,935	0,820	12,053	11,198	211,997	14,560	0,842
2.3	Linear Regression Stepwise	15,699	246,459	0,819	12,075	11,639	230,722	15,189	0,829
2.4	Linear Regression	16,124	260,004	0,809	12,365	11,597	225,469	15,015	0,832
2.5	Tree	16,441	270,332	0,801	11,779	6,297	81,598	9,0332	0,939
2.6	Tree	15,782	249,091	0,817	12,464	8,812	143,958	11,998	0,893
2.7	Tree	18,429	339,638	0,750	15,508	14,504	301,012	17,349	0,777
2.8	SVM	15,820	250,284	0,816	12,157	11,579	234,134	15,301	0,826
2.9	SVM	15,539	241,484	0,822	11,683	10,392	207,234	14,395	0,846
2.10	SVM	16,105	259,377	0,809	11,904	9,185	174,852	13,223	0,870
2.11	SVM	30,622	937,748	0,311	24,130	70,589	119,757	10,943	0,911

2.12	SVM	15,612	243,736	0,821	11,906	8,497	150,818	12,280	0,888
2.13	SVM	16,205	262,632	0,807	12,208	11,673	247,275	15,725	0,816
2.14	Efficient Linear	26,936	725,559	0,467	21,506	20,536	667,555	25,837	0,505
2.15	Efficient Linear	36,577	1337,916	0,017	29,111	28,778	1319,795	36,328	0,022
2.16	Ensemble	18,685	349,151	0,743	15,700	12,906	214,382	14,641	0,841
2.17	Ensemble Gaussian	14,441	208,558	0,846	11,144	7,368	101,152	10,057	0,925
2.18	Process Regression Gaussian	14,990	224,722	0,834	11,667	10,654	189,902	13,780	0,859
2.19	Process Regression Gaussian	15,036	226,108	0,833	11,674	10,513	185,179	13,608	0,862
2.20	Process Regression Gaussian	15,031	225,947	0,834	11,597	3,395	19,1477	4,375	0,985
2.21	Process Regression	14,990	224,722	0,834	11,667	10,65	189,902	13,780	0,859
2.22	Neural Network	15,632	244,369	0,820	12,050	9,086	142,255	11,927	0,894
2.23	Neural Network	16,015	256,321	0,811	12,535	9,253	135,975	11,660	0,899
2.24	Neural Network	23,949	573,569	0,578	17,689	9,075	132,903	11,528	0,901
2.25	Neural Network	15,716	247,001	0,818	12,262	9,920	163,929	12,803	0,878
2.26	Neural Network	17,078	291,674	0,785	12,909	6,687	83,4368	9,134	0,938
2.27	Kernel	27,849	775,576	0,430	21,126	19,763	692,003	26,305	0,487
2.28	Kernel	15,315	234,564	0,827	12,423	11,056	187,319	13,686	0,861

Çizelge 4.6 A357 Al alaşımı YS regresyon sonuçları

Model Tipi	Model Tipi	RMSE (Val.)	MSE (Val.)	R ² (Val.)	MAE (Val.)	MAE (Test)	MSE (Test)	RMSE (Test)	R ² (Test)
1	Tree	17,145	293,978	0,729	12,589	11,701	260,493	16,139	0,699
2.1	Linear Regression	15,401	237,221	0,781	11,662	13,047	235,910	15,359	0,727

2.2	Linear Regression	15,605	243,521	0,775	11,598	13,062	243,082	15,591	0,719
2.3	Linear Regression Stepwise	15,443	238,516	0,780	11,519	12,727	222,932	14,930	0,742
2.4	Linear Regression	15,579	242,732	0,776	11,689	13,303	247,876	15,744	0,713
2.5	Tree	17,145	293,978	0,729	12,589	11,701	260,493	16,139	0,699
2.6	Tree	16,252	264,159	0,756	12,307	10,425	178,360	13,355	0,794
2.7	Tree	16,686	278,433	0,743	13,996	11,932	204,700	14,307	0,763
2.8	SVM	15,579	242,731	0,776	11,371	12,114	205,899	14,349	0,762
2.9	SVM	15,523	240,974	0,777	11,399	12,196	214,501	14,645	0,752
2.10	SVM	15,857	251,447	0,768	11,541	11,123	196,143	14,005	0,773
2.11	SVM	27,601	761,826	0,297	21,694	20,170	625,512	25,010	0,278
2.12	SVM	15,571	242,475	0,776	11,591	11,091	193,687	13,917	0,776
2.13	SVM	16,187	262,024	0,758	11,599	12,016	203,575	14,267	0,765
2.14	Efficient Linear	24,311	591,068	0,455	19,289	18,326	486,288	22,051	0,438
2.15	Efficient Linear	32,470	1054,352	0,028	25,913	24,890	897,318	29,955	-0,035
2.16	Ensemble	18,143	329,201	0,696	15,280	19,073	482,667	21,969	0,442
2.17	Ensemble Gaussian	14,250	203,072	0,812	10,752	98,436	181,106	13,457	0,790
2.18	Process Regression Gaussian	15,246	232,444	0,785	11,533	12,710	230,810	15,192	0,733
2.19	Process Regression Gaussian	15,227	231,885	0,786	11,550	12,588	226,773	15,058	0,738
2.20	Process Regression Gaussian	14,975	224,259	0,793	11,496	11,605	204,920	14,315	0,763
2.21	Process Regression	15,246	232,444	0,785	11,533	12,710	230,810	15,192	0,733
2.22	Neural Network	15,284	233,610	0,784	11,917	13,081	276,133	16,617	0,681
2.23	Neural Network	16,194	262,247	0,758	12,835	14,339	305,935	17,491	0,646
2.24	Neural Network	24,604	605,403	0,442	18,804	21,127	798,623	28,259	0,0783

2.25	Neural Network	16,866	284,467	0,737	13,181	13,207	253,693	15,927	0,7072
2.26	Neural Network	19,958	398,361	0,632	14,338	18,418	808,682	28,437	0,0667
2.27	Kernel	24,242	587,680	0,458	18,660	16,983	425,090	20,617	0,509
2.28	Kernel	15,084	227,541	0,790	11,660	12,113	207,390	14,401	0,760

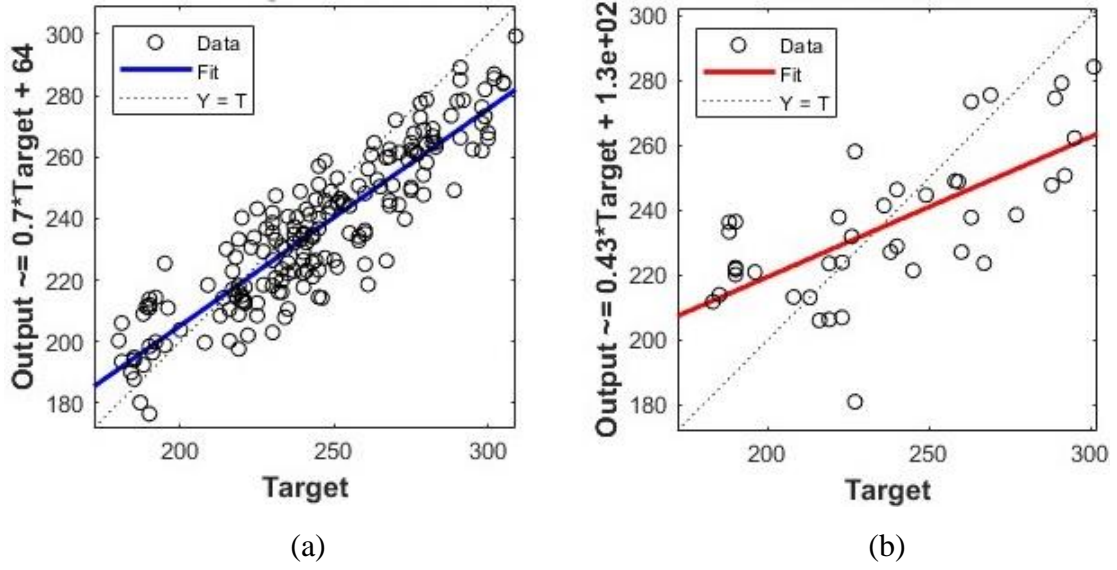
Çizelge 4.7 A357 Al alaşımı ε regresyon sonuçları

Model No	Model Tipi	RMSE (Val.)	MSE (Val.)	R ² (Val.)	MAE (Val.)	MAE (Test)	MSE (Test)	RMSE (Test)	R ² (Test)
1	Tree	0,379	0,144	0,813	0,261	0,318	0,140	0,375	0,628
2.1	Linear Regression	0,337	0,113	0,852	0,245	0,358	0,178	0,422	0,528
2.2	Linear Regression	0,339	0,115	0,850	0,253	0,349	0,169	0,412	0,551
2.3	Linear Regression	0,337	0,113	0,852	0,245	0,354	0,174	0,417	0,539
2.4	Stepwise Linear Regression	0,337	0,113	0,852	0,248	0,347	0,174	0,417	0,539
2.5	Tree	0,379	0,144	0,813	0,261	0,318	0,140	0,375	0,628
2.6	Tree	0,346	0,120	0,843	0,239	0,349	0,180	0,424	0,525
2.7	Tree	0,446	0,199	0,741	0,309	0,393	0,212	0,461	0,439
2.8	SVM	0,340	0,115	0,849	0,246	0,345	0,166	0,407	0,561
2.9	SVM	0,346	0,120	0,843	0,253	0,333	0,159	0,399	0,579
2.10	SVM	0,344	0,118	0,846	0,247	0,330	0,154	0,392	0,593
2.11	SVM	0,734	0,538	0,301	0,592	0,386	0,250	0,500	0,339
2.12	SVM	0,349	0,122	0,841	0,249	0,320	0,149	0,386	0,604
2.13	SVM	0,341	0,116	0,848	0,247	0,320	0,145	0,381	0,616
2.14	Efficient Linear	0,620	0,384	0,500	0,508	0,298	0,167	0,409	0,556
2.15	Efficient Linear	0,712	0,507	0,341	0,547	0,278	0,153	0,391	0,595
2.16	Ensemble	0,330	0,109	0,858	0,225	0,331	0,147	0,383	0,611
2.17	Ensemble Gaussian	0,312	0,097	0,873	0,211	0,315	0,129	0,360	0,658
2.18	Process Regression	0,335	0,112	0,854	0,246	0,345	0,165	0,406	0,564

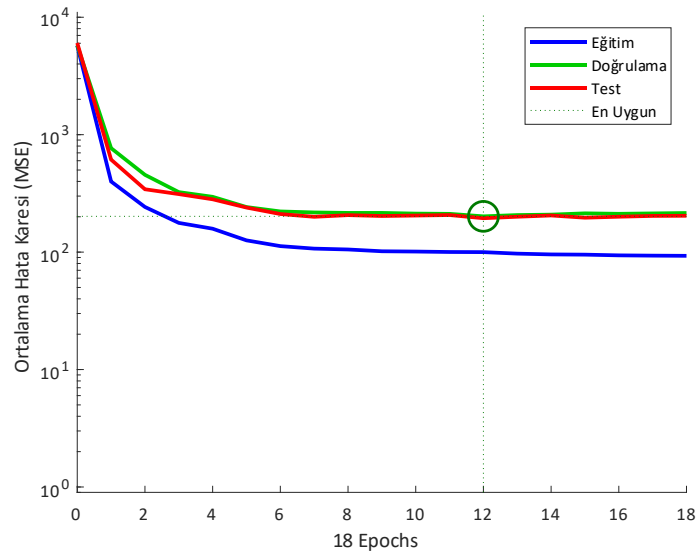
2.19	Gaussian Process	0,335	0,112	0,853	0,246	0,344	0,163	0,403	0,569
2.20	Gaussian Process	0,330	0,109	0,858	0,236	0,301	0,129	0,359	0,658
2.21	Gaussian Process	0,335	0,112	0,854	0,246	0,345	0,165	0,406	0,564
2.22	Neural Network	0,350	0,122	0,840	0,257	0,353	0,204	0,452	0,459
2.23	Neural Network	0,496	0,246	0,680	0,366	0,427	0,301	0,549	0,203
2.24	Neural Network	0,553	0,306	0,602	0,403	0,401	0,302	0,550	0,200
2.25	Neural Network	0,514	0,265	0,656	0,330	0,316	0,155	0,394	0,589
2.26	Neural Network	0,565	0,319	0,585	0,381	0,511	0,605	0,778	-0,597
2.27	Kernel	0,341	0,116	0,848	0,241	0,359	0,178	0,421	0,530
2.28	Kernel	0,343	0,118	0,846	0,256	0,344	0,161	0,401	0,573

4.4.2 YSA

Oluşturulan YSA modeli 265 satır veri ile denenmiş ve yapılan işlemin sonuçları YSA modelinin, Şekil 4.11 (a) eğitim ve Şekil 4.11 (b) ile Şekil 4.12 test performansını, Çizelge 4.6'da ise modelin ortalama hata karesi (MSE), test performansı ve hata değerini göstermektedir. Çizelge 4.8'den anlaşılacağı üzere modelin MSE değerinin çok yüksek (99,9631) olduğu görülmektedir ki bu durum YSA algoritmasının veri setini ezberlediğini (overfitting) göstermektedir. Bu durum YSA için gerekli veri sayısının yetersiz olduğuna dayandırılmıştır. Literatürde (Salam ve ark., 2021) YSA yönteminin en büyük problemlerinden yetersiz veri olması durumunda ezberleme durumunun olmasıdır ki bu çalışmada da benzer durumla karşılaşmıştır.



Şekil 4.11. YSA Eğitim (a) ve test (b) performans grafikleri



Şekil 4.12. YSA modeli MSE grafiği.

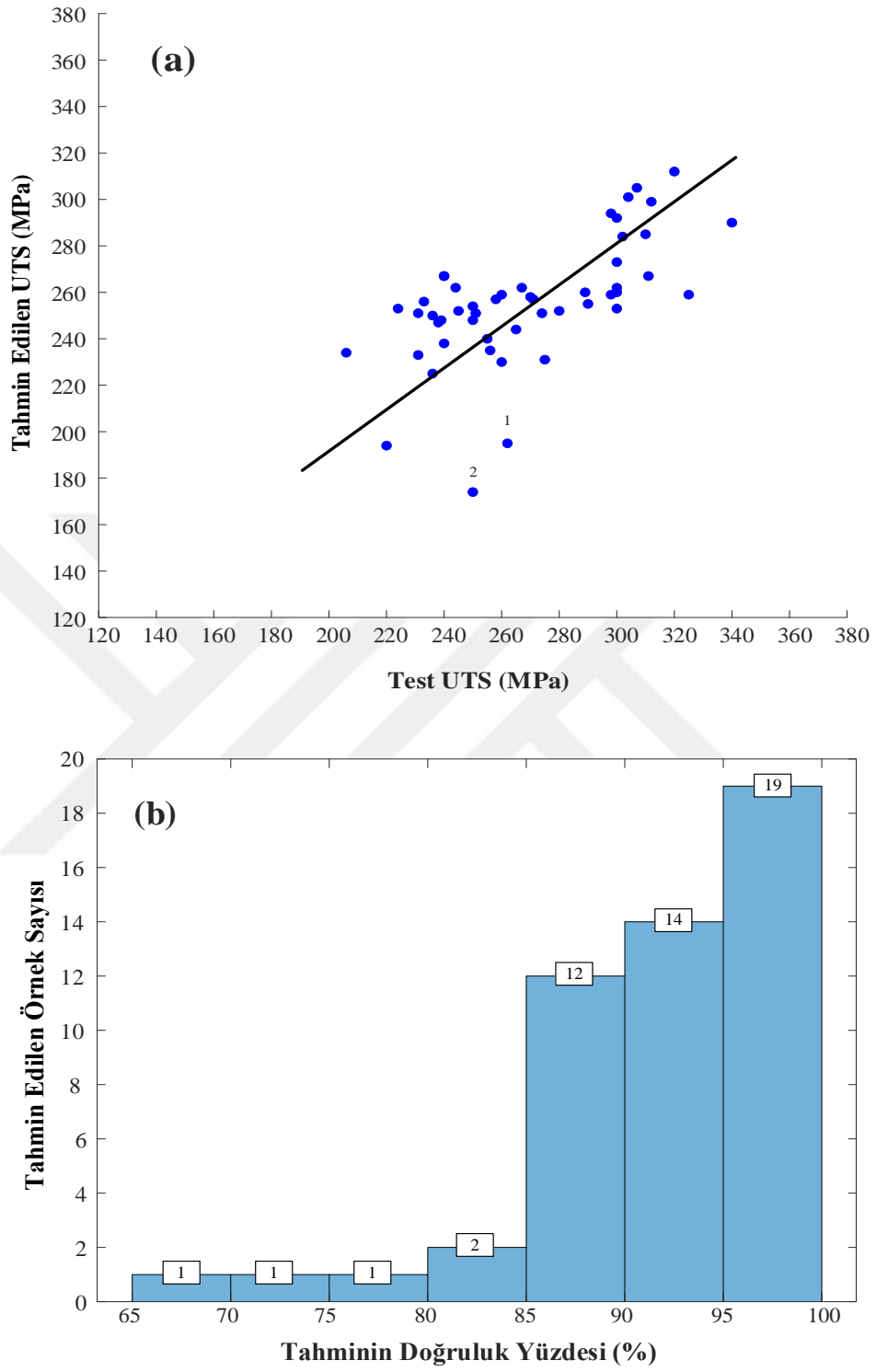
Çizelge 4.8. YSA modeli performans değerleri

YSA	Parametre
MSE:	99,9631
Test	209,3956
Hata:	% 55

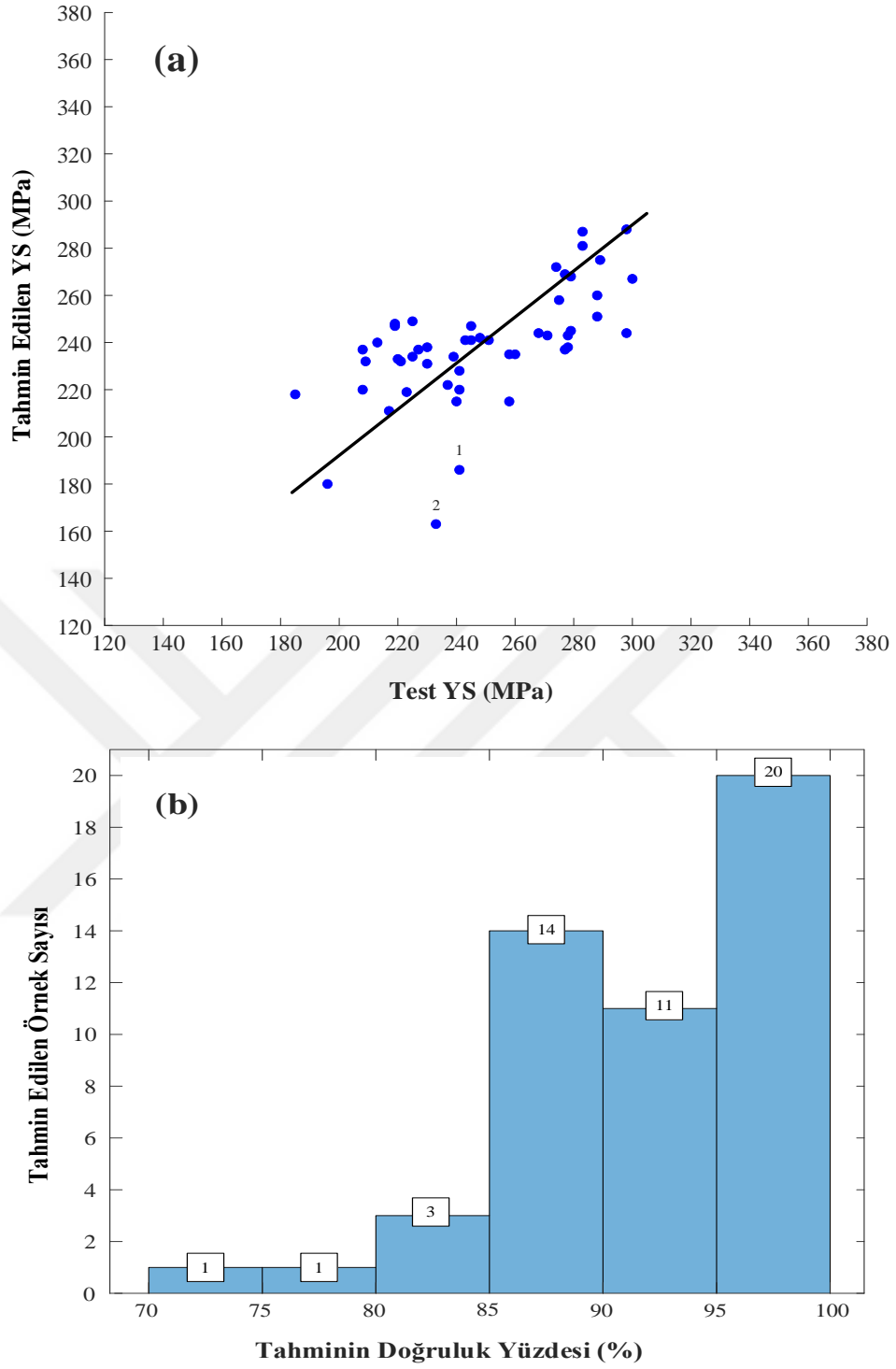
4.4.3 ANFIS

ANFIS modelinin başarı performansı 10 cross fold validation ile değerlendirilmiştir ve RMSE değerleri UTS için $1.54918e-06$, YS için $1.78371e-06$ ve ε için $3,36889e06$ olarak elde edilmiştir. Regresyon ve YSA algoritmalarının RMSE değerleri ANFIS sonuçları karşılaştırıldığında ANFIS'in RMSE değerlerinin en düşük olduğu gözlenmiştir. Dolayısı ile bu çalışmada ANFIS kullanılmıştır. Şekil 4.13-15'de, ANFIS modeli ile oluşturulan hem test hem de tahmin verilerinin sırasıyla UTS, YS ve ε değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekilde, test ve tahmin değerleri her iki tarafa da dağılmıştır ve 45° çizgisine daha yakındır, bu da geliştirilen ANFIS modelinin kabul edilebilir seviyede uyumunu göstermektedir. ANFIS modeli Şekil 4.13 (b)'de gösterildiği gibi 50 test verisinden 45'nin UTS değerlerini %85-100 aralığında doğru tahmin edebilmektedir. YS değerlerine ait hem test hem de tahmin verileri Şekil 4.14'da gösterilmiş olup, modelin toplam doğruluk düzeyi Şekil 4.14 (b)'de verilmiştir. Şekil 4.14 (b)'de 50 test verisinden 45'inin YS değerlerinin doğruluğu %85-100 aralığında olduğu görülmektedir.

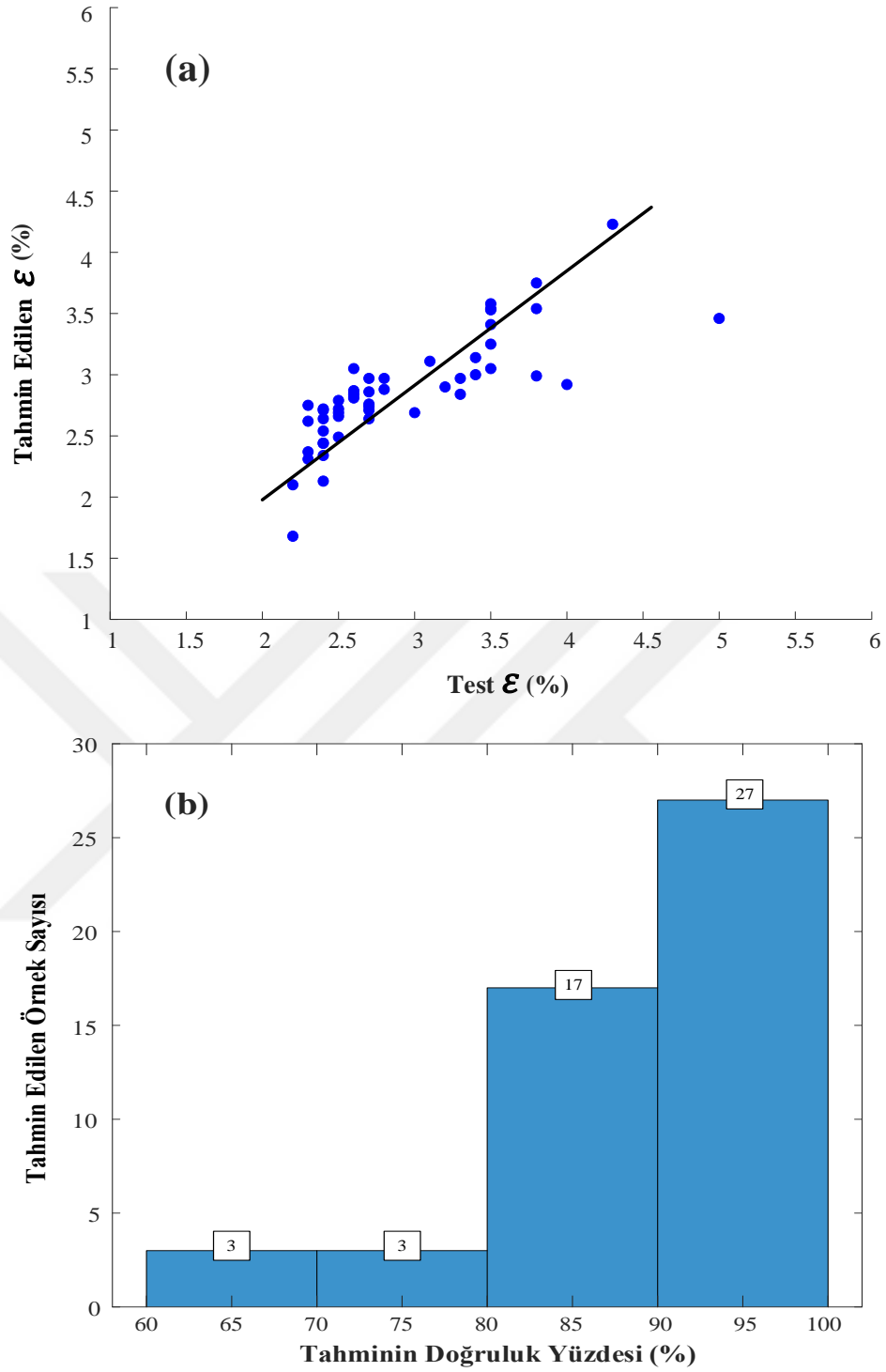
Şekil 4.13 (a) ve Şekil 4.14.(a)'da iki tahminin aykırı değerleri #1 ve #2 olarak işaretlenmiştir. Bu sapmaların nedeninin A357 Al alaşım standardının hemen dışında olan minimum seviyede Si ve Mg içeriğine sahip olan (yani %6,50 Si ve %0,45 Mg) sınırdasınır altındaki numunelere atfedilmiştir (#1 Si: %6,5766, Mg: %0,4439, #2 Si: %6,4679, Mg: %0,4991). A357 Al alaşımının dökümhane uygulamasında, alaşımın Si içeriği minimum değere çok yakınsa (~ %6,50) Mg içeriği daha yüksek bir seviyede tutulur. Dökümhaneler hem Si hem de Mg içeriği en düşük olan numuneleri dikkate almadığından bu tür numuneler için veri elde etmek zordur. Firmaların sağladığı 215 eğitim verisinden sadece 3 tanesi en düşük sınır hattı limitlerindeki örneklerin eğitimi için uygundu. Bu nedenle, alt sınır çizgisinde hem Si hem de Mg içeriğine sahip alaşımlar için ANFIS tahminindeki hata, sınır dışı tahminlerinin eğitimi için mevcut düşük Si ve Mg verilerinin yetersiz olmasına bağlanmaktadır. Test ve tahmin edilen ε değerleri, Şekil 4.15 (a)'da karşılaştırılmıştır ve Şekil 4.15 (b)'de görüldüğü üzere 50 test verisinden 44'ünün doğruluğu, %80-100 aralığındadır.



Şekil 4.13. Test ve tahmin edilen UTS sonuçları (a) ve ANFIS'in doğruluk dağılım sonuçları (b)



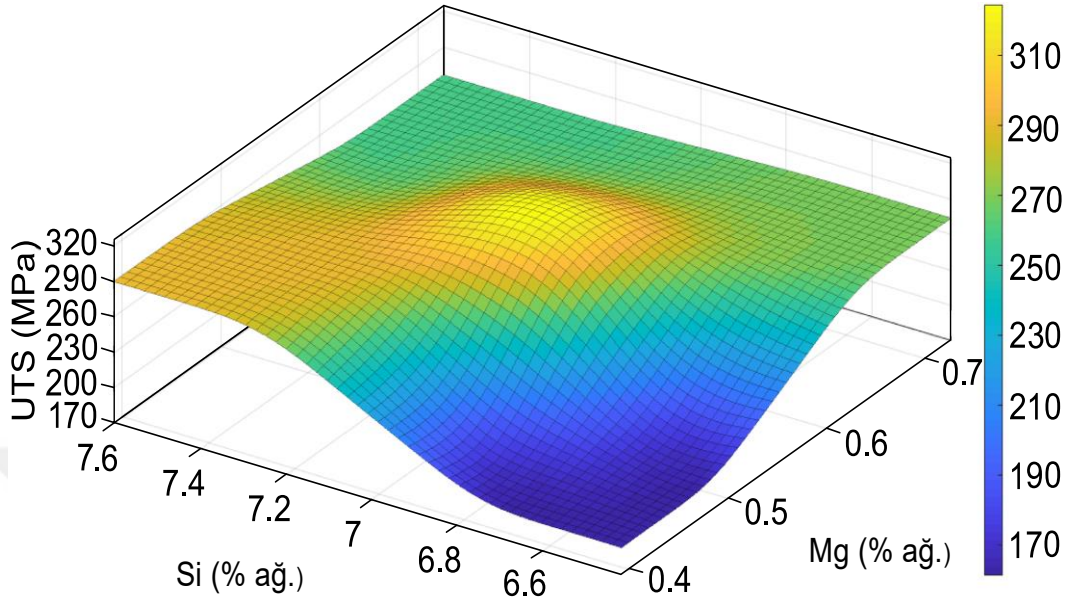
Şekil 4.14. Test ve tahmin edilen YS sonuçları (a) ve ANFIS'in doğruluk dağılım sonuçları (b)



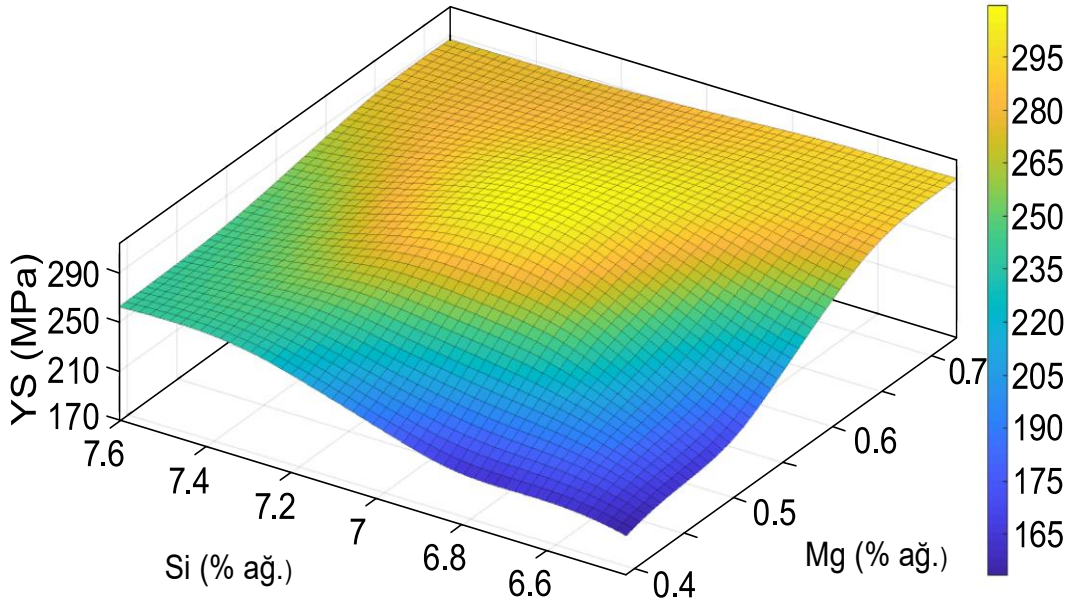
Şekil 4.15. Test ve tahmin edilen ϵ sonuçları (a) ve ANFIS'in doğruluk dağılım sonuçları (b)

A357 Al alaşımındaki iki ana element Si ve Mg'dur ve bu iki elementlerin bileşim oranındaki değişiklikler mekanik özellikleri doğrudan etkiler (Möller ve ark., 2012). Şekil 4.16-18, Si ve Mg kombinasyonlarının bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için tahmin edilen UTS, YS ve ϵ değerlerinin eğriye oturtulmuş yüzey grafiklerini göstermektedir.

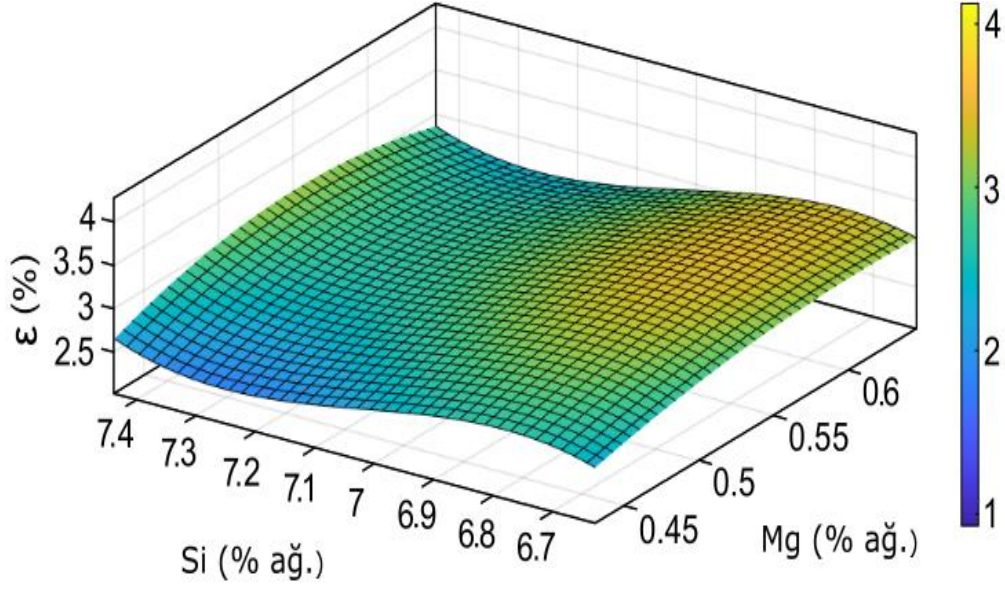
Şekillerde görüldüğü gibi, UTS ve YS değerleri hem Si hem de Mg oranlarına bağlı olarak artmaktadır.



Şekil 4.16. Si ve Mg içeriğinin bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için tahmin edilen UTS değerlerinin eğriye uygun yüzey grafikleri.



Şekil 4.17. Si ve Mg içeriğinin bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için tahmin edilen YS değerlerinin eğriye uygun yüzey grafikleri



Şekil 4.18. Si ve Mg içeriğinin bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için tahmin edilen ϵ değerlerinin eğriye uygun yüzey grafikleri

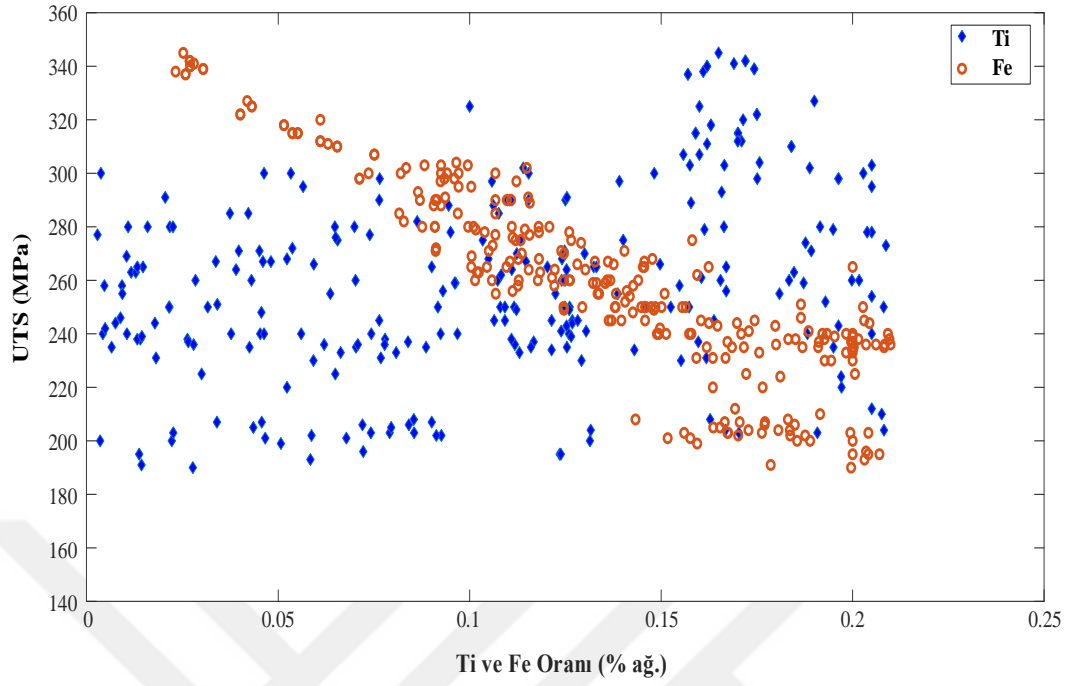
Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 dikkate alındığında, UTS ve YS'deki artışın %0,55 Mg içeriğinin üzerinde başladığı görülmektedir. Bu tahmin, literatürün (Möller ve ark., 2012) (Dash ve Chen, 2023) yanı sıra test verileriyle de tamamen tutarlıdır. Örneğin Möller ve ark. (2012), A357 Al alaşımındaki Mg içeriğinin etkisini deneysel olarak incelemiş ve Mg'nin Si ile intermetalik Mg_2Si oluşturduğu ve bu intermetaliklerin küçük miktarlarının, Al alaşım matrisi boyunca eşit şekilde dağılan Si parçacıklarının çevresinde çökelerek mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varmıştır. Çalışmalarında (Möller ve ark., 2012), etkili çökelti sertleşmesi için yeterli Mg içeriği miktarının ağırlıkça % ~ 0,55 Mg olduğu görülmektedir. Öte yandan, ANFIS tahmini, Si içeriğindeki artışın, Şekil 4.16'da gösterildiği gibi daha düşük Mg içeriğinde (yani $Mg < \% 0,55$) UTS kaybını telafi ettiğini göstermektedir.

Al-Si alaşımının mekanik özelliklerinin Si fazlarının artmasıyla arttığı, özellikle yüksek oranda dağılmış poligonal Si fazlarının alaşımın güçlendirilmesinde daha etkili olduğu iyi bilinmektedir (Kalhapure ve Dighe, 2015). Şekil 4.18'de gösterildiği gibi ϵ düşük Si oranlarında daha yüksektir. Temel metalurjiden bilindiği üzere, Al alaşımı içindeki Si miktarı arttıkça uzama azalmaktadır ve buradaki sonuçlar literatürle uyumludur (Möller ve ark., 2012) (Dash ve Chen, 2023). Şekil 4.16-18'in önemi, ANFIS'in, A357 Al alaşımındaki Si ve Mg içeriğinin bir fonksiyonu olarak UTS, YS ve ϵ 'deki değişimleri başarıyla tahmin edebilmesidir. Yayımlanan diğer deneysel

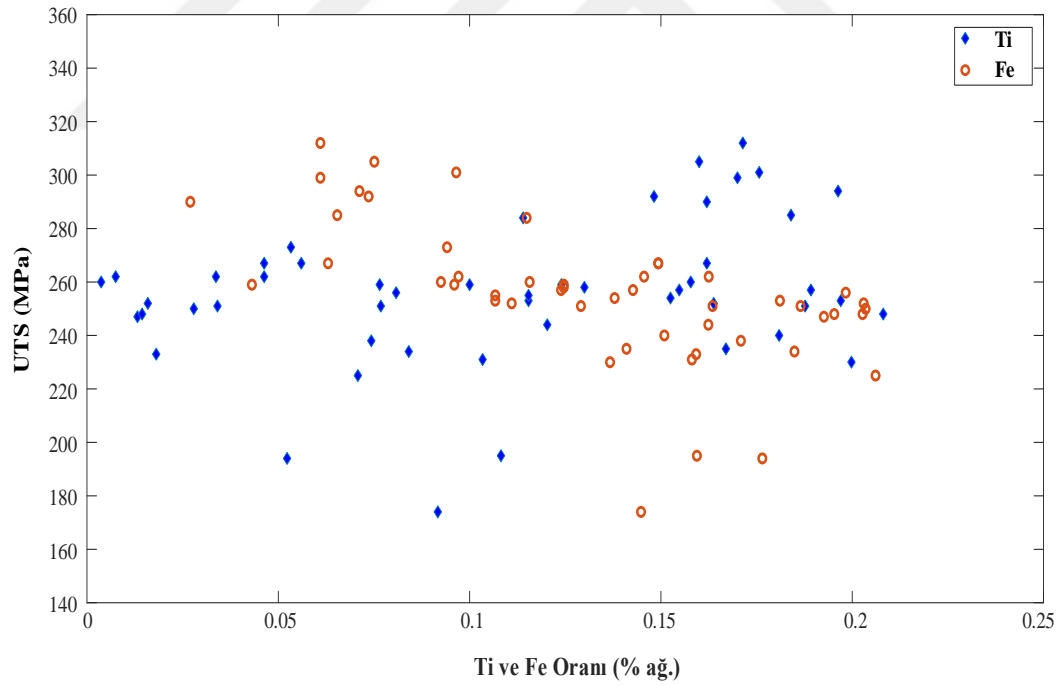
çalışmalardan (Möller ve ark., 2012) (Dash ve Chen, 2023), A357 alaşımının UTS ve YS'sinden elde edilen veriler Şekil 4.16 ile uyumludur.

Şekil 4.19 (a,b) - 21 (a,b), sırasıyla A357 Al alaşımının Fe ve Ti içeriklerinin bir fonksiyonu olarak hem eğitim veri setinden hem de ANFIS tahmininden çizilen UTS, YS ve ϵ değerlerini göstermektedir. A357 Al alaşımındaki mekanik özellikleri etkileyen en önemli safsızlıklardan biri Fe ve Ti'dir (Campbell, 2003) (Taylor, 2012). Ti, tane inceltici olarak kullanıldığı için biręok Al alaşımında mevcuttur. Alaşımın Fe iğeriğinin artmasıyla UTS, YS ve ϵ 'nin keskin bir Şekilde azaldığı ve etkisinin Şekil 4.19 (ab) – 21 (ab) 'de gösterildiği gibi ağırlıkça % 0,1'in üzerinde daha belirgin olduğu gözlenmiştir.



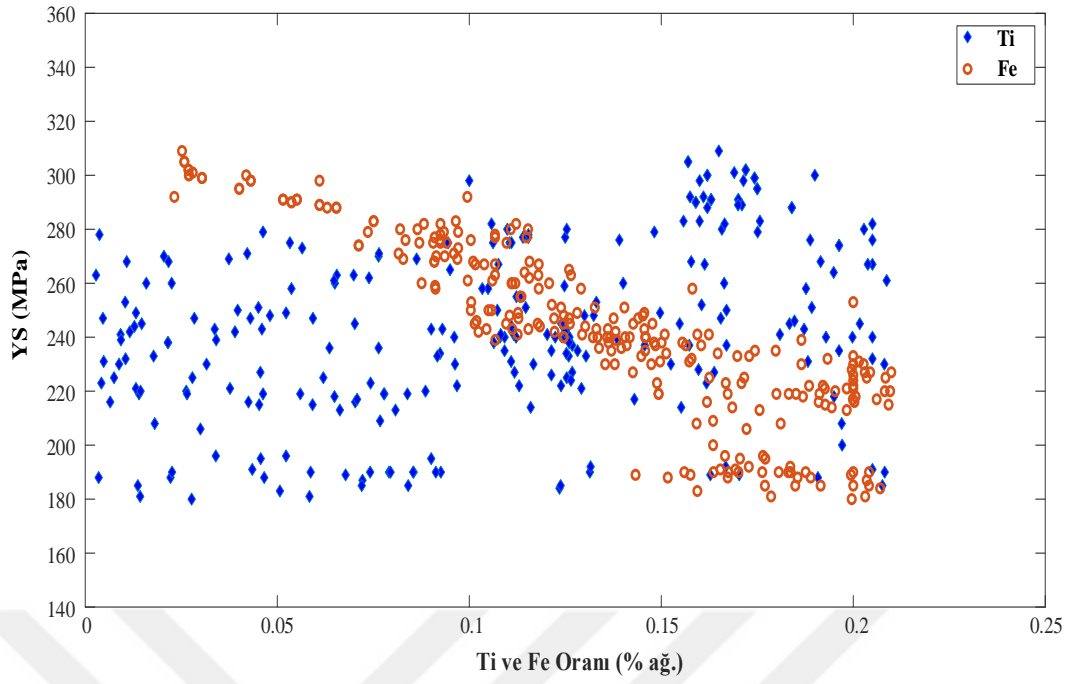


(a)

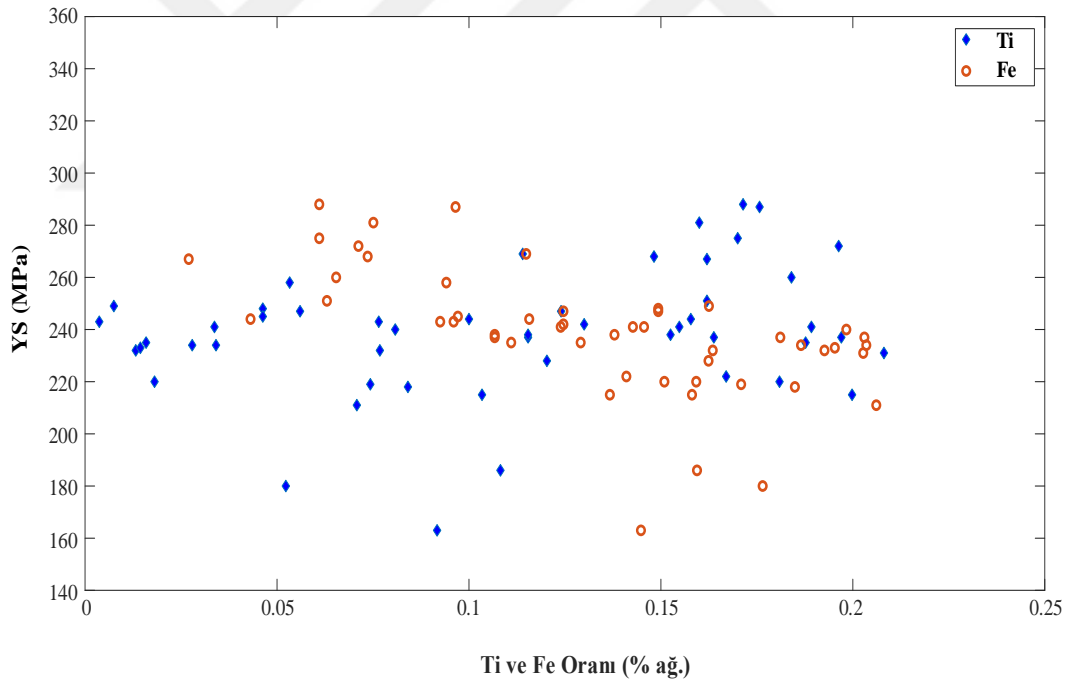


(b)

Şekil 4.19. A357 Al alaşımındaki Fe ve Ti içeriklerinin bir fonksiyonu olarak eğitim veri setinden (a) ve ANFIS tahmininden çizilen (b) UTS değerleri

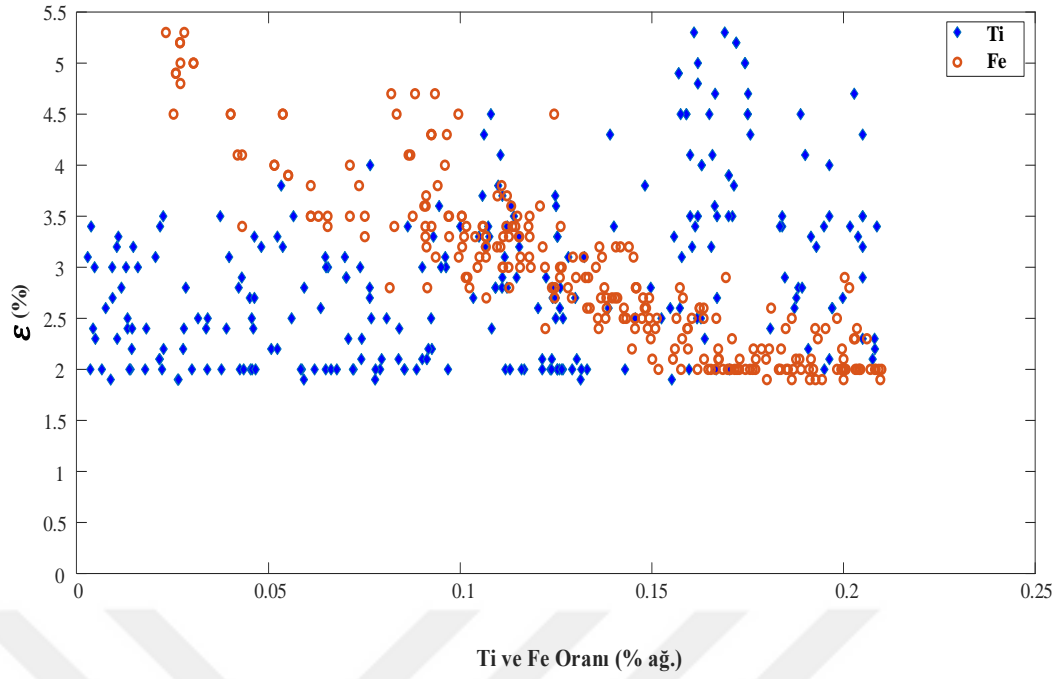


(a)

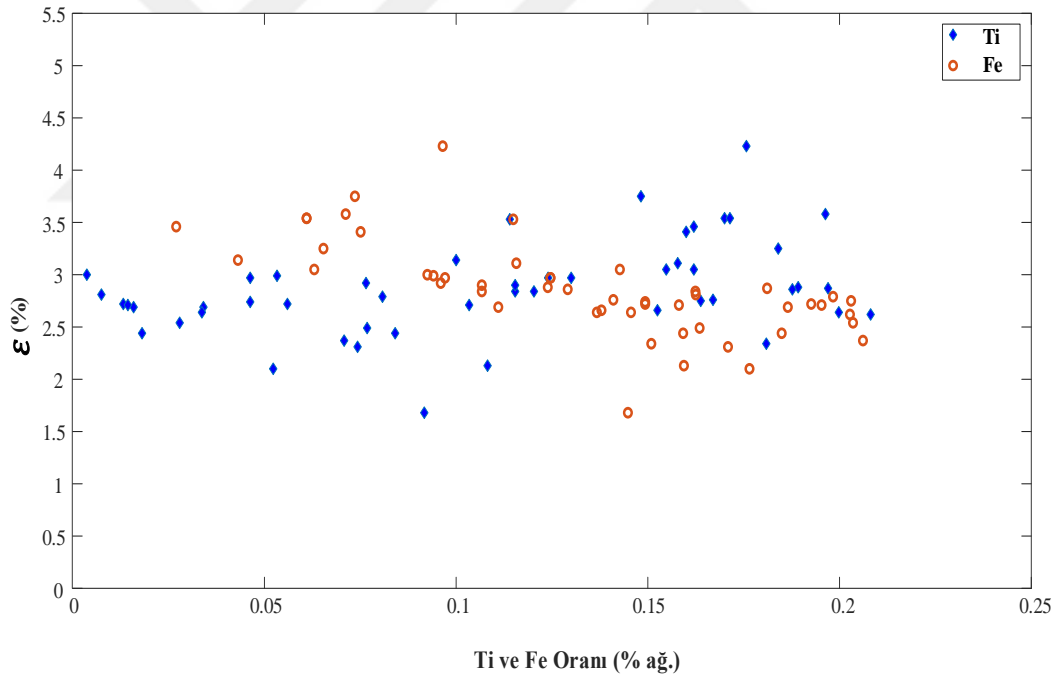


(b)

Şekil 4.20. A357 Al alaşımındaki Fe ve Ti içeriklerinin bir fonksiyonu olarak eğitim veri setinden (a) ve ANFIS tahmininden çizilen (b) YS değerleri



(a)

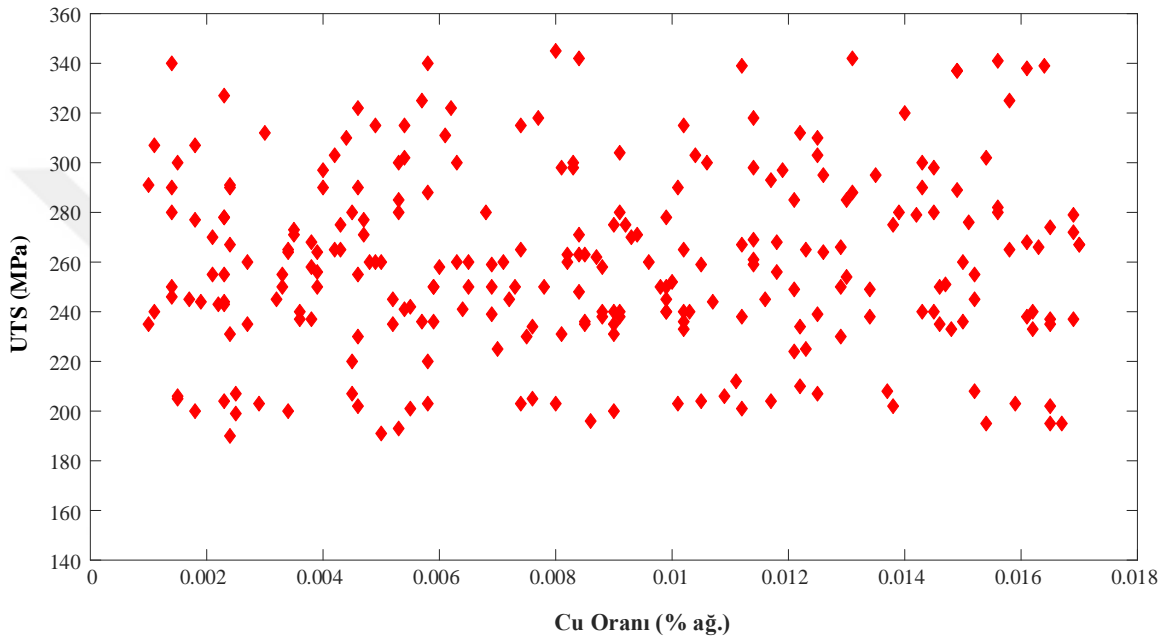


(b)

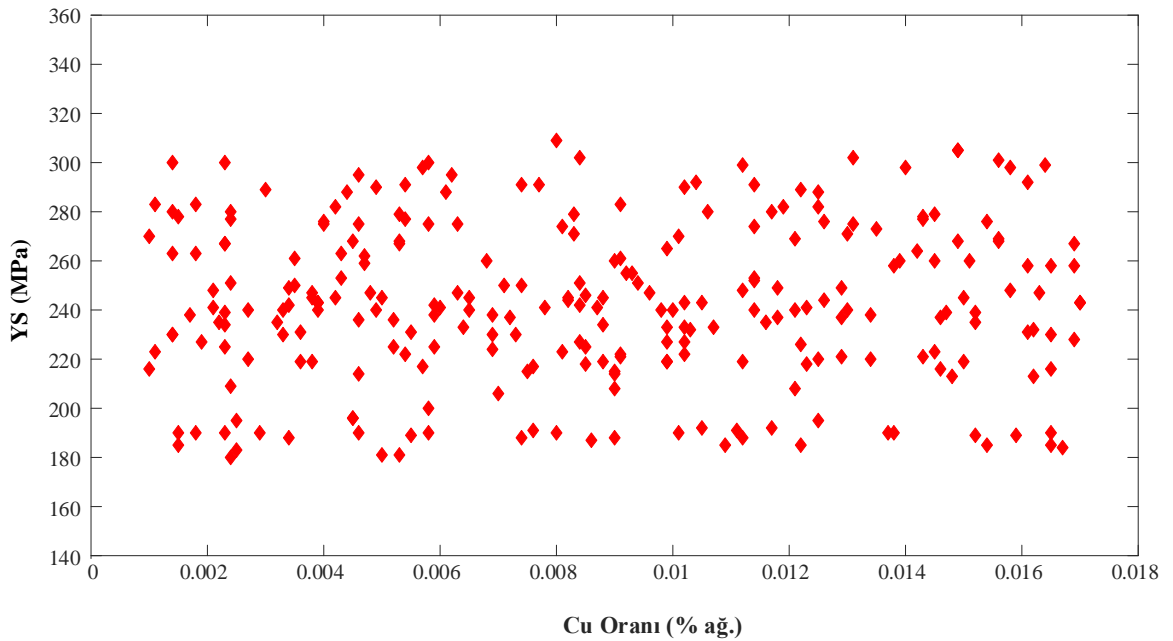
Şekil 4.21. A357 Al alaşımındaki Fe ve Ti içeriklerinin bir fonksiyonu olarak eğitim veri setinden (a) ve ANFIS tahmininden çizilen (b) ϵ değerleri

Önerilen tahmin modeli, Şekil 4.19 (b)-21 (b)'de gösterildiği gibi alaşımdaki Fe içeriğinin UTS, YS ve ϵ üzerindeki zararlı etkisini başarıyla tahmin edebildiği açıktır. Öte yandan, Ti içeriğinin UTS ve YS'yi ağırlıkça %0,15'e kadar önemli ölçüde etkilemediği

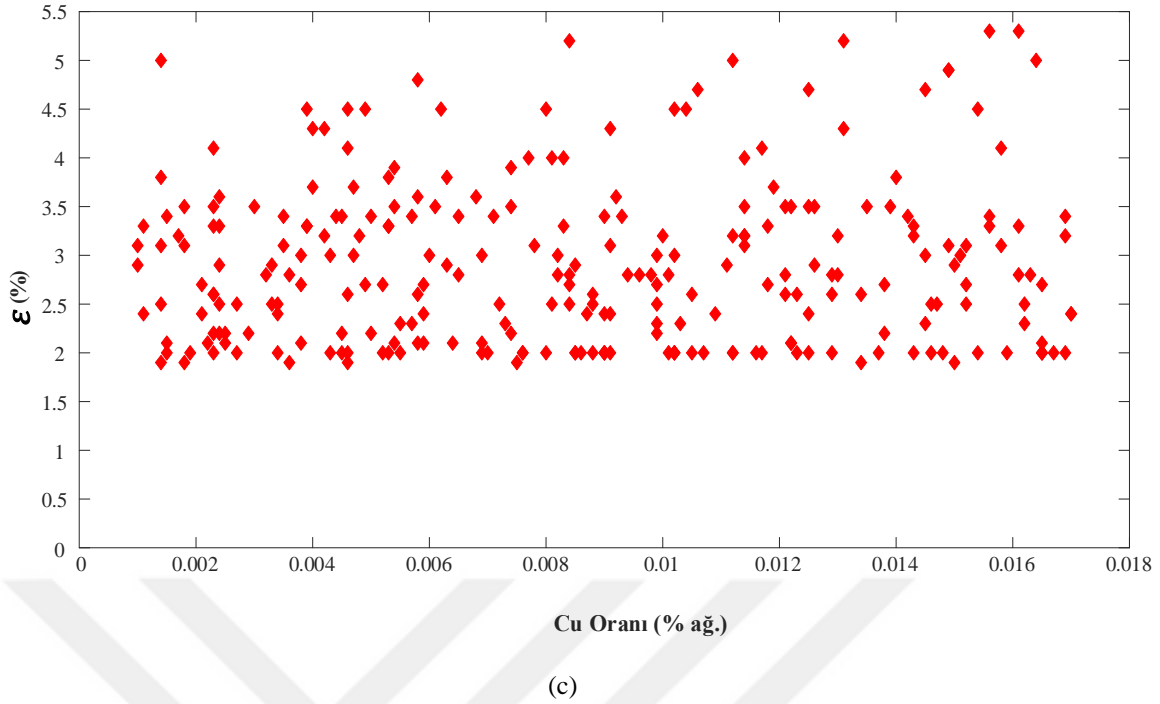
görülmektedir; bu değerin üzerinde UTS ve YS'yi artırmadaki etkisi, Şekil 4.19 (a,b) - 21 (a,b) 'de görüldüğü üzere dikkate değerdir. Ancak Ti ilavesi, Şekil 4.21 'de gösterildiği gibi UTS ve YS ile karşılaştırıldığında daha düşük içeriklerde bile ϵ 'yi etkiliyor gibi görünmektedir. Cu içeriğinin Şekil 4.22 (a-c)'de görüldüğü gibi UTS, YS ve ϵ 'yi etkilememektedir. A357 Al alaşımında Cu'nun diğer elementlere nazaran daha az etkisi, alaşımdaki nispeten düşük miktarda olmasına (Fe veya Ti içeriğinden yaklaşık 10 kat daha düşük) atfedilmiştir.



(a)

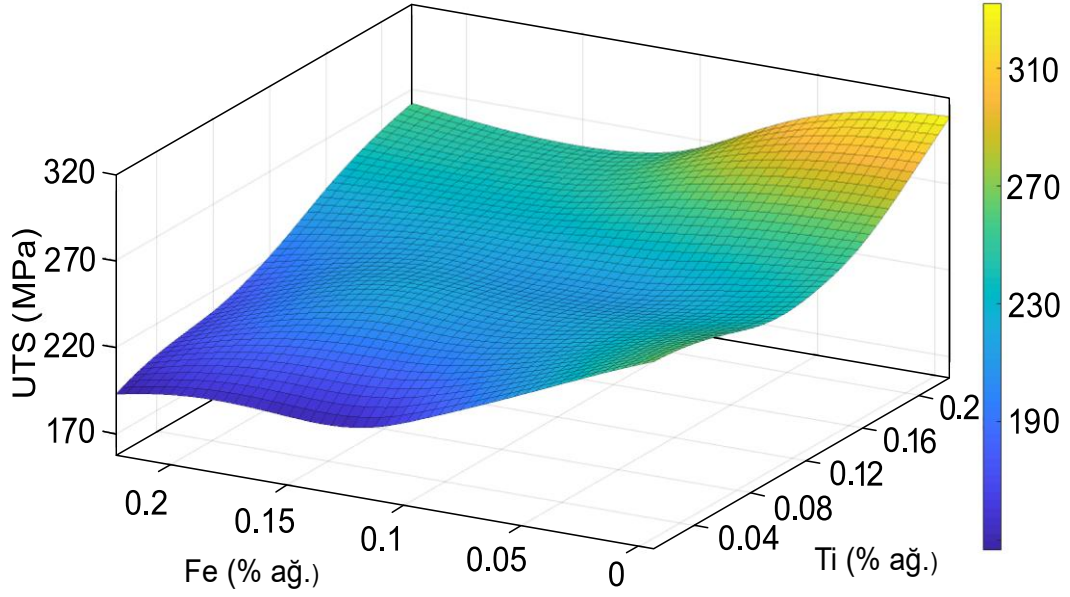


(b)



Şekil 4.22. A357 Al alaşımındaki Cu içeriğinin bir fonksiyonu olarak eğitim veri setinden çizilen UTS (a), YS (b) ve ε (c) değerleri

Daha yüksek Fe içeriğinin zararlı etkisi, katılaşma sırasında oluşan Fe içeren intermetalik fazların oluşumundan kaynaklanmaktadır (Taylor, 2012) (Risonarta ve ark., 2020). Al alaşımındaki Fe, Si ve Mg ile birleşerek ağırlıklı olarak $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ (α -fazı), Al_3FeSi (β -fazı) ve $\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$ (π -fazı) intermetalik fazlar oluşturma eğilimindedir (Bkz. Bölüm 2.1.3). Tüm bu kırılgan intermetalik fazlar, (Taylor, 2012) tarafından bildirildiği gibi Al-Si bazlı döküm alaşımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde azaltır. Risonarta ve ark. (2020) Mg içeriğinin A357 Al alaşımından biraz daha düşük olduğu A356 alaşımındaki Fe'nin etkisini deneysel olarak incelemiş ve alaşımdaki Fe'nin zararlı etkisinin ağırlıkça %0,1'in üzerinde daha belirgin olduğunu bildirmiştir. Şekil 4.23, Fe ve Ti kombinasyonlarının bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için öngörülen UTS değerlerinin eğriye oturtulmuş yüzey grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.23 incelendiğinde UTS değerlerinin Fe içeriğinin artmasıyla azaldığı, Ti içeriğinin artmasıyla ise arttığı görülmektedir. Şekil 4.23 aynı zamanda Risonarta ve ark. (2020) deneysel sonuçlarıyla uyumlu olarak keskin eğimin ağırlıkça %0,1 Fe civarında başladığını göstermekte ve modelin geçerliliğinin makul olduğunu desteklemektedir. Model ayrıca, daha yüksek Fe'nin zararlı etkisinin, Şekil 4.23'te gösterildiği gibi alaşımın Ti içeriğinin artırılmasıyla bir ölçüde azaltılabileceğini de öngörmektedir.



Şekil 4.23. Fe ve Ti kombinasyonunun bir fonksiyonu olarak A357 Al alaşımı için öngörülen UTS değerlerinin eğriye uygun yüzey grafikleri

ANFIS modeli UTS, YS ve ϵ değerlerinde hem test verileriyle hem de literatürde yayınlanmış deneysel sonuçlarla benzer eğilimlerle kabul edilebilir düzeyde tutarlılık göstermiştir. Belli çekme özellikleri gerektiğinde, oksit kalıntıları, gözeneklilik, büzülme kusurları ve sıcak yırtılma gibi döküm kusurlarının minimum düzeyde ve benzer ısıl işlem olması koşuluyla, A357 Al alaşımının mekanik özelliklerini tahmin etmek için Şekil 4.16-18 ve Şekil 4.23, kullanılabilir. Metalurjik açıdan bakıldığında, ısıl işlemlerin benzer olması koşuluyla mevcut yaklaşımın A357 Al alaşımının kum döküm, kokil kalıp ve yüksek basınçlı döküm gibi diğer döküm yöntemlerine de uygulanabileceği ileri sürülebilir.

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

A357 Al alaşımındaki Si ve Mg gibi ana alaşım elementleri ve en yaygın Fe, Ti ve Cu safsızlık içerikleri ile mekanik özellikler arasındaki ilişki, ML yöntemleri kullanılarak çalışılmış ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- ML çalışmaları, Regresyon algoritmalarının makul tahmin sonuçlarına ulaşamadığını göstermiştir.
- YSA algoritmasının uygulanmasında veri setini ezberleme (overfitting) problemi ortaya çıkmıştır bu durum veri setinin azlığına dayandırılmıştır.
- Sistemin az miktarda veriye sahip olması durumunda ezberleme sorunu olmadan daha yüksek doğrulukta bir algoritma olan ANFIS modeli tarafından tahmin edilen UTS, YS ve ϵ değerlerinde test verileriyle deneysel çalışmalara benzer tahmin tutarlılığı göstermiştir.
- A357 Al alaşımı için belirli bir döküm ve ısıtma işlem rejiminde, oluşturulan ANFIS modeli $>85\%$ tahmin doğruluğu ile kabul edilebilir bir güvenilirliğe sahiptir.
- ANFIS tahmin sonucuna göre UTS, YS ve ϵ için göreceli önem sırası sırasıyla Fe, Si, Mg ve Ti içeriğidir. Bununla birlikte, Cu içeriğinin etkisi, A357 Al alaşımındaki düşük miktarına dayandırılarak ihmal edilebilir düzeydedir.
- Bu çalışmanın sonuçları, dökümlere yönelik ticari yazılımın daha da geliştirilmesi amacıyla endüstriyel uygulamalarda LPDC A357 Al alaşımının döküm performansının kontrolü için bir temel oluşturabilir.

5.2 Öneriler

- Eğitim verileri artırılarak ANFIS'in tahmin hassasiyeti artırılabilir.
- Farklı yaşlandırma ısı işlem sıcaklıkları ve sürelerine bağlı veri seti genişletilerek UTS, YS ve ε tahminleri yapılabilir.
- Mg'un alt sınır şartlarındaki bileşimlerinde ANFIS'in eğitimi için A356 Al alaşımı çalışılabilir.
- A357 Al alaşımı LPDC'deki benzer döküm şartlarında kum, kokil gibi diğer döküm yöntemlerinde uygulanarak modelin geçerliliği test edilebilir.



6 KAYNAKLAR

- Abboud, J., & Mazumder, J. (2020). Developing of nano sized fibrous eutectic silicon in hypereutectic Al–Si alloy by laser remelting. *Scientific Reports*, *10*(1), 12090.
- Abdullatef, M. S., Alzubaidi, F. N., Al-Tamimi, A., & Mahmood, Y. A. (2023). Fatigue Life Estimation of High Strength 2090-T83 Aluminum Alloy under Pure Torsion Loading Using Various Machine Learning Techniques. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, *19*(8).
- Al-Azzawi, A. (2021). Fourier transform based epileptic seizure features classification using scalp electrical measurements using KNN and SVM. Yüksek Lisans. *Altınbaş Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- ALCOA ,2002, “Manufacturing casting methods- the Al automotive manual”, European Al Association.
- Aldoğan, E. B. (2021). Grain refinement of al-si-mg cast alloys with niobium–boron addition. Yüksek Lisans, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.
- Alexopoulos, N. D., & Pantelakis, S. G. (2004). Quality evaluation of A357 cast aluminum alloy specimens subjected to different artificial aging treatment. *Materials & design*, *25*(5), 419-430.
- Anijdan, S. M., Bahrami, A., Hosseini, H. M., & Shafyei, A. (2006). Using genetic algorithm and artificial neural network analyses to design an Al–Si casting alloy of minimum porosity. *Materials & design*, *27*(7), 605-609.
- Asghar, G., Peng, L., Fu, P., Yuan, L., & Liu, Y. (2020). Role of Mg₂Si precipitates size in determining the ductility of A357 cast alloy. *Materials & Design*, *186*, 108280.
- Ashtiani, H. R., & Shahsavari, P. (2016). A comparative study on the phenomenological and artificial neural network models to predict hot deformation behavior of AlCuMgPb alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, *687*, 263-273.
- Askeland, D. R. (1998). Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt I. Çeviren) *Erdoğan, M., Nobel Kitapevi, Ankara*.
- Association, A. (1988). *Aluminum Standards and Data, 1988*. Aluminum Association.
- Aydin, B. (2002). AA2014 alaşımında yaşlandırma ısı işleminin işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

- Babajanzade Roshan, S., Behboodi Jooibari, M., Teimouri, R., Asgharzadeh-Ahmadi, G., Falahati-Naghbi, M., & Sohrabpoor, H. (2013). Optimization of friction stir welding process of AA7075 aluminum alloy to achieve desirable mechanical properties using ANFIS models and simulated annealing algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5-8), 1803-1818. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5131-6>
- Backerud, L. (1983). How does a good grain refiner work? *Light Metal Age*, 41(9/10), 6-12.
- Baykal, N., & Beyan, T. (2004). Bulanık Mantık, İlke ve Temelleri. Bıçaklar Kitabevi
- Birol, Y. (2009). Response to artificial ageing of dendritic and globular Al-7Si-Mg alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 484(1-2), 164-167.
- Bishop, C. M., (2006). *Pattern recognition and machine learning* (C. 4). Springer. <https://link.springer.com/in/book/9780387310732>
- Biswas, A., Siegel, D. J., & Seidman, D. N. (2014). Compositional evolution of Q-phase precipitates in an aluminum alloy. *Acta Materialia*, 75, 322-336.
- Bock, F. E., Aydin, R. C., Cyron, C. J., Huber, N., Kalidindi, S. R., & Klusemann, B. (2019). A review of the application of machine learning and data mining approaches in continuum materials mechanics. *Frontiers in Materials*, 6, 110.
- Bolzoni, L., & Babu, N. H. (2019). Towards industrial Al-Nb-B master alloys for grain refining Al-Si alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5631-5638.
- Bolzoni, L., Nowak, M., & Babu, N. H. (2015). Grain refining potency of Nb-B inoculation on Al-12Si-0.6 Fe-0.5 Mn alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 623, 79-82.
- Buchner, H. J., & Glosner, J. (2015). Foundry industry 2020: Trends and challenges. *IKB Deutsche Industriebank AG, Düsseldorf 23rd April*.
- Caceres, C. H., Davidson, C. J., Griffiths, J. R., & Wang, Q. G. (1999). The effect of Mg on the microstructure and mechanical behavior of Al-Si-Mg casting alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(10), 2611-2618. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0301-8>
- Caceres, C. H., Djurdjevic, M. B., Stockwell, T. J., & Sokolowski, J. H. (1999). The effect of Cu content on the level of microporosity in Al-Si-Cu-Mg casting alloys. *Scripta Materialia*, 40(5), 631-637.
- Caceres, C. H., & Selling, B. I. (1996). Casting defects and the tensile properties of an AlSiMg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 220(1-2), 109-116.

- Callister, W. D., Rethwisch, D. G., Blicblau, A., Bruggeman, K., Cortie, M., Long, J., Hart, J., Marceau, R., & Mitchell, R. (2007). *Materials science and engineering: An introduction (C. 7)*. John Wiley & sons New York.
- Campbell, J. (2003). *Castings*. Elsevier. University of Birmingham.
- Cao, H., Sun, Q., Pu, Q., Wang, L., Huang, M., Luo, Z., & Che, J. (2019). Effect of vacuum degree and T6 treatment on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Cu alloy die castings. *Vacuum*, 172, 109063.
- Cemil, Ç. (2015). AHP VE Dematel Tabanlı ANFIS ile Sıcaklık Tahmininin Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Kocaeli Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Bölümü*,
- Ceschini, L., Morri, A., Morri, A., Gamberini, A., & Messieri, S. (2009). Correlation between ultimate tensile strength and solidification microstructure for the sand cast A357 aluminium alloy. *Materials & Design*, 30(10), 4525-4531.
- Chen, P., Zeng, J. M., Gan, W. K., & Liu, J. B. (2014). Comparison of Mechanical Properties of 357-T6 Aluminum Alloy Aast under Gravity Permanent Casting and Low Pressure Die Casting. *Advanced Materials Research*, 941, 77-80.
- Chen, L., Wu, Y., Liu, Y., Liu, T., & Sheng, X. (2021). Time-Series Prediction of Iron and Silicon Content in Aluminium Electrolysis Based on Machine Learning. *IEEE Access*, 9, 10699-10710.
- Chiesa, F., Duchesne, B., Morin, G., Tougas, B., Giguère, N., & Baril, J. (2018). „Experience in the Low-Pressure Casting in Printed Molds of a Thin Bladed Aluminum A356 Impeller,“. *Proceedings of the ICAA 17th Conference, McGill University, Paper, 393525*, 17-21.
- Chukwuma, A. M., Godwills, C. I., Nwaeju, C. C., & Onyemachi, O. F. (2024). Artificial Neural Network and Fuzzy Logic Based Techniques for Numerical Modeling and Prediction of Aluminum-5% Magnesium Alloy Doped with REM Neodymium. *International Journal of Nonferrous Metallurgy*, 11(1), 1-19.
- Cinkilic, E., Ridgeway, C. D., Yan, X., & Luo, A. A. (2019). A Formation Map of Iron-Containing Intermetallic Phases in Recycled Cast Aluminum Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(12), 5945-5956. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05469-6>
- Dash, S. S., & Chen, D. (2023). A review on processing–microstructure–property relationships of Al-Si alloys: Recent advances in deformation behavior. *Metals*, 13(3), 609.
- Davis, F. A., & Eyre, T. S. (1994). The effect of silicon content and morphology on the wear of aluminium-silicon alloys under dry and lubricated sliding conditions. *Tribology international*, 27(3), 171-181.

- Dwivedi, S. P., Sharma, S., & Mishra, R. K. (2014). A356 aluminum alloy and applications-a review. *Advanced materials manufacturing & characterization*, 4(2), 81-86.
- Dewan, M. W., Huggett, D. J., Liao, T. W., Wahab, M. A., & Okeil, A. M. (2016). Prediction of tensile strength of friction stir weld joints with adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and neural network. *Materials & Design*, 92, 288-299.
- Dezecot, S., & Brochu, M. (2015). Microstructural characterization and high cycle fatigue behavior of investment cast A357 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*, 77, 154-159.
- Dispinar, D. (2006). Determination of metal quality of aluminium and its alloys Master of philosophy. *University of Birmingham*
- Doğan, O. (2016). Uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sisteminin (ANFIS) talep tahmini için kullanımı ve bir uygulama. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 31(1), 257-288.
- Dong, X., Zhu, X., & Ji, S. (2019). Effect of super vacuum assisted high pressure die casting on the repeatability of mechanical properties of Al-Si-Mg-Mn die-cast alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 105-113.
- Espinosa, J., Vandewalle, J., & Wertz, V. (Ed.). (2005). Fuzzy Control. İçinde *Fuzzy Logic, Identification and Predictive Control* (ss. 123-150). Springer. https://doi.org/10.1007/1-84628-087-7_5
- Es-Said, O. S., Lee, D., Pfof, W. D., Thompson, D. L., Patterson, M., Foyos, J., & Marloth, R. (2002). Alternative heat treatments for A357-T6 aluminum alloy. *Engineering Failure Analysis*, 9(1), 99-107.
- Fortini, A., Merlin, M., Fabbri, E., Pirletti, S., & Garagnani, G. L. (2016). On the influence of Mn and Mg additions on tensile properties, microstructure and quality index of the A356 aluminum foundry alloy. *Procedia Structural Integrity*, 2, 2238-2245.
- Gaikwad, V. S., & Chinchankar, S. S. (2022). Adaptive Neuro Fuzzy Inference System to Predict the Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA7075-T651 Joints. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 16(3).
- Gan, Y. X., & Overfelt, R. A. (2006). Fatigue property of semisolid A357 aluminum alloy under different heat treatment conditions. *Journal of Materials Science*, 41(22), 7537-7544. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0838-5>
- Geçkinli, E. (2002). Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi, 2. *Isıl İşlem Sempozyumu CD'si*, 07-08.

- Gola, J., Webel, J., Britz, D., Guitar, A., Staudt, T., Winter, M., & Mücklich, F. (2019). Objective microstructure classification by support vector machine (SVM) using a combination of morphological parameters and textural features for low carbon steels. *Computational Materials Science*, 160, 186-196.
- Gupta, A., & Hoffman, J. (2001). A better way to cast aluminum. *Machine Design*, 73(20), 67-68.
- Haghdadi, N., Zarei-Hanzaki, A., Khalesian, A. R., & Abedi, H. R. (2013). Artificial neural network modeling to predict the hot deformation behavior of an A356 aluminum alloy. *Materials & Design*, 49, 386-391.
- Hamed, H. A., Sadkhan, S. B., & Hameed, A. Q. (2017). *ANFIS Technique for Identification of Digitally Modulated Signals: Using MATLAB*. Scholars Press. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3169944>
- Hastie, T., Friedman, J., & Tibshirani, R. (2001). *The Elements of Statistical Learning*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21606-5>
- Haykin, S. (2009). *Neural networks and learning machines*, 3/E. Pearson Education India.
- Hekmat-Ardakan, A., Liu, X., Ajersch, F., & Chen, X.-G. (2010). Wear behaviour of hypereutectic Al–Si–Cu–Mg casting alloys with variable Mg contents. *Wear*, 269(9-10), 684-692.
- Hernandez, F. C. R., Ramírez, J. M. H., & Mackay, R. (2017). Al-Si alloys: Automotive, aeronautical, and aerospace applications. Springer.
- Hossain, M. S. J., & Ahmad, N. (2014). A neuro-fuzzy approach to select cutting parameters for commercial die manufacturing. *Procedia Engineering*, 90, 753-759.
- Hwang, J. Y., Doty, H. W., & Kaufman, M. J. (2008). The effects of Mn additions on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Cu casting alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 488(1-2), 496-504.
- Inderjit, ve Sharma, S. (2017). Effect of Cooling on Porosity in Low Pressure Die Casting. *IJARIIIE-ISSN(O) 3(3): 2377–83*.
- İsen, E. (2017). ANFIS ve Bulanik C-ortalamalar yöntemleri tabanlı çok kriterli envanter sınıflandırma modeli, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Jang, J.-S. (1993). ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(3), 665-685.
- Javidani, M., & Larouche, D. (2014). Application of cast Al–Si alloys in internal combustion engine components. *International Materials Reviews*, 59(3), 132-158. <https://doi.org/10.1179/1743280413Y.0000000027>

- Kalhapure, M. G., & Dighe, P. M. (2015). Impact of silicon content on mechanical properties of aluminum alloys. *Int. J. Sci. Res*, 4(6), 38-40.
- Kanicki, D. P., & Rasmussen, W. M. (1990). Processing molten aluminum-part 1: Understanding silicon modification. *Modern Casting*, 1, 24.
- Kannadasan, S., Senthil Kumar, A., Pandivelan, C., & Sathiya Narayanan, C. (2017). Modelling the forming limit diagram for aluminium alloy sheets using ANN and ANFIS. *Appl. Math. Inf. Sci*, 11, 1435-1442.
- Karataş, F., Koyuncu, İ., Tuna, M., & Alçın, M. (2020). Bulanık mantık üyelik fonksiyonlarının fpga üzerinde gerçekleştirilmesi. *Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 1-9.
- Karkalos, N. E., & Markopoulos, A. P. (2017). Prediction of mechanical properties of aluminum alloy 7017 using artificial neural networks. *International Multidisciplinary Scientific Conference (April)*: 20–21.
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). Aluminum alloy castings: Properties, processes, and applications. *Asm International*.
- Keskenler, M. F., & Keskenler, E. F. (2017). Geçmişten günümüze yapay sinir ağları ve tarihçesi. *Takvim-i Vekayi*, 5(2), 8-18.
- Klarner, A. D., Miao, J., Sun, W., Luo, A. A., & Zeng, X. (2019). The Effects of Silicon Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of a Mg-Al-Sn Alloy Produced by Vacuum Assisted High Pressure Die Casting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(3), 1522-1533. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-5061-x>
- Kocaman, E., Şirin, S., & Dispinar, D. (2021). Artificial Neural Network Modeling of Grain Refinement Performance in AlSi10Mg Alloy. *International Journal of Metalcasting*, 15(1), 338-348. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00472-9>
- Kotsiantis, S. B., Zaharakis, I., & Pintelas, P. (2007). Supervised machine learning: A review of classification techniques. *Emerging artificial intelligence applications in computer engineering*, 160(1), 3-24.
- Kruse, R., Gebhardt, J. E., & Klowon, F. (1994). *Foundations of fuzzy systems*. John Wiley & Sons, Inc. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/561036>
- Kumar, G., Hegde, S., & Prabhu, K. N. (2007). Heat transfer and solidification behaviour of modified A357 alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1-3), 152-156.
- Lan, Q., Wang, X., Sun, J., Chang, Z., Deng, Q., Sun, Q., Liu, Z., Yuan, L., Wang, J., & Wu, Y. (2022). Artificial neural network approach for mechanical properties prediction of as-cast A380 aluminum alloy. *Materials Today Communications*, 31, 103301.

- Lee, C. (2016). Effect of Ti-B addition on the variation of microporosity and tensile properties of A356 aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 668, 152-159.
- Lee, R. J. H. (2006). *Effect of cooling circuit duration on formation of solidification shrinkage in A356 casting automotive wheels* [PhD Thesis, Auckland University of Technology]. <http://openrepository.aut.ac.nz/handle/10292/95>
- Li, J., Zhang, Y., Cao, X., Zeng, Q., Zhuang, Y., Qian, X., & Chen, H. (2020). Accelerated discovery of high-strength aluminum alloys by machine learning. *Communications Materials*, 1(1), 73.
- Li, X.-B., Xiong, S.-M., & Guo, Z.-P. (2016). Characterization of the Grain Structures in Vacuum-Assist High-Pressure Die Casting AM60B Alloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 29(7), 619-628. <https://doi.org/10.1007/s40195-016-0430-1>
- Li, Y. J., Brusethaug, S., & Olsen, A. (2006). Influence of Cu on the mechanical properties and precipitation behavior of AlSi7Mg0.5 alloy during aging treatment. *Scripta Materialia*, 54(1), 99-103.
- Liu, G., Gao, J., Che, C., Lu, Z., Yi, W., & Zhang, L. (2020). Optimization of casting means and heat treatment routines for improving mechanical and corrosion resistance properties of A356-0.54 Sc casting alloy. *Materials Today Communications*, 24, 101227.
- Liu, Y., Zhao, T., Ju, W., & Shi, S. (2017). Materials discovery and design using machine learning. *Journal of Materiomics*, 3(3), 159-177.
- Lloyd, S. J. (2016). *Effects of a Niobium-Boron grain refiner on undercooling and microstructural evolution of aluminium silicon alloys* [PhD Thesis]. <https://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/15155>
- Luo, A. A., Sachdev, A. K., & Apelian, D. (2022a). Alloy development and process innovations for light metals casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 306, 117606.
- Luo, A. A., Sachdev, A. K., & Apelian, D. (2022b). Alloy development and process innovations for light metals casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 306, 117606.
- Majdi, M. R., Ghobadi, M., Danaee, I., Zarezadeh, A., Saebnoori, E., Chocholatý, O., & Bahrami Panah, N. (2022) Evaluation of the Ability of ANFIS and SVMR Models to Predict the Corrosion Inhibition of Cerium Conversion Coating. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 58(4), 872-882. <https://doi.org/10.1134/S2070205122040128>

- Mallick, P. K. (2012). Advanced materials for automotive applications: An overview. *Advanced materials in automotive engineering*, 5-27.
- Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585. <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
- Merayo, D., Rodríguez-Prieto, A., & Camacho, A. M. (2020). Prediction of mechanical properties by artificial neural networks to characterize the plastic behavior of aluminum alloys. *Materials*, 13(22), 5227.
- Mishra, S. K., Brahma, A., & Dutta, K. (2021). Prediction of mechanical properties of Al-Si-Mg alloy using artificial neural network. *Sādhanā*, 46(3), 139. <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01660-x>
- Möller, H., Govender, G., & Stumpf, W. (2012). Factors Influencing Tensile Mechanical Properties of Al-7Si-Mg Casting Alloys A356/7. *Light Metals 2012* (ss. 467-471). https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_79
- Natesan, E., Ahlström, J., Manchili, S. K., Eriksson, S., & Persson, C. (2020). Effect of Strain Rate on the Deformation Behaviour of A356-T7 Cast Aluminium Alloys at Elevated Temperatures. *Metals*, 10(9), 1239.
- Niu, X. P., Hu, B. H., Pinwill, I., & Li, H. (2000). Vacuum assisted high pressure die casting of aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 105(1-2), 119-127.
- Nizam, H., & Akın, S. S. (2014). Sosyal medyada makine öğrenmesi ile duygu analizinde dengeli ve dengesiz veri setlerinin performanslarının karşılaştırılması. *XIX. Türkiye’de İnternet Konferansı*, 1(6), 873-883.
- Nunes, H., Emadinia, O., Vieira, M. F., & Reis, A. (2023). Low-and High-Pressure Casting Aluminum Alloys: A Review. *Recent Advancements in Aluminum Alloys*.
- Okçu, Y., Altuncu, E., Üstel, F., Çe, B., & Kara, A. (2016). Casting Simulation Study on Thermal Spray TBC Coated Die in Aluminum Wheel Low Pressure Die Casting. *118th International Metallurgy & Materials Congress (MMC 2016)*, 1017-1020, Turkey.
- Ou, J., Wei, C., Cockcroft, S., Maijer, D., Zhu, L., Li, C., & Zhu, Z. (2020). Advanced process simulation of low pressure die cast A356 aluminum automotive wheels— Part I, process characterization. *Metals*, 10(5), 563.
- Öztemel, E. (2012). Yapay sinir ağları. Papatya Yayıncılık. İstanbul.
- Passino, K. M., and Yurkovich, S., (1998). Fuzzy control (C. 42). *Addison-Wesley Reading*, MA.

- Patakham, U., & Limmaneevichitr, C. (2014). Effects of iron on intermetallic compound formation in scandium modified Al–Si–Mg Alloys. *Journal of alloys and compounds*, 616, 198-207.
- Peng, Y., Ye, Y., & Yin, J. (2012). Decision tree construction algorithm based on association rules. *2012 International Conference on Computer Application and System Modeling*, 754-756. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/iccasm-12/2655>
- Peter, I., Rosso, M., Castella, C., & Molina, R. (2014). Self-hardening alloys for automotive application. *Materials Science Forum*, 794, 1221-1226.
- Qu, M., Zheng, L. B., Zhao, M., Cui, Y., Liu, F. B., & Yan, H. J. (2013). Studies on the Influence of Ti on Mechanical Properties in A356 Alloy. *Advanced Materials Research*, 634, 1776-1780.
- Raj, R. J., Selvam, P., & Pughalendi, M. (2021). A review of aluminum alloys in aircraft and aerospace industry. *J. Huazhong Univ. Sci. Technol*, 1671, 4512.
- Rana, R. S., Purohit, R., & Das, S. (2012). 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.
- Risonarta, V. Y., Anggono, J., & Aditya, G. R. (2020). The Influence of Iron Concentration on the Mechanical Properties of A356 Al Alloy for Car Rims Application. *Rekayasa Mesin*, 11(1), 61-68.
- Roy, S., Allard, L. F., Rodriguez, A., Porter, W. D., & Shyam, A. (2017). Comparative Evaluation of Cast Aluminum Alloys for Automotive Cylinder Heads: Part II—Mechanical and Thermal Properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(5), 2543-2562. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-3986-0>
- Saadah, A. U., Reilly, C., Maijer, D. M., & Cockcroft, S. L. (2019). Characterization of heat transfer and its effect on solidification in water cooled LPDC of wheels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 529(1),
- SAE AMS4219: Aluminum Alloy Castings, 7.0Si - 0.55Mg - 0.12T Standard.
- Saha, S., De, S., & Datta, S. (2020). Designing age-hardenable Al alloys using ANFIS and GA. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912(5), 052005.
- Salam, M. A., Azar, A. T., Elgendy, M. S., & Fouad, K. M. (2021). The effect of different dimensionality reduction techniques on machine learning overfitting problem. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl*, 12(4), 641-655.

- Seifeddine, S., Johansson, S., & Svensson, I. L. (2008). The influence of cooling rate and manganese content on the β -Al₅FeSi phase formation and mechanical properties of Al–Si-based alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 490(1-2), 385-390.
- Shabani, M. O., & Mazahery, A. (2011). The ANN application in FEM modeling of mechanical properties of Al–Si alloy. *Applied Mathematical Modelling*, 35(12), 5707-5713.
- Shivkumar, S., Ricci, S., Steenhoff, B., Apelian, D., & Sigworth, G. (1989). An experimental study to optimize the heat treatment of A356 alloy. *AFS Transactions*, 97(5-6), 791-810.
- Siddesh Kumar, N. M., Dhruthi, Pramod, G. K., Samrat, P., & Sadashiva, M. (2022). A Critical Review on Heat Treatment of Aluminium Alloys. *Materials Today: Proceedings*, 58, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.586>
- Sigworth, G. K. (1984). The Grain Refining of Aluminum and Phase Relationships in the Al-Ti-B System. *Metallurgical Transactions A*, 15(2), 277-282. <https://doi.org/10.1007/BF02645112>
- Siik, T. (2011). The Verification of Low-pressure Die Casting Simulation Results Master's Thesis, *Tampere University of Technology, Mechanical and Materials Engineering*, Finlandiya.
- Soofi, Y. J., Rahman, M. A., Gu, Y., & Liu, J. (2022). A feasibility study of machine learning-assisted alloy design using wrought aluminum alloys as an example. *Computational Materials Science*, 215, 111783.
- Sui, D., Cui, Z., Wang, R., Hao, S., & Han, Q. (2015). Effect of Cooling Process on Porosity in the Aluminum Alloy Automotive Wheel During Low-Pressure Die Casting. *International Journal of Metalcasting*, 10(1), 32-42. <https://doi.org/10.1007/s40962-015-0008-0>
- Szalva, P., & Orbulov, I. N. (2018). The effect of vacuum degree on the porosity and mechanical properties of die cast AlSi 9 Cu 3 (Fe) alloy. *Resolution and Discovery*, 3(2), 33-38.
- Şen, Z. (2004). *Yapay sinir ağları*. Su Vakfı. Yayınları. İstanbul
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 1, 116-132.
- Tan, P. N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2005). *Introduction to Data Mining New York: Pearson*.
- Taylor, J. A. (2004). The effect of iron in Al-Si casting alloys. *35th Australian foundry institute national conference*, 31, 148-157.

- Taylor, J. A. (2012). Iron-containing intermetallic phases in Al-Si based casting alloys. *Procedia Materials Science*, 1, 19-33.
- Taylor, J. A., St John, D. H., Barresi, J., & Couper, M. J. (2000). An empirical analysis of trends in mechanical properties of T6 heat treated Al-Si-Mg casting alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 12(6), 419-430. <https://doi.org/10.1080/13640461.2000.11819379>
- Taylor, J. A., Stjohn, D. H., & Easton, M. A. (2011). Case studies in aluminium casting alloys. İçinde *Fundamentals of Aluminium Metallurgy* (ss. 185-216). Elsevier.
- Tokmak, A., Atalay, İ., & Yelgel, Ö. C. (2023). Forecasting Wind Power Generation Using Artificial Neural Network. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 9(1), 7-19.
- Toschi, S. (2018). Optimization of A354 Al-Si-Cu-Mg alloy heat treatment: Effect on microstructure, hardness, and tensile properties of peak aged and overaged alloy. *Metals*, 8(11), 961.
- Töre, C. (2012). Mekanik Tasarımda Alüminyum ve Özellikleri. *Makine Mühendisleri Odası*.
- TÜBİTAK - SAGE (07.12.2023) <https://www.sage.tubitak.gov.tr/tr/>
- Tütmez, B. (2018). Bulanık Mantık ve Eğitim Bilimlerinde Kullanılabilirliği. *Eğitim Dergisi*, 18. <https://www.egitirim.gen.tr/author/docdrbulenttutmez/>
- Tzeng, Y.-C., Nieh, J.-K., Bor, H.-Y., & Lee, S.-L. (2018). Effect of trace Be and Sc additions on the mechanical properties of A357 alloys. *Metals*, 8(3), 194.
- Uyan, T. Ç., Otto, K., Silva, M. S., Vilaça, P., & Armakan, E. (2023). Industry 4.0 Foundry Data Management and Supervised Machine Learning in Low-Pressure Die Casting Quality Improvement. *International Journal of Metalcasting*, 17(1), 414-429. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00783-z>
- Vatansever, F., Ertürk, A. T., & Karabay, S. (2018). Alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin t6 ısıl işlemi ile iyileştirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(60), 797-803.
- Vijayan, D., & Seshagiri Rao, V. (2016). Parametric optimization of friction stir welding process of age hardenable aluminum alloys–ANFIS modeling. *Journal of Central South University*, 23(8), 1847-1857. <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3239-1>
- Wang, Q. G. (2003). Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34(12), 2887-2899. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0189-7>

- Wang, Q., & Xiong, S. (2014). Vacuum assisted high-pressure die casting of AZ91D magnesium alloy at different slow shot speeds. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(10), 3051-3059.
- Warmuzek, M. (2004). Aluminum-silicon casting alloys: An atlas of microfractographs. *ASM International, Ohio*.
- Wei, J., Chu, X., Sun, X., Xu, K., Deng, H., Chen, J., Wei, Z., & Lei, M. (2019). Machine learning in materials science. *InfoMat*, 1(3), 338-358. <https://doi.org/10.1002/inf2.12028>
- Wei, Q., Xu, H., Bai, X., Lian, P., Wang, Y., Mao, H., & Wang, C. (2022). Effect of Sc on microstructure and properties of A357 alloy under different casting conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2051-2059.
- Wu, X., Zhang, H., Cui, H., Ma, Z., Song, W., Yang, W., Jia, L., & Zhang, H. (2019a). Quantitative relationship analysis of mechanical properties with Mg content and heat treatment parameters in Al-7Si alloys using artificial neural network. *Materials*, 12(5), 718.
- Wu, X., Zhang, H., Ma, Z., Tao, T., Gui, J., Song, W., Yang, B., & Zhang, H. (2019b). Interactions between Fe-rich intermetallics and Mg-Si phase in Al-7Si-xMg alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 786, 205-214.
- Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum döküm alaşımlarına dair son yıllardaki akademik ve endüstriyel gelişmelere genel bakış ve değerlendirme. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1191-1210.
- Yaman, S. (2014). Echo state network ile sistemlerin modellenmesi. Yüksek Lisans. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yang, H., Ji, S., & Fan, Z. (2015). Effect of heat treatment and Fe content on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al-Si-Cu alloys. *Materials & Design*, 85, 823-832.
- Yang, X., Zhu, J., Nong, Z., Dong, H. E., Lai, Z., Ying, L. I. U., & Liu, F. (2013). Prediction of mechanical properties of A357 alloy using artificial neural network. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(3), 788-795.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zamani, M., Toschi, S., Morri, A., Ceschini, L., & Seifeddine, S. (2019). Optimisation of heat treatment of Al-Cu-(Mg-Ag) cast alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(6), 3427-3440. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08702-x>
- Zhang, J., Gao, P., & Fang, F. (2019). An ATPSO-BP neural network modeling and its application in mechanical property prediction. *Computational Materials Science*, 163, 262-266.

- Zhang, L., Li, L., Wang, S., & Zhu, B. (2011). Optimization of LPDC Process Parameters Using the Combination of Artificial Neural Network and Genetic Algorithm Method. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(4), 492-499. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9933-0>
- Zhou, X., Li, J., Yang, C., & Hao, J. (2018). Study on handwritten digit recognition using support vector machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 452(4), 042194.
- Zhu, M., Jian, Z., Yang, G., & Zhou, Y. (2012). Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloys. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 243-249.



EKLER**EK-1** Eğitim veri seti

S.NO	Al %	Si %	Mg %	Cu %	Fe %	Ti %	UTS (MPa)	YS (MPa)	ϵ (%)
1	92,1332	6,8882	0,6651	0,0027	0,1359	0,1249	260,00	240,00	2,50
2	91,9984	7,0827	0,6186	0,0143	0,1983	0,0377	240,00	221,00	2,00
3	92,6266	6,6882	0,5181	0,0045	0,0909	0,0217	280,00	268,00	3,40
4	92,7203	6,5113	0,5495	0,0158	0,0431	0,1600	325,00	298,00	4,10
5	92,5596	6,6408	0,5132	0,0039	0,1245	0,1080	250,00	240,00	4,50
6	92,0741	6,9241	0,6199	0,0102	0,2099	0,1118	236,00	227,00	2,00
7	91,9510	7,3139	0,4376	0,0058	0,1675	0,0742	203,00	190,00	2,10
8	92,3892	6,6903	0,6167	0,0044	0,0654	0,1840	310,00	288,00	3,40
9	92,1071	7,1123	0,5577	0,0102	0,0537	0,1590	315,00	290,00	4,50
10	91,5510	7,5159	0,7052	0,0101	0,0914	0,0764	290,00	270,00	2,80
11	92,4969	6,7628	0,5244	0,0112	0,0304	0,1743	339,00	299,00	5,00
12	91,9510	7,1021	0,6748	0,0014	0,1108	0,1099	290,00	280,00	3,80
13	92,0828	6,8414	0,6003	0,0129	0,2000	0,1292	230,00	221,00	2,00
14	91,5945	7,4727	0,5985	0,0086	0,2035	0,0722	196,00	187,00	2,00
15	92,3434	6,8489	0,5393	0,0024	0,0910	0,1250	290,00	277,00	3,60
16	92,0664	7,2605	0,4289	0,0047	0,1156	0,0739	277,00	262,00	3,00
17	92,1493	7,0339	0,5915	0,0063	0,1260	0,0430	260,00	247,00	2,90
18	92,3678	6,7884	0,6396	0,0011	0,1489	0,0042	240,00	223,00	2,40
19	91,9403	7,3067	0,4390	0,0117	0,0865	0,1658	293,00	280,00	4,10
20	92,3664	6,6134	0,6913	0,0085	0,2084	0,0620	236,00	225,00	2,00
21	91,8523	7,1789	0,6833	0,0040	0,0924	0,1391	297,00	276,00	4,30
22	92,4328	6,8190	0,5518	0,0121	0,0969	0,0374	285,00	269,00	3,50
23	92,2006	6,8514	0,6196	0,0065	0,1458	0,1261	250,00	240,00	2,80
24	92,1439	6,9148	0,5979	0,0158	0,1452	0,1324	265,00	248,00	3,10
25	91,7111	7,2101	0,7145	0,0048	0,1440	0,1655	260,00	247,00	3,20
26	92,1358	6,9473	0,6577	0,0070	0,1722	0,0300	225,00	206,00	2,00
27	91,9904	7,0481	0,7132	0,0107	0,1698	0,0178	244,00	233,00	2,00
28	92,2542	6,9199	0,6586	0,0156	0,0909	0,0108	280,00	268,00	3,30
29	92,3139	6,8481	0,6104	0,0059	0,1501	0,0216	250,00	238,00	2,10
30	92,5979	6,5791	0,5096	0,0080	0,1763	0,0791	203,00	190,00	2,00
31	91,8743	7,0130	0,6963	0,0058	0,1635	0,1971	220,00	200,00	2,60
32	91,6240	7,3972	0,5633	0,0074	0,1673	0,1908	203,00	188,00	2,20
33	92,5624	6,5982	0,4550	0,0065	0,1262	0,2017	260,00	245,00	3,40
34	92,3810	6,8115	0,6207	0,0130	0,0816	0,0422	285,00	271,00	2,80
35	92,0390	7,1516	0,5612	0,0080	0,0252	0,1650	345,00	309,00	4,50
36	92,4706	6,7818	0,5698	0,0060	0,1126	0,0092	258,00	241,00	3,00
37	91,7618	7,3151	0,4618	0,0122	0,1915	0,2076	210,00	185,00	2,10
38	92,3069	6,7835	0,5414	0,0035	0,1060	0,2087	273,00	261,00	3,40
39	92,1022	7,0937	0,4328	0,0152	0,1433	0,1628	208,00	189,00	2,50

40	92,4890	6,6477	0,4591	0,0046	0,1944	0,1552	230,00	214,00	1,90
41	92,3560	6,9288	0,4673	0,0050	0,1786	0,0143	191,00	181,00	2,20
42	92,6277	6,4875	0,6136	0,0062	0,0401	0,1750	322,00	295,00	4,50
43	91,7982	7,2021	0,6218	0,0126	0,1004	0,2050	295,00	276,00	3,50
44	92,4001	6,7531	0,6348	0,0131	0,0269	0,1720	342,00	302,00	5,20
45	91,9359	7,3182	0,4161	0,0169	0,1016	0,1613	279,00	267,00	3,40
46	91,7171	7,1701	0,7137	0,0036	0,1573	0,1882	240,00	231,00	2,80
47	91,7765	7,3278	0,4553	0,0085	0,1869	0,1950	235,00	218,00	2,00
48	92,0992	7,0941	0,5604	0,0043	0,1265	0,0655	275,00	263,00	3,00
49	92,5870	6,5450	0,6120	0,0088	0,1832	0,0140	238,00	219,00	2,00
50	91,6568	7,5314	0,6394	0,0084	0,1024	0,0116	263,00	242,00	2,80
51	92,2162	6,8303	0,6453	0,0032	0,1458	0,1092	245,00	235,00	2,80
52	92,3685	6,5787	0,6545	0,0102	0,2000	0,1130	233,00	222,00	2,00
53	92,5925	6,7810	0,3918	0,0156	0,0828	0,0863	282,00	269,00	3,40
54	92,3327	6,8634	0,5394	0,0034	0,1889	0,0222	200,00	188,00	2,00
55	92,4527	6,8880	0,4475	0,0169	0,0912	0,0537	272,00	258,00	3,20
56	91,4044	7,5472	0,5397	0,0018	0,2000	0,1314	200,00	190,00	1,90
57	91,6617	7,3518	0,6187	0,0054	0,1885	0,1239	241,00	222,00	2,10
58	92,6851	6,5643	0,4501	0,0015	0,1770	0,0720	206,00	185,00	2,00
59	91,9536	7,4130	0,4019	0,0029	0,1560	0,0226	203,00	190,00	2,20
60	91,8715	7,3770	0,4037	0,0053	0,1010	0,1915	280,00	268,00	3,30
61	91,8788	7,2597	0,4643	0,0167	0,2070	0,1235	195,00	184,00	2,00
62	91,7375	7,4913	0,6061	0,0010	0,0936	0,0205	291,00	270,00	3,10
63	91,7642	7,3015	0,5307	0,0102	0,2000	0,1259	240,00	233,00	2,00
64	91,8168	7,4706	0,4240	0,0069	0,1354	0,0963	259,00	230,00	3,00
65	92,5342	6,7579	0,4558	0,0046	0,0870	0,1105	290,00	275,00	4,10
66	92,3840	6,8788	0,5033	0,0069	0,1555	0,0215	250,00	238,00	2,10
67	92,4195	6,7109	0,6956	0,0139	0,0876	0,0225	280,00	260,00	3,50
68	92,4417	6,7628	0,5244	0,0164	0,0304	0,1743	339,00	299,00	5,00
69	92,0624	7,1120	0,5577	0,0049	0,0537	0,1590	315,00	290,00	4,50
70	92,2096	7,0361	0,4136	0,0129	0,1281	0,1497	266,00	249,00	2,80
71	92,2193	6,7490	0,6820	0,0101	0,2041	0,0855	203,00	190,00	2,00
72	92,6455	6,5525	0,4153	0,0081	0,1668	0,1618	231,00	223,00	2,50
73	91,8864	7,4448	0,4137	0,0045	0,1666	0,0340	207,00	196,00	2,00
74	92,5442	6,5093	0,6217	0,0074	0,1004	0,1670	265,00	250,00	3,50
75	91,9267	7,4559	0,4361	0,0152	0,1068	0,0093	255,00	239,00	2,70
76	91,6161	7,5440	0,5349	0,0038	0,1673	0,0839	237,00	219,00	2,10
77	92,6915	6,6614	0,4105	0,0150	0,1014	0,0702	260,00	245,00	2,90
78	91,9696	7,2472	0,5284	0,0102	0,1045	0,0901	265,00	243,00	3,00
79	92,2546	6,7920	0,6090	0,0072	0,1604	0,1268	245,00	237,00	2,50
80	91,9940	7,3298	0,5039	0,0114	0,1005	0,0104	269,00	253,00	3,20
81	92,6957	6,5095	0,4813	0,0090	0,2092	0,0453	240,00	215,00	2,00
82	92,2542	6,8456	0,5911	0,0033	0,1334	0,1224	255,00	240,00	2,90
83	92,1229	6,9211	0,6813	0,0040	0,1097	0,1110	290,00	275,00	3,70
84	91,8080	7,4141	0,4833	0,0015	0,1636	0,0795	205,00	190,00	2,10

85	92,3245	6,8075	0,5402	0,0123	0,2006	0,0649	225,00	218,00	2,00
86	91,9394	7,1372	0,6018	0,0010	0,2003	0,0703	235,00	216,00	2,90
87	91,3367	7,5421	0,6677	0,0043	0,2000	0,1331	265,00	253,00	2,00
88	92,1699	6,9117	0,4828	0,0159	0,1994	0,1703	203,00	189,00	2,00
89	91,7175	7,4607	0,5180	0,0126	0,1302	0,1110	264,00	244,00	2,90
90	92,4574	6,5970	0,6750	0,0047	0,0911	0,1248	271,00	259,00	3,70
91	92,2509	6,9528	0,4134	0,0023	0,1181	0,2050	278,00	267,00	3,50
92	92,5025	6,6910	0,5623	0,0122	0,0610	0,1710	312,00	289,00	3,50
93	91,7365	7,5076	0,4317	0,0112	0,1851	0,0779	238,00	219,00	2,00
94	92,2534	6,7114	0,6417	0,0100	0,1406	0,1929	252,00	240,00	3,20
95	91,7682	7,4654	0,4832	0,0154	0,2041	0,0137	195,00	185,00	2,00
96	91,4798	7,5465	0,6739	0,0024	0,1327	0,1147	267,00	251,00	2,90
97	91,9410	7,4219	0,4758	0,0018	0,1067	0,0028	277,00	263,00	3,10
98	91,7655	7,4628	0,4222	0,0027	0,2082	0,0886	235,00	220,00	2,00
99	92,0456	7,2045	0,5694	0,0038	0,1221	0,0046	258,00	247,00	3,00
100	92,0236	7,1073	0,4686	0,0076	0,1999	0,1430	234,00	217,00	2,00
101	92,2922	6,7346	0,7151	0,0039	0,1112	0,0930	256,00	243,00	3,30
102	92,3525	6,7498	0,7000	0,0149	0,0258	0,1570	337,00	305,00	4,90
103	91,8846	7,1892	0,6932	0,0146	0,1619	0,0065	235,00	216,00	2,00
104	91,7455	7,3678	0,6474	0,0014	0,1180	0,0699	280,00	263,00	3,10
105	92,0674	6,9955	0,6562	0,0099	0,1260	0,0950	278,00	265,00	3,00
106	91,6840	7,4261	0,6047	0,0093	0,1136	0,1123	270,00	255,00	3,40
107	91,8645	7,4425	0,4662	0,0118	0,1127	0,0523	268,00	249,00	3,30
108	92,4300	6,6595	0,6403	0,0071	0,1058	0,1073	260,00	250,00	3,40
109	92,1295	7,1852	0,4386	0,0014	0,1865	0,0088	246,00	230,00	1,90
110	92,1046	6,9105	0,6856	0,0134	0,2096	0,0263	238,00	220,00	1,90
111	91,7720	7,4390	0,4890	0,0165	0,1910	0,0425	235,00	216,00	2,00
112	92,1926	6,9143	0,5508	0,0023	0,1647	0,1253	243,00	234,00	2,00
113	91,6941	7,4090	0,6478	0,0170	0,1361	0,0460	267,00	243,00	2,40
114	92,3661	6,7445	0,5638	0,0081	0,0712	0,1963	298,00	274,00	4,00
115	91,9814	7,0583	0,6746	0,0092	0,1133	0,1132	275,00	255,00	3,60
116	91,6266	7,4356	0,6682	0,0053	0,1067	0,1076	285,00	267,00	3,30
117	91,7719	7,4055	0,4629	0,0064	0,1729	0,1304	241,00	233,00	2,10
118	91,8460	7,2913	0,5962	0,0076	0,1654	0,0435	205,00	191,00	2,00
119	92,4425	6,7036	0,6235	0,0014	0,1474	0,0316	250,00	230,00	2,50
120	92,5082	6,5530	0,5866	0,0052	0,1716	0,1254	235,00	225,00	2,00
121	92,3755	6,7210	0,5601	0,0114	0,1215	0,1605	261,00	252,00	3,20
122	92,1316	6,8945	0,5477	0,0169	0,1996	0,1597	237,00	228,00	2,00
123	92,7752	6,5997	0,4151	0,0055	0,1497	0,0048	242,00	231,00	2,30
124	92,1264	7,1093	0,3908	0,0142	0,1144	0,1949	279,00	264,00	3,40
125	92,0748	6,9973	0,7108	0,0135	0,0971	0,0565	295,00	273,00	3,50
126	92,1115	6,9239	0,6934	0,0052	0,1396	0,0764	245,00	236,00	2,70
127	92,1807	6,8905	0,5627	0,0117	0,1728	0,1316	204,00	192,00	2,00
128	92,0364	7,0116	0,5378	0,0122	0,2000	0,1214	234,00	226,00	2,10
129	92,0652	7,2706	0,4444	0,0112	0,1105	0,0481	267,00	248,00	3,20

130	91,6665	7,3275	0,7261	0,0119	0,1122	0,1058	297,00	282,00	3,70
131	92,0002	7,2099	0,5112	0,0125	0,1705	0,0457	207,00	195,00	2,00
132	92,5700	6,5270	0,5629	0,0138	0,1837	0,0926	202,00	190,00	2,20
133	92,3021	6,7833	0,7138	0,0096	0,1128	0,0284	260,00	247,00	2,80
134	92,7571	6,5348	0,4455	0,0025	0,1594	0,0507	199,00	183,00	2,20
135	92,4173	6,7495	0,5610	0,0077	0,0515	0,1630	318,00	291,00	4,00
136	92,3169	6,8044	0,4513	0,0165	0,2000	0,1167	237,00	230,00	2,00
137	91,6670	7,4346	0,5873	0,0090	0,1120	0,1401	275,00	260,00	3,40
138	92,4762	6,5797	0,5987	0,0106	0,0820	0,2028	300,00	280,00	4,70
139	91,7983	7,1228	0,6378	0,0023	0,1806	0,2082	204,00	190,00	2,20
140	91,7418	7,5190	0,4016	0,0154	0,0834	0,1888	302,00	276,00	4,50
141	92,4412	6,8120	0,4634	0,0046	0,1701	0,0587	202,00	190,00	2,00
142	92,5308	6,6632	0,5540	0,0046	0,1338	0,0636	255,00	236,00	2,60
143	92,1766	7,1408	0,5041	0,0042	0,1096	0,0147	265,00	245,00	3,20
144	91,7683	7,4525	0,4500	0,0023	0,1382	0,1387	255,00	239,00	2,60
145	91,9838	7,0074	0,6648	0,0068	0,1208	0,1664	280,00	260,00	3,60
146	91,8317	7,2433	0,6359	0,0161	0,1181	0,1049	268,00	258,00	3,30
147	92,2461	6,6164	0,6914	0,0111	0,1693	0,2050	212,00	191,00	2,90
148	92,2885	6,5439	0,6943	0,0162	0,1933	0,2050	240,00	232,00	2,30
149	92,3596	6,8920	0,4316	0,0053	0,2031	0,0584	193,00	181,00	2,00
150	91,6942	7,1623	0,7152	0,0022	0,1798	0,1963	243,00	235,00	2,10
151	92,0058	7,1895	0,4980	0,0148	0,1756	0,0663	233,00	213,00	2,00
152	91,6685	7,5381	0,5125	0,0055	0,1576	0,0678	201,00	189,00	2,00
153	91,9246	7,2852	0,5489	0,0151	0,1112	0,0650	276,00	260,00	3,00
154	92,0383	7,1830	0,5155	0,0163	0,1376	0,0593	266,00	247,00	2,80
155	92,2096	6,8303	0,6453	0,0098	0,1460	0,1092	250,00	240,00	2,80
156	91,7167	7,3781	0,6613	0,0084	0,1404	0,0451	271,00	251,00	2,70
157	91,9493	7,2846	0,4464	0,0025	0,1771	0,0901	207,00	195,00	2,10
158	91,9597	7,1705	0,6411	0,0103	0,1579	0,0105	240,00	232,00	2,30
159	91,9547	7,2158	0,4186	0,0105	0,1836	0,1668	204,00	192,00	2,00
160	92,5444	6,6011	0,6203	0,0023	0,0419	0,1900	327,00	300,00	4,10
161	92,7764	6,5083	0,4687	0,0084	0,1426	0,0456	248,00	227,00	2,50
162	92,2423	6,8892	0,5739	0,0039	0,1154	0,1253	264,00	243,00	3,30
163	91,6509	7,4276	0,6041	0,0104	0,0995	0,1575	303,00	292,00	4,50
164	92,6431	6,5850	0,5239	0,0090	0,1855	0,0035	200,00	188,00	2,00
165	92,0037	7,2994	0,4351	0,0131	0,0925	0,1062	288,00	275,00	4,30
166	92,1229	7,0608	0,5175	0,0078	0,1294	0,1116	250,00	241,00	3,10
167	92,5163	6,7803	0,5031	0,0161	0,0232	0,1610	338,00	292,00	5,30
168	91,9395	7,2019	0,6261	0,0074	0,0551	0,1700	315,00	291,00	3,90
169	92,0325	6,8737	0,7364	0,0116	0,1744	0,1214	245,00	235,00	2,00
170	91,5737	7,4668	0,6273	0,0137	0,1831	0,0854	208,00	190,00	2,00
171	91,7227	7,5320	0,4018	0,0090	0,1685	0,1160	235,00	214,00	2,00
172	92,2289	7,0632	0,4182	0,0114	0,1322	0,0961	259,00	240,00	3,10
173	92,0001	6,9282	0,6886	0,0019	0,2044	0,1268	244,00	227,00	2,00
174	91,9971	7,3710	0,4425	0,0082	0,1184	0,0128	263,00	244,00	3,00

175	91,9960	7,0819	0,5659	0,0050	0,1178	0,1834	260,00	245,00	3,40
176	92,3496	6,7903	0,4816	0,0161	0,2015	0,1109	238,00	231,00	2,80
177	92,0998	7,0954	0,4594	0,0165	0,1876	0,0913	202,00	190,00	2,10
178	91,8235	7,2483	0,4309	0,0165	0,2000	0,1238	195,00	185,00	2,00
179	91,7428	7,2237	0,7163	0,0125	0,0882	0,1665	303,00	282,00	4,70
180	92,1832	7,0592	0,3976	0,0023	0,1039	0,2038	278,00	267,00	3,30
181	92,5654	6,5323	0,5356	0,0146	0,1564	0,1457	250,00	237,00	2,50
182	91,5259	7,5311	0,6202	0,0150	0,1800	0,0778	236,00	219,00	1,90
183	91,8342	7,4065	0,4263	0,0145	0,0934	0,1751	298,00	279,00	4,70
184	91,5197	7,4230	0,7093	0,0091	0,1921	0,0968	240,00	222,00	2,00
185	91,7783	7,3757	0,4306	0,0130	0,1418	0,2050	254,00	240,00	3,20
186	91,8829	7,3427	0,4813	0,0024	0,1153	0,1254	291,00	280,00	3,30
187	92,7979	6,5268	0,4607	0,0034	0,1222	0,0390	264,00	242,00	2,40
188	92,4766	6,7118	0,5091	0,0088	0,1513	0,0924	240,00	234,00	2,50
189	92,0662	7,0912	0,5606	0,0011	0,0751	0,1558	307,00	283,00	3,30
190	92,4388	6,7467	0,6019	0,0156	0,0280	0,1690	341,00	301,00	5,30
191	91,5117	7,5437	0,6190	0,0038	0,1477	0,1241	268,00	245,00	2,70
192	92,4636	6,7495	0,5611	0,0114	0,0515	0,1630	318,00	291,00	4,00
193	92,4841	6,7232	0,5518	0,0058	0,0906	0,0945	288,00	275,00	3,60
194	92,3548	6,7531	0,6348	0,0084	0,0269	0,1720	342,00	302,00	5,20
195	92,3685	6,7670	0,5341	0,0152	0,1370	0,1282	245,00	235,00	3,10
196	92,0309	6,9837	0,6479	0,0134	0,1481	0,1260	249,00	238,00	2,60
197	91,8258	7,0303	0,6413	0,0069	0,2000	0,1265	239,00	224,00	2,00
198	92,0378	7,0023	0,6410	0,0059	0,1381	0,1249	250,00	242,00	2,70
199	91,7784	7,2379	0,6243	0,0042	0,0925	0,2050	303,00	282,00	4,30
200	92,6132	6,6627	0,4147	0,0075	0,1927	0,0592	230,00	215,00	1,90
201	91,9453	7,2019	0,6261	0,0054	0,0551	0,1701	315,00	291,00	3,90
202	92,6793	6,4875	0,6135	0,0046	0,0401	0,1750	322,00	295,00	4,50
203	92,4805	6,7214	0,4992	0,0121	0,1246	0,1122	249,00	240,00	2,80
204	92,5460	6,5267	0,6560	0,0036	0,1912	0,0265	237,00	219,00	1,90
205	92,0491	7,0200	0,6714	0,0112	0,1517	0,0466	201,00	188,00	2,00
206	92,2253	6,7430	0,6509	0,0105	0,1331	0,1872	259,00	243,00	2,60
207	91,7656	7,4188	0,6174	0,0035	0,1050	0,0397	271,00	250,00	3,10
208	92,4551	6,7500	0,5501	0,0058	0,0270	0,1620	340,00	300,00	4,80
209	92,4846	6,6953	0,4750	0,0085	0,1019	0,1847	263,00	246,00	2,90
210	92,3133	6,8267	0,5656	0,0017	0,1363	0,1064	245,00	238,00	3,20
211	92,2980	6,7498	0,7045	0,0149	0,0258	0,1570	337,00	305,00	4,90
212	91,9573	7,1583	0,6722	0,0034	0,1456	0,0132	265,00	249,00	2,50
213	91,8193	7,4942	0,4630	0,0091	0,0996	0,0648	280,00	261,00	3,10
214	92,2593	7,0211	0,4399	0,0024	0,1996	0,0277	190,00	180,00	2,20
215	92,1771	6,9956	0,4586	0,0129	0,1485	0,1573	250,00	237,00	2,60

EK-2 Test veri seti ve tahmin sonuçları

S.NO	Al %	Si %	Mg %	Cu %	Fe %	Ti %	UTS (MPa)	YS (MPa)	ϵ (%)	ML - UTS (MPa)	ML - YS (MPa)	ML - ϵ (%)
1	92,5127	6,691	0,5623	0,003	0,061	0,17	312	289	3,5	299	275	3,54
2	92,0694	6,9375	0,6164	0,0099	0,203	0,1638	245	227	2,3	252	237	2,75
3	91,7058	7,3585	0,6294	0,0088	0,1427	0,1548	258	245	2,6	257	241	3,05
4	92,0332	7,0604	0,6637	0,0024	0,1635	0,0768	231	209	2,5	251	232	2,49
5	91,5523	7,5485	0,6937	0,0099	0,1493	0,0463	240	219	2,7	267	248	2,74
6	92,0754	7,2346	0,4567	0,0045	0,1765	0,0523	220	196	2,2	194	180	2,1
7	91,7019	7,4254	0,5914	0,0091	0,0965	0,1757	304	283	4,3	301	287	4,23
8	92,2749	6,8095	0,6783	0,0059	0,2035	0,0279	236	225	2,4	250	234	2,54
9	92,265	6,8499	0,6283	0,0082	0,1246	0,124	260	245	2,8	259	247	2,97
10	92,6908	6,6042	0,4097	0,0162	0,1983	0,0808	233	213	2,5	256	240	2,79
11	92,4129	6,9008	0,451	0,0147	0,1865	0,0341	251	239	2,5	251	234	2,69
12	91,8011	7,3126	0,5449	0,0049	0,1367	0,1998	260	240	2,7	230	215	2,64
13	92,5417	6,8465	0,431	0,0083	0,096	0,0765	298	271	4	259	243	2,92
14	92,0405	7,2217	0,5229	0,0091	0,1926	0,0132	238	221	2,4	247	232	2,72
15	92,3978	6,6903	0,65	0,0125	0,0654	0,184	310	288	3,5	285	260	3,25
16	91,7292	7,3435	0,652	0,0138	0,1581	0,1034	275	258	2,7	231	215	2,71
17	91,9859	7,2574	0,4741	0,0057	0,2061	0,0708	236	217	2,3	225	211	2,37
18	91,972	7,2034	0,4065	0,0073	0,2027	0,2081	250	230	2,3	248	231	2,62
19	91,9883	7,2325	0,6069	0,0023	0,1625	0,0075	244	225	2,6	262	249	2,81
20	92,7032	6,5766	0,4439	0,0087	0,1594	0,1082	262	241	2,4	195	186	2,13
21	92,5113	6,68	0,5623	0,014	0,061	0,1714	320	298	3,8	312	288	3,54
22	92,7904	6,5113	0,5495	0,0057	0,0431	0,1	325	298	3,4	259	244	3,14
23	91,9489	7,2485	0,6612	0,0145	0,111	0,0159	280	260	3	252	235	2,69
24	92,0668	7,3021	0,4348	0,017	0,1456	0,0337	267	243	2,4	262	241	2,64
25	92,0616	7,1714	0,5807	0,009	0,1592	0,0181	231	208	2,4	233	220	2,44
26	92,1113	7,0912	0,5606	0,0018	0,0751	0,16	307	283	3,5	305	281	3,41
27	91,8089	7,2359	0,6602	0,0123	0,1624	0,1203	265	241	2,6	244	228	2,84
28	91,5426	7,5485	0,6937	0,0099	0,1493	0,056	240	219	2,5	267	247	2,72
29	92,7472	6,536	0,4369	0,0109	0,1849	0,0841	206	185	2,4	234	218	2,44
30	92,0105	7,1525	0,5486	0,0149	0,1157	0,1578	289	268	3,1	260	244	3,11
31	92,3635	6,856	0,5534	0,0053	0,0736	0,1482	300	279	3,8	292	268	3,75
32	92,2019	6,983	0,5787	0,0143	0,1067	0,1154	300	277	3,3	253	237	2,84
33	92,0469	7,0289	0,6899	0,0054	0,1149	0,114	302	277	3,5	284	269	3,53
34	92,2185	6,913	0,5748	0,0033	0,1379	0,1525	250	230	2,5	254	238	2,66
35	91,8444	7,423	0,5015	0,0061	0,063	0,162	311	288	3,5	267	251	3,05
36	92,6108	6,6543	0,5832	0,0083	0,0971	0,0463	300	279	3,3	262	245	2,97
37	92,3138	6,9008	0,4629	0,0094	0,1239	0,1892	271	251	2,8	257	241	2,88
38	92,4437	6,7994	0,4236	0,0165	0,1291	0,1877	274	258	2,7	251	235	2,86
39	92,2719	6,983	0,5087	0,0143	0,1067	0,1154	290	278	3,2	255	238	2,9
40	91,4838	7,5241	0,6019	0,0121	0,1811	0,197	224	208	2,6	253	237	2,87

41	92,2557	6,8946	0,5299	0,0118	0,141	0,167	256	237	2,7	235	222	2,76
42	92,4666	6,9173	0,5184	0,0015	0,0925	0,0037	300	278	3,4	260	243	3
43	92,4266	6,7445	0,55	0,0114	0,0712	0,1963	298	274	3,5	294	272	3,58
44	92,5595	6,7	0,5501	0,0014	0,027	0,162	340	300	5	290	267	3,46
45	92,7866	6,4679	0,4991	0,0099	0,1448	0,0917	250	233	2,2	174	163	1,68
46	92,5302	6,8035	0,4096	0,0021	0,1246	0,13	270	248	2,7	258	242	2,97
47	92,1735	7,1107	0,4561	0,0145	0,1709	0,0743	240	223	2,3	238	219	2,31
48	92,6526	6,6502	0,5435	0,0063	0,0941	0,0533	300	275	3,8	273	258	2,99
49	92,049	7,1681	0,5607	0,0125	0,1953	0,0144	239	220	2,4	248	233	2,71
50	91,9566	7,0242	0,6853	0,0021	0,1509	0,1809	255	241	2,4	240	220	2,34

