

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM AISi10MgMn ALAŞIMININ T5 ISIL İŞLEM
PARAMETRELERİNE GÖRE YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Cemil Çağrı GÜLMEZ

**Danışman
Doç. Dr. Can ÇİVİ**



MANİSA-2023

Cemil Çağrı
GÜLMEZ

YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM AISI10Mn ALAŞMININ T5 ISIL İŞLEM
PARAMETRELERİNE GÖRE YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

2023

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Cemil Çağrı GÜLMEZ



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	IX
ÖZET.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Literatür Çalışmaları.....	3
2.2 Malzemelerde Yorulma	9
2.3 Yüksek Basıncılı Döküm.....	24
2.4 Alüminyum Alaşımları	27
2.4.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	30
2.4.2 Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem	35
2.4.3 AlSi10MgMn Alaşımı ve Özellikleri	40
2.5. Alüminyum Alaşımlarında Yorulma	49
2.6. Yorulma Deney Türleri	51
2.6.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	51
2.6.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi	51
2.6.2.1. Düzlemsel Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi	52
2.6.2.2. Dönen Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	52
2.6.3. Burma Gerilmeli Yorulma Deneyi	53
2.6.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi	53
2.7. Yorulma Test Makineleriyle İlgili Genel Bilgiler ve Akademik Çalışmalar ..	54
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	59
3.1. Test Cihazları	60
3.2. Test Metodu.....	64
3.3. Test Numunesi.....	65
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	66
4.1 Çekme ve Yorulma Numunelerinin Hazırlanması	66
4.2 Çekme Test Deneyi ve Sonuçları	67
4.3. Mikroyapı Analizleri	70

4.4. SEM Analizleri ve EDS Ölçümleri	72
4.5. Stereo Mikroskop Kırık Yüzey İncelemeleri	75
4.6. Sertlik Ölçümü	78
4.7. Yorulma Testleri.....	79
4.7.1 Yorulma Momenti Hesaplaması.....	80
4.7.2 Yorulma Ömürlerinin Alüminyum Alaşımları Çalışmalarına Göre Teorik Hesaplaması.....	81
4.7.3 Yorulma Testleri Sonuçları	83
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	91



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

σ	Normal Gerilme
σ_0	Ortalama Gerilme
σ_a	Genlik Gerilmesi
σ_g	Laboratuvar Ortamında Sonsuz Ömür Veren Gerilme Genliği
σ_{max}	Maksimum Gerilme
σ_{min}	Minimum Gerilme
σ_{y0}	Yorulma Sınırı
σ_{ϵ}	Çekme Dayanımı
σ_k	Kopma Dayanımı
σ_D	Sürekli Mukavemet Değeri
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
K_b	Parça Boyut Faktörü
K_{cr}	Kritik Stres Büyüklüğü
K_f	Yorulma Çentik Faktörü
K_y	Yüzey Faktörü
Log N	Logaritmik Çevrim Miktarı
N	Çevrim Miktarı
q	Çentik Duyarlılığı Faktörü
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
W	Mukavemet Momenti

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Değişken zorlama durumu	9
Şekil 2. 2. Yorulma çatlağı yayılma aşamaları	10
Şekil 2. 3. Yorulma çaylağı yayılma aşamaları	10
Şekil 2. 4. Yorulma çatlağının zamanla ilerlemesi	11
Şekil 2. 5. Çekirdek sayısının genlik gerilmesine bağlı olarak değişimi	12
Şekil 2. 6. İnce yorulma çizgileri	13
Şekil 2. 7. Döner eğilmeye maruz standart çelik malzemelerde S-N eğrisi	14
Şekil 2. 8. Tam değişken eğilme, çekme ve burulmaya maruz kalan standart çelik parçalarda S-N eğrileri	15
Şekil 2. 9. Maksimum ve ortalama maruz kalınan gerilmenin yüzey hazırlama türüne göre değişimi	16
Şekil 2. 10. Çeşitli yüzey işlemlerinden dolayı çeliğin yorulma sınırı için azaltma faktörü	17
Şekil 2. 11. Goodman Diyagramı	19
Şekil 2. 12. Gerber, Goodman ve Soderberg Diyagramları	19
Şekil 2. 13. Örnek bir yorulma çatlağı	20
Şekil 2. 14. Gerilme Genliği – Ömür grafiği	22
Şekil 2. 15. Wöhler Eğrisinin logaritmik ölçekte pratik çizimi	22
Şekil 2. 16. AlSi10Mg alaşımına ait gerilme-ömür grafiği	23
Şekil 2. 17. Soğuk Kamaralı Basınçlı Alüminyum Döküm	25
Şekil 2. 18. Basınçlı Döküm İşlemi	26
Şekil 2. 19. Enjeksiyonun kontrollü (a) ve kontrolsüz (b) ilk aşamalarını karşılaştıran, soğuk kamaralı bir pres döküm kovanındaki enjeksiyonu	26
Şekil 2. 20. Alüminyum Ürünün Dünyadaki Bölgesel Dağılım, Ürün Dağılımı ve Nihai Ürün Olarak Sınıflandırılması	30
Şekil 2. 21. Alüminyumun alaşım elementleriyle çeşitli kombinasyonlarda yapılan alaşımlarının şematik gösterimi	33
Şekil 2. 22. Isıl işlem uygulanabilirliğine göre dövme alaşımları	34
Şekil 2. 23. Isıl işlem uygulanabilirliğine göre döküm alaşımları	35
Şekil 2. 24. Çökelme sertleştirmesinin uygulanabildiği solvüs eğrisi içeren faz diyagramı kesiti	37
Şekil 2. 25. Çökeltme sertleşmesinin uygulama adımları	38
Şekil 2. 26. Sabit sıcaklıkta yaşlanmanın süresine bağlı olarak alaşım mukavemetinin değişimi	39
Şekil 2. 27. Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklere göre sıralaması	40
Şekil 2. 28. AlSi10MgMn alaşımında çeşitli ısıtım durumlarında ve magnezyum oranlarında akma dayanımı ve uzama	41
Şekil 2. 29. AlSi10MgMn alaşımı ile dökümü yapılmış travers parçası	42
Şekil 2. 30. AlSi10MgMn alaşımı ile dökümü yapılmış motor beşiği	42
Şekil 2. 31. AlSi10MgMn alaşımı ile dökümü yapılmış direksiyon karteri	42
Şekil 2. 32. Döküm halinde, T5 ısıtım işlem görmüş ve T7 ısıtım işlem görmüş durumda AlSi10MgMn için gerilme-gerinim eğrisi	44

Şekil 2. 33. Yaşlanma süresinin %0,3 magnezyum içeriğine sahip AlSi10MnMg'nin mekanik özelliklere etkisi (490 ° C'de 3 saat çözelti, su verme ve 170 ° C'de yaşlandırma)	48
Şekil 2. 34. AlSi10MgMn alaşımı döküm sonrası Wohler eğrisi	49
Şekil 2. 35. Gerilme Genliği – Ömür grafiği	50
Şekil 2. 36. Eksenel gerilme yorulma test şeması	51
Şekil 2. 37. Döner eğme yorulma test makinesi şemaları	52
Şekil 2. 38. Servohidrolik burulma yorulma test makinesinin şeması	53
Şekil 2. 39. Yay yorma cihazının genel görünüşü	55
Şekil 2. 40. Eksantrik krank düzeneği	56
Şekil 2. 41. Uçak eğme yorulma testi için deneysel düzenek	56
Şekil 2. 42. Test sırasında yorulma hasarına uğrayan tel numunesi	57
Şekil 2. 43. Çok numuneli ankastre tip eğilmeli yorulma cihazı	58
Şekil 2. 44. Mekanik yay yorulma cihazı tasarımı	58
Şekil 3. 1. Laboratuvar tipi ısıtma işlem fırını	60
Şekil 3. 2. Laboratuvar tipi ısıtma işlem fırını arayüzü	61
Şekil 3. 3. Numunelerin ısıtma işlem fırını içerisindeki yerleşimi	61
Şekil 3. 4. Isıtma işlem esnasındaki sıcaklık zaman grafiği	61
Şekil 3. 5. DIN 50125'e göre hazırlanan çekme test numunesi teknik resmi	62
Şekil 3. 6. Instron 5982 çekme test cihazı	62
Şekil 3. 7. Çekme test numunesi	63
Şekil 3. 8. Çekme test cihazı grafik ve sonuç raporu	63
Şekil 3. 9. Yorulma test cihazı	64
Şekil 3. 10. Yorulma testinde kullanılan bir numunenin teknik resmi	65
Şekil 3. 11. ASTM E466-15 standardı genel numune gösterimi	65
Şekil 3. 12. ASTM E466-15 standardına göre hazırlanan numune teknik resmi	65
Şekil 4. 1. Parça üzerinden alınan test numune lokasyonları	66
Şekil 4. 2. Test numunesi X-ray kontrolü	67
Şekil 4. 3. Yaşlandırma sonrası ötektik Mg ₂ Si çökmesi	70
Şekil 4. 4. Isıl işlemsiz AlSi10MgMn mikroyapı görüntüsü	70
Şekil 4. 5. 170°C ısıtma işlemli AlSi10MgMn mikroyapı görüntüsü	71
Şekil 4. 6. 180°C ısıtma işlemli AlSi10MgMn mikroyapı görüntüsü	71
Şekil 4. 7. 190°C ısıtma işlemli AlSi10MgMn mikroyapı görüntüsü	72
Şekil 4. 8. Isıl işlemsiz AlSi10MgMn SEM görüntüsü	73
Şekil 4. 9. 170°C ısıtma işlemli AlSi10MgMn SEM görüntüsü	73
Şekil 4. 10. 180°C ısıtma işlemli AlSi10MgMn SEM görüntüsü	74
Şekil 4. 11. 190°C ısıtma işlemli AlSi10MgMn SEM görüntüsü	74
Şekil 4. 12. Aks yorulma kırılması	75
Şekil 4. 13. Isıl işlemsiz AlSi10MgMn stereo mikroskop görüntüsü	76
Şekil 4. 14. 170°C ısıtma işlemli AlSi10MgMn stereo mikroskop görüntüsü	76

Şekil 4. 15. 180°C ısıt işlemlı AlSi10MgMn stereo mikroskop görüntüsü	77
Şekil 4. 16. 190°C ısıt işlemlı AlSi10MgMn stereo mikroskop görüntüsü	77
Şekil 4. 17. Yorulma test cihazı	80
Şekil 4. 18. Yorulma moment hesaplama	80
Şekil 4. 19. AlSi10Mg alaşımlına ait gerilme-ömür grafiğı	82
Şekil 4. 20. AlSi10MgMn (Döküm) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değlerleri grafiğı.....	85
Şekil 4. 21. AlSi10MgMn + T5 (170°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değlerleri grafiğı.....	86
Şekil 4. 22. AlSi10MgMn + T5 (180°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değlerleri grafiğı.....	87
Şekil 4. 23. AlSi10MgMn + T5 (190°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değlerleri grafiğı.....	88



TABLO DİZİNİ

Tablo 2. 1. Eğilmede parça boyut faktörü	15
Tablo 2. 2. Metal mukavemetine bağlı malzeme sabitleri	18
Tablo 2. 3. Alüminyum alaşımları temper seri numaralarının tanımları	36
Tablo 2. 4. AlSi10MgMn ile diğer yüksek basınçlı döküm alaşımlarının karşılaştırılması	41
Tablo 2. 5. AlSi10MgMn alaşımı ile Mg oranlarının kullanım amaçları	43
Tablo 2. 6. Çeşitli magnezyum oranlarına göre mekanik özellikler	44
Tablo 2. 7. %0,33 magnezyum içeriği olan AlSi10MgMn alaşımının T5 ısıtım işlem sonrası mekanik özellikleri	46
Tablo 2. 8. %0,32 magnezyum içeriği olan AlSi10MgMn alaşımının 1 saat süreyle 200 ° C'de yaşlandırmadan önce farklı saklama sürelerine sahip T5 ısıtım işlem sonrası mekanik özellikleri	46
Tablo 2. 9. AlSi10MgMn'nin magnezyum içeriğine bağlı olarak T4 ısıtım işlem sonrası mekanik özellikleri	47
Tablo 3. 1. AlSi10MgMn kimyasal kompozisyonu	59
Tablo 3. 2. AlSi10MgMn fiziksel özellikleri	59
Tablo 3. 3. AlSi10MgMn alaşım ve ısıtım işlem parametreleri	60
Tablo 3. 4. Yorulma Test Metotları.....	60
Tablo 3. 5. Çekme test numunesi ölçüleri	62
Tablo 4. 1. Isıtım işlemsiz AlSi10MgMn numunelerine ait mekanik özellikler	67
Tablo 4. 2. 170°C'de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait mekanik özellikler.....	68
Tablo 4. 3. 180°C'de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait mekanik özellikler.....	68
Tablo 4. 4. 190°C'de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait mekanik özellikler.....	69
Tablo 4. 5 Isıtım işlemli numunelere ait EDS sonuçları.....	75
Tablo 4. 6. Isıtım işlemsiz AlSi10MgMn numunelerine ait sertlik değerleri.....	78
Tablo 4. 7. 170°C'de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait sertlik değerleri.....	78
Tablo 4. 8. 180°C'de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait sertlik değerleri.....	79
Tablo 4. 9. 190°C'de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait sertlik değerleri.....	79
Tablo 4. 10. Gerilmeye göre uygulanan kuvvet değerleri	81
Tablo 4. 11. AlSi10MgMn/ Döküm numunelere ait uygulanan stres değerlerine göre hesaplanan teorik yorulma ömürleri.....	82
Tablo 4. 12. AlSi10MgMn/ 170°C numunelere ait uygulanan stres değerlerine göre hesaplanan teorik yorulma ömürleri.....	83

Tablo 4. 13. AlSi10MgMn/ 180°C numunelere ait uygulanan stres değerlerine göre hesaplanan teorik yorulma ömürleri.....	83
Tablo 4. 14. AlSi10MgMn/ 190°C numunelere ait uygulanan stres değerlerine göre hesaplanan teorik yorulma ömürleri.....	83
Tablo 4. 15 Uygulanan stres değerlerine göre kırılmanın gerçekleştiği ömür değerleri ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	84
Tablo 4. 16. AlSi10MgMn (Döküm) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri	85
Tablo 4. 17. AlSi10MgMn + T5 (170°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri	86
Tablo 4. 18. AlSi10MgMn + T5 (180°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri	86
Tablo 4. 19. AlSi10MgMn + T5 (190°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri	87

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Can ÇİVİ'ye, tez sürecinde sağlamış olduğu desteklerden dolayı sayın Gökhan EYİCİ'ye ve öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan ailem ile sevgili eşim Hatun YAMAN GÜLMEZ'e yürekten teşekkür ederim.

Cemil Çağrı GÜLMEZ
Manisa, 2023



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Yüksek Basıncılı Döküm AlSi10MgMn Alaşımının T5 Isıl İşlem Parametrelerine Göre Yorulma Davranışlarının İncelenmesi

Cemil Çağrı GÜLMEZ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Can ÇİVİ

Bu çalışmada, yorulmaya maruz kalan ve belirli ısıtma işlem parametreleri uygulanmış alüminyum alaşımı malzemelerin gerilmeye bağlı ömür denklemlerinin Wöhler eğrisi yardımıyla belirlenmesi amacıyla bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Wöhler eğrisi, gerilme düzeyi ile malzeme ömrü arasındaki ilişkiyi ifade eden bir matematiksel denklemdir. Bu eğri, gerilme düzeyinin malzeme ömrü üzerindeki etkisini anlamak ve malzeme davranışını öngörmek için kullanılır.

Wöhler eğrisi ile elde edilen matematiksel denklemlerin doğruluğunu test etmek amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, gerilme büyüklükleri ve ömür analizleri üzerinde sayısal örnekler gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal örnekler, çalışmada türetilen matematiksel denklemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Gerilmeye bağlı ömür analizi için döner eğmeli yorulma test makinesi kullanılmıştır. Wöhler eğrisi kullanılarak alüminyum alaşımı malzemelerin gerilmeye bağlı ömür denklemleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yorulma, Yorulma deneyi, Yorulma ömür analizi

2023, 109 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Fatigue Behaviour of High Pressure Die Casting AlSi10MgMn Alloy according to T5 Heat Treatment Parameters

Cemil Çağrı GÜLMEZ

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Can ÇİVİ

In this study, a research was conducted to determine the fatigue-life equations of aluminum alloy materials subjected to fatigue and specific thermal treatment parameters, utilizing the Wöhler curve method. The Wöhler curve is a mathematical equation that expresses the relationship between stress level and fatigue life. It is employed to comprehend the iMPact of stress level on fatigue life and predict material behavior.

Experimental studies were carried out to verify the accuracy of the mathematical equations derived from the Wöhler curve. Numerical examples were performed involving stress magnitudes and life analyses. These numerical examples were then coMPared with the results obtained from the derived mathematical equations. A rotating bending fatigue testing machine was used for the fatigue-life analysis under stress. By employing the Wöhler curve, the fatigue-life equations under stress for aluminum alloy materials were derived.

Keywords: Fatigue, Fatigue test, Fatigue life analysis

2023, 109 pages

1. GİRİŞ

Genellikle, makine elemanlarının, tekrarlanan veya dalgalanan gerilmelerin etkisi altında başarısız olduğu görülmektedir; analizlere göre, gerçek maksimum gerilmelerin malzemenin maksimum kopma mukavemetinin çok altında olduğunu ve oldukça sık olarak akma mukavemetinin de altında olduğunu ortaya koymaktadır. Bu hasarların en ayırt edici özelliği, streslerin çok sayıda tekrarlanmış olmasından kaynaklanmaktadır. Bu değişken gerilmelerin malzemede meydana getirdiği ve kırılmasına yol açtığı değişikliklere yorulma adı verilmektedir [1]. Yorulma ömrü, kırılmaya kadar uygulanan tekrar sayısı ile belirtilmektedir.

Makineler ve makine parçaları, genellikle sürekli olarak değişen büyüklük ve yönü olan kuvvetlerin etkisi altında eğilme ve burulma momentlerine maruz kalırlar. Bu değişken yüklemeler nedeniyle, malzemenin dayanma sınırının çok altındaki gerilmelerde kırılmalar meydana gelebilir. Bu tür kırılmalar yorulma kırılması olarak adlandırılır. Bu sebeple, otomobil parçalarında yorulma ömrünün tespit edilebilmesi oluşabilecek muhtemel hasarların önüne geçilebilmesi için oldukça önemlidir.

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluğa sahip olmalarının yanı sıra korozyon direncinin iyi olması ve mukavemet değerlerinin özellikle alaşımlama ve ısıtma işlemleri sonucunda yüksek olabilmesi sebebiyle imalat sektöründe yaygın bir şekilde kullanılan ve kullanım alanları her geçen gün artan malzemelerdir. Bu malzemeler, bahsedilen özellikleri dolayısıyla otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Otomotiv parçalarında araç hafifletme çalışmalarında demir-çelik parçalar yerine alüminyum parçaların kullanımı çok başvurulan bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Alüminyum yüksek basınçlı dökümde özellikle çevrim sürelerinin düşüklüğü ve ince kesitli parçaların üretimi açısından sağladığı avantajlar sebebiyle en çok kullanılan yöntemlerden biri olmaktadır.

AlSiMgMn alaşımları, yüksek mukavemet ve süneklik ile sahip olduğu iyi yorulma mukavemeti özelliği sayesinde otomotiv parçalarında kullanımı gittikçe artan bir alaşım tipidir. Bu alaşıma T5-T6-T7 ısıtma işlem uygulamaları yapılabilmektedir

ancak seri üretim şartlarında alaşımın sahip olduğu gazlılıktan dolayı T6 ve T7 ısıt işlemler sonucunda parça yüzeylerinde oluşan hava kabarcıkları sebebiyle mukavemet değeri uygun bir şekilde ölçülememektedir. Bu sebeple T5 ısıt işlem şartlarındaki sıcaklık parametresi değiştirilerek değerlendirme yapılacaktır.

Bu tez çalışmasında AlSi10MgMn alaşımının farklı yapay yaşlandırma ısıt işlemi parametrelerinde deneysel verileri oluşturularak elde edilecek veriler kıyaslanarak farklı ısıt işlem parametrelerinin alaşım üzerinde oluşturduğu yorulma etkileri literatüre sunulmuştur.



2. GENEL BİLGİLER

2.1 Literatür Çalışmaları

Yüksek basınçlı dökümde kullanılan alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesiyle ilgili olarak birçok yapılmış çalışma bulunmaktadır.

Lattanzi ve ark. [2] çalışmalarında, otomotiv sektöründe yaygın bir kullanımı olan yüksek basınçlı alüminyum döküm alaşımlarındaki döküm hatalarının yorulma mukavemetine etkilerini incelemişlerdir. Döküm parçasının mikro yapısının yorulma çatlağı başlangıcını ve yayılmasını nasıl etkilediğini belirlemek için AlSi9Cu3(Fe) yüksek basınçlı döküm alaşımı ile hazırlanan numunelere tek eksenli yorulma testleri gerçekleştirilmiştir.

Mayer ve ark. [3] çalışmalarında, yüksek basınçlı döküm magnezyum alaşımları AZ91 hp, AM60 hp, AE42 hp, AS21 hp ve yüksek basınçlı döküm alüminyum alaşım AlSi9Cu3'ün yüksek çevrim yorulma mukavemeti özelliklerini araştırmışlardır. 10^9 çevrime kadar olan ultrasonik yorulma testleri, test edilen döküm koşullarında yaklaşık 38-50 MPa (magnezyum alaşımları) ve 75 MPa (AlSi9Cu3) ortalama yorulma mukavemetlerini sağladığı gözlemlenmiştir. Numunelerin %98,5'inde porozitelerde yorulma çatlakları başladığı belirtilmiştir. Poroziteden kaynaklı ilk çatlaklardan dolayı, K_{cr} 'nin kritik stres büyüklüğü aşılsa numuneler başarısız olağı belirtilmiştir. Magnezyum alaşımlarının K_{cr} değeri $0,85 \pm 0,05$ ila $1,05 \pm 0,05$ MPa $\sqrt{m}$ arasında değiştiği ve AlSi9Cu3 için ise $1,85 \pm 0,10$ MPa $\sqrt{m}$ bulunduğu belirtilmiştir. K_{cr} 'nin altında, yorulma çatlakları porozitelerde başlayabileceği ancak bozulana kadar yayılmayacağı belirtilip K_{cr} kullanılarak, kusurların istatistiksel dağılımı, farklı gerilme genliklerindeki kırılma olasılığı ile bağlantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Hu ve ark. [4] çalışmalarında, yüksek basınçlı döküm ve kokil döküm olarak AlMg5Si2Mn alaşımının mikroyapı, yorulma mukavemeti ve korozyon direncini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, yüksek basınçlı döküm numunelerinin mekanik özelliklerinin (akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve uzama), daha ince tane boyutu ve daha az döküm hatası nedeniyle kokil döküm numunelerinden önemli ölçüde daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Çatlak büyüme bölgesinde ağırlıklı

olarak çekinti porozitelerinden başlayan kokil döküm numunelerinde yorulma çatlakları ve belirsiz yorulma çizgileri gözlenmiştir.

Liu ve ark. [5] çalışmalarında, nano-çekinti testi ile birlikte yerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak T6 ısıtılmasının mikro yapılar üzerindeki etkilerini, alaşım fazlarının mekanik özelliklerini ve yüksek vakumlu basınçlı döküm AlSiMgMn alaşımlarının kırılma davranışını araştırmıştır. Alaşımların döküm halindeki ve T6 ısıtılma işlemi uygulandığı koşullarda mikro yapılarını karşılaştırıp analiz etmişlerdir. T6 ısıtılma işleminin sertliği ve alaşım fazlarının elastisite modülünü etkilemede farklı roller oynadığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda döküm ve T6 ısıtılma işlemi uygulanmış alaşımlarda çatlak ilerleme mekanizmasını analiz etmişlerdir. Döküm halindeki AlSiMgMn alaşımlarında, lifli ötektik Si partiküllerinin varlığından dolayı α -Fe intermetalikler ve ötektik bölgelerde mikro çatlaklar oluştuğu belirtilmiştir. Ana çatlakın ötektik bölgelerde hızla yayıldığı ve sünek bir kırılmaya yol açtığı gözlenmiştir. T6 ısıtılma işlemi uygulanmış AlSiMgMn alaşımlarında ise, mikro çatlakların yalnızca nispeten daha büyük α -Fe intermetaliklerinin yakınında oluştuğu belirtilerek çatlakın, plastisite farklılıklarından dolayı α -Al matrisi ile Si parçacıkları arasında oluşan boşlukları birleştirerek yayıldığı analiz edilmiştir. Çatlakın, kesme ile α -Al taneleri boyunca yayıldığı ve döküm alaşımlarına kıyasla daha sünek kırılma davranışı sergilediği belirtilmiştir.

Wan ve ark. [6] alüminyum dökümleri yüksek dayanımlı yapısal parçalarda kullanılması için, yüksek basınçlı döküm ve vakumlu basınçlı döküm Al – Mg – Si – Mn numunelerinin yorulma davranışı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlara bakıldığında, vakumlu basınçlı döküm ile üretilen numunelerinin (sırasıyla 331 MPa, 210 MPa ve %4,4) maksimum çekme mukavemetinin, akma mukavemetinin ve uzamasının yüksek basınçlı döküm ile üretilen numunelerden (sırasıyla 321 MPa, 205 MPa ve %3,9) üstün olduğunu gözlenmektedir. Vakumlu basınçlı döküm ve yüksek basınçlı döküm numunelerinin yorulma ömürleri birbirine benzerken, vakumlu basınçlı döküm numunelerinin yorulma ömrü yüksek basınçlı döküm numunelerinkinden daha az dağınık olduğu belirtilmektedir. Vakum yardımının, yorulma direncini arttırdığı ve demir içeren partiküllerin zararlı etkisini ortadan kaldırdığı sonuç olarak paylaşılmaktadır. Bunlara ek olarak, porozite, oksit inklüzyonu ve sünek deformasyonun, çatlak başlangıcından sorumlu olduğu ve

transgranüler kırılmanın, baskın çatlak yayılma mekanizması olarak gerçekleştiği belirtilmektedir.

Liu ve ark. [7] çalışmalarında, yüksek mukavemet ve süneklığe sahip yüksek basınçlı döküm AlSiMgMn alaşımlarında çatlak yayılımını, yerinde taramalı elektron mikroskobu gözlemi ve sonlu elemanlar simülasyonu ile çekme testleri kullanarak incelemiştir. Alaşımlardaki gözeneklerin 3 boyutlu x-ışını mikro bilgisayarlı tomografi (μ -CT) incelemesi ve yeniden yapılandırılması ile çekme kırılmasının gözenek ölçekli simülasyonunu gerçekleştirerek çekme sırasında gözenekler etrafındaki gerilme dağılımını hesaplamışlardır. Çekme sonuçları, gözeneklerin ve demir bakımından zengin intermetaliklerin mikro çatlaklar üzerinde önemli etkileri bulunduğunu ve gözeneklerin ana çatlak yolunda belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Gözenek morfolojilerinin ve konumlarının gerilme dağılımı ve mikro çatlak üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Daha düşük küresellikteki gözeneklerin çoklu mikro çatlaklara neden olduğu ve çatlak sapmasına katkı sağladığı gözlemlenmektedir. Deney sonuçlarına göre, alaşımlardaki kırılğan α -Fe intermetaliklerin yığılmasının da ana çatlak yayılmasını etkilediği belirtilmektedir.

Leitner ve ark. [8], mikro gözeneklilik ve istatistiksel boyut etkisinin iki yüksek basınçlı döküm alüminyum alaşımı olan EN AC 45500 ve EN AC 46200'ün yorulma mukavemetine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları küçük ölçekli yuvarlak numuneler, otomotiv endüstrisindeki döküm parça olarak üretilen silindir kafalarından ve motor bloğu parçalarından alınmıştır. Değişken çekme / basma yüklemesi altında tek eksenli yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Mikroporozite gibi mikroyapısal özellikleri, taramalı elektron mikroskobu kullanan kırık yüzey analizi ve X-ışını bilgisayarlı tomografi ile incelemişlerdir. Ölçümlerin, numunelerin alındığı konuma ve numune türüne bağlı olarak mikro gözeneklilik ve mikro yapı açısından önemli farklılıklar ortaya koyduğu belirtilmektedir. Bu bulgulara, mikro gözenekliliğin, EN AC 45500 numunelerinde %39'a varan on milyon yük döngüsünde maksimum yorulma direncinde maksimum fark ile yorulma davranışını büyük ölçüde etkilediğini gösteren deneysel test sonuçlarıyla gözlemlendiği paylaşılmaktadır.

Wan ve ark. [9] çalışmalarında, EN AC 46000 alaşımı yüksek basınçlı dökümlerden elde edilen yorulma numunelerindeki gözenekleri tespit ederek, yüksek

çözünürlüklü X-ray bilgisayarlı tomografi teknolojisi ile incelemiştir. Gözeneklerin üç boyutlu karakterizasyonlarını analiz etmiştir. Çalışmada belirtilen yüksek çevrimli yorulma testleri, farklı gözeneklilik içeriklerine sahip yedi grup numunede beş gerilme genliğinde gerçekleştirilmiştir. Weibull analizine göre, daha büyük stres koşullarında yorulma ömrünün daha az dağılmaya sahip olduğu belirtilmektedir. Yorulma çatlağı oluşan yüzeylerde yapılan SEM gözlemi ile yorulma çatlaklarını başlatan gözeneklilikleri tespit etmiştir. Çatlak yüzeyinden ve 3D X-ışını tomografi incelemesinden elde edilen gözenek özellikleri ile bir gözenek-yorulma ömrü tahmin denklemi çıkarmışlardır. Tomografi verilerinin üç boyutlu yeniden yapılandırılması ve sonlu elemanlar yöntemi ile, üç boyutlu gözenekler etrafındaki gerilme dağılımının simülasyonu gerçekleştirilerek daha fazla analiz yapmışlardır. Buna göre döküm yüzeylerinin yakınındaki gözeneklerin daha fazla stres konsantrasyonuna neden olacağı ve döküm performansına daha fazla zarar vereceği sonucu belirtilmektedir.

Avalle ve ark. [10] çalışmalarında, döküm hatalarının statik ve yorulma dayanımı üzerindeki etkisini, yüksek basınçlı döküm alüminyum alaşımlar için araştırmaktadır. Döküm hataları, gaz ve çekinti gözeneklerinin yanı sıra soğuk birleşmeler ve cüruf kaynaklı oluşmaktadır. Yolluk tasarımına göre farklılık gösteren üç numune grubu için yorulma dayanımı incelendiğinde önemli bir değişiklik olmadığı belirtilmektedir. Yorulmaya maruz kalan dökümler için, maksimum kabul edilebilir gözeneklilik seviyesine dayalı kalite kontrol kriterleri, ortalama yoğunluktan etkilenmiyorsa ve boşluklar kalın bölümlerin merkezinde yer alıyorsa uygun olmayacağı sonucu paylaşılmaktadır.

Li ve ark. [11] çalışmalarında, her biri farklı kompozisyon, ısıtma işlem ve mikro yapıya sahip, yüksek basınç, alçak basınç ve kuma döküm yöntemleriyle üretilmiş olan dört farklı alüminyum alaşım üzerinde ultrasonik yorulma testleri gerçekleştirmişlerdir. Testleri kuru havada, laboratuvar havasında ve suya batırılmış olarak yapmışlardır ve sonucunda bazı alaşımların ultrasonik yorulma ömürlerinin, ortam neminden önemli ölçüde etkilendiği belirtilmektedir. Alaşım kompozisyonu, akma dayanımı, ikincil dendrit kolu aralığı ve gözeneklilik gibi farklı faktörlerin etkileri sonucunda ultrasonik yorulma testinde çevresel nem etkisini arttıran anahtar faktörün malzeme dayanımı olabileceği sonucuna varılmaktadır.

Nourian-Avval ve ark. [12] çalışmalarında, iç kusurların, yüksek basınçlı dökümle üretilen A356-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kusurların, numune boyutunun, ortalama stresin ve stres gradyanının etkilerini araştırmak için farklı yükleme koşulları altında yorulma testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu amaca ulaşmak için, iki numune boyutu üzerinde tam tersine çevrilmiş tek eksenli yorulma testleri ve ortalama stresin etkisini incelemek için gerilme-gerilme yorulma testleri gerçekleştirmişlerdir. Stres gradyanının kusur içeren malzemelerin yorulma performansı üzerindeki etkisini incelemek için döner eğme testleri de uygulamışlardır. Yorulma ömrü verilerindeki dağılımı, istatistiksel analiz kullanarak değerlendirmişlerdir. Ortalama stres düzeltme faktörü kullanılarak farklı stres oranları altında numunelerin yorulma ömrü ile ilgili iyi korelasyonlar elde etmişlerdir. Numunelerin farklı test koşulları altındaki yorulma ömrü de kırılmış yüzeylerinde gözlemlenen maksimum kusur boyutu kullanılarak tahmin edilebileceği sonucuna varılmaktadır.

Nourian-Avval ve ark. [13] çalışmalarında, farklı yükleme koşulları altında yüksek basınçlı döküm ile üretilen A356-T6 alüminyum alaşımının yorulma performansını incelemişlerdir. Tekdüze ve döngüsel deformasyon davranışlarının elde edilmesine ek olarak, eksenel, burulma, faz içi ve faz dışı kombine yüklemeler altında yorulma testleri gerçekleştirmişlerdir. Yorulma çatlağı büyüme mekanizmasını incelemek için, statik gerilme veya sıkıştırma ile döngüsel burulma altında birkaç test de uygulamışlardır. Tüm numunelerde yorulma çatlaklarının başta gözeneklilik olmak üzere kusurlardan başlayıp maksimum asal gerilme düzleminde büyüdüğü gözlemlenmektedir. Yorulma verilerini ilişkilendirmek için Smith-Watson-Topper (SWT) hasar parametresi kullanılmaktadır. Deneysel yorulma ömrü verileri, küçük çatlak büyüme modelleri kullanılarak ve kırılma yüzeylerinde çatlak başlatan kusurdan tahmin edilmektedir. Farklı yükleme koşulları altındaki yorulma ömürleri, aşırı değer istatistikleri ile tahmin edilen maksimum kusur boyutu kullanılarak da tahmin edilebileceği sonucuna varılmaktadır.

Tomazincic ve ark. [14], fazla gözenekliliğe sahip bir yüksek basınçlı döküm alaşım olan AlSi9Cu3'ün yorulma ömrünü incelemişlerdir. Standart numuneler, yorulma kopması meydana gelene kadar döngüsel olarak yüklemeye maruz bırakılmıştır ($R = -1$). Gözenekleri üç boyutlu gösterebilmek için numuneleri μ -CT ile

taramışlardır. Modeller, iki farklı yöntem kullanarak yorulma ömrünü hesaplamalı olarak belirlemek için kullanılmaktadır. İlk olarak, yorulma ömrü homojen malzeme için bir Coffin-Manson dayanıklılık ilişkisi ile birleştirilmiş bir çentik-gerinim yaklaşımı kullanılarak tahmin edilmektedir. İkinci olarak, yorulma ömrü, farklı gözenek etkilerinden dolayı yorulma ömrü azalması olarak kabul edilen uyarlanmış bir Coffin-Manson ilişkisi ile birleştirilen homojenleştirilmiş çentiksiz bir model kullanılarak tahmin edilmiştir.

Boileau ve ark. [15] çalışmalarında, 319 tipi bir alüminyum alaşımının yorulma özelliklerinin katılma süresi ve ısıtma işleminden nasıl etkilendiğini ölçmeye çalışmışlardır. Hem gözenek içeren hem de gözeneklilik içermeyen numuneleri T6 veya T7 ısıtma işlem koşullarında test etmişlerdir. Katılma süresi arttıkça, ortalama başlangıç gözenek çapının arttığı ve stres kontrollü yorulma ömrünün azaldığı gözlemlenmiştir. Isıtma işlemin gözenekli olmayan numunelerinin yorulma özellikleri üzerinde büyük bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, gözeneklilik içeren yorulma numunelerinde, ısıtma işlem, döküm 319 tipi alaşımın yorulma ömrünü veya yorulma mukavemetini önemli ölçüde değiştirmedikleri sonucuna varmışlardır. Yorulma tepkisi üzerinde ısıtma işlemin bir etkisinin olmaması, dökme alüminyumda yorulma çatlağının başlamasındaki mikro gözenekliliğin baskınlığına göre değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Osmond ve ark. [16] çalışmalarında, belirli mikroyapısal özellikler ile ortalama yorulma mukavemeti arasında açık bir bağlantı kurmayı amaçlamışlardır. Çalışmayı, kritik kusurların ortalama boyutuna bakarak ve ilgili bir istatistiksel analiz kullanarak yapmaya çalışmışlardır. Otomotiv endüstrisinde kullanılan motor silindir kafalarının maruz kaldığı yüksek devirli yorulma hasarında uygulama yapılmıştır. Silindirik numuneler ve gerçek parçalar üzerinde hem yorulma testleri hem de mikroyapısal karakterizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Örnekler tek eksenli ve çok eksenli yükleme koşullarına tabi tutulmuştur. Hem numuneler hem de gerçek parçalar için arızaların kaynağındaki kritik kusurların istatistiklerini elde etmek için yorulma hasar yüzeyinin sistematik analizlerini yapmışlardır. Paralel olarak, kritik bölgeler ve yapıdaki ilişkili lokal yükleme modunu, uygun bir yüksek çevrim yorulma analizi ile karakterize etmişlerdir. Son olarak yorulma testi verileri ve kritik kusurların istatistiksel analizini

birleştirerek, boyut etkisinin yorulma ömrünün tahmin edilmesini sağlayabileceği belirtilmektedir.

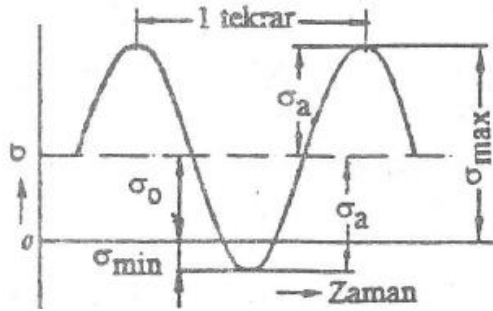
2.2 Malzemelerde Yorulma

Değişken gerilmelerin malzemede meydana getirdiği ve kırılmasına yol açtığı değişikliklere yorulma adı verilmektedir [1]. Yorulma mr, malzemenin kırılmaya kadar maruz kaldığı tekrar sayısıyla belirlenmektedir. şekil 2.1’de değişken zorlama durumu gösterilmektedir. Burada belirtilen değişkenlerin tanımı aşağıda belirtilmektedir [17].

σ_0 : ortalama gerilme

σ_a : genlik gerilmesi

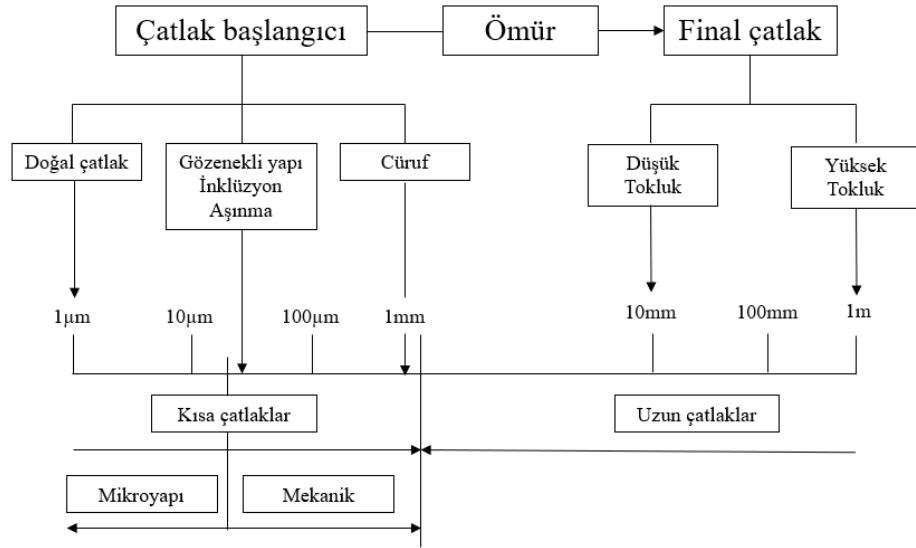
$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$: gerilme oranı



şekil 2. 1. Değişken zorlama durumu [17]

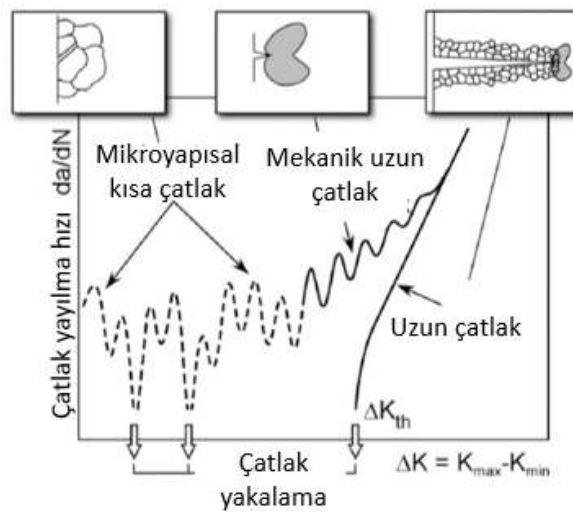
Yorulma hasarı birbirini izleyen detaylı olarak beş aşamadan oluşmaktadır: Çatlak başlangıcı, mikro yapısal olarak kısa çatlakların yayılması, mekanik / fiziksel olarak kısa çatlakların yayılması, uzun çatlakların yayılması ve son kırılma yapı. Bu aşamalara ait görüntü şekil 2.2’de gösterilmiştir. Çatlak başlangıcı, geri döndürülemez plastik deformasyon birikimi nedeniyle bir çatlağın çekirdeklendiği aşamadır. Bu, döngüsel yükleme altında geri dönüşü olmayan dislokasyon hareketi nedeniyle nominal düz yüzeylerde oluşabilmektedir. Çatlakların ayrıca tane sınırlarında ve gerilme / gerinim yoğunlaştırıcıları olarak işlev gören kusurlarda çekirdeklendiği

bulunmuştur. Kusurların varlığında çatlak başlatma aşamasının, sonraki çatlak yayılma aşamalarına kıyasla genellikle kısa olduğu belirlenmiştir [18].



Şekil 2. 2. Yorulma çatlak yayılma aşamaları [18]

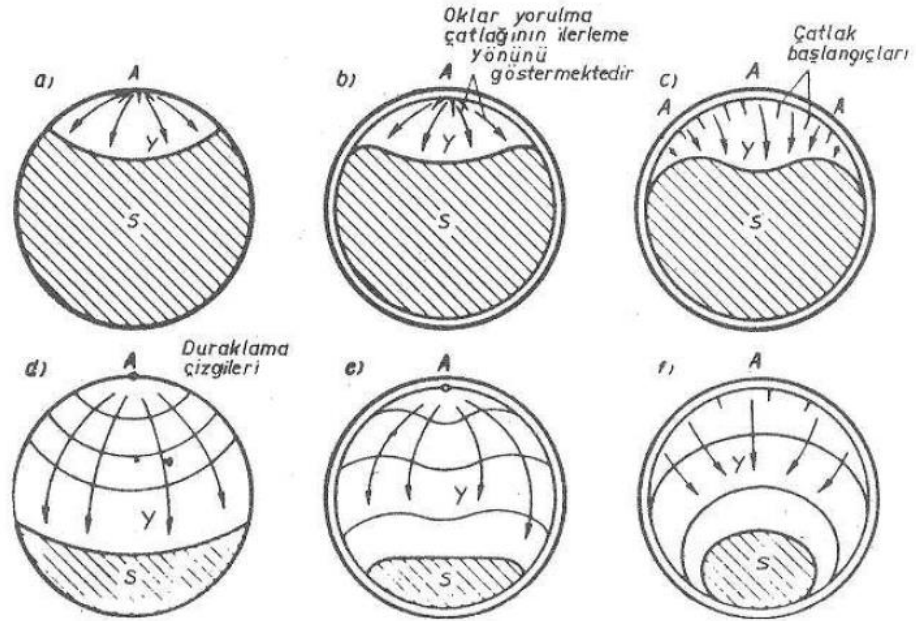
Başlangıç aşamasında genellikle daha fazla sayıda çatlak oluşur. Boyutları, geliştikleri mikroyapının karakteristik boyutlarına göre, çoğu tane büyüklüğündedir. Bu mikro yapısal olarak kısa çatlakların yayılması, yerel mikro yapının güçlü bir etkisine bağlı olarak bazı süreksizliklerle karakterize edilmektedir. Büyüme hızlanmasının aşamaları, şekil 2.3'de görsel olarak belirtildiği gibi mikro mekanik bariyerlerde yavaşlama ve hatta çatlak durdurma ile değişmektedir [19].



Şekil 2. 3. Yorulma çatlak yayılma aşamaları [19]

Bir çatlak, kırılma mekaniği prensipleri uygulanabilecek büyüklüğe eriştiğinde makro çatlak olarak kabul edilmektedir. Alüminyum alaşımlarında 0,125 mm, çeliklerde 0,2 mm büyüklüklerindeki çatlaklar deneysel olarak makro çatlak olarak değerlendirilmektedir [17].

Yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar ve daha sonra iç kısımlara doğru yayılır. Bu nedenle, yüzey işleme kalitesi yorulma davranışında önemli bir faktördür. Yüzeydeki pürüzler, çentik etkisi yaratıp çatlak oluşumunu kolaylaştırabilir. Bu pürüzler, gerilmelerin yoğunlaşmasına ve çatlak oluşumuna yol açabilir. Yüzey işleme kalitesi arttıkça, yorulma mukavemeti de artar. Yorulma çatlağının zamanla ilerlemesi şekil 2.4'te gösterilmiştir [20].

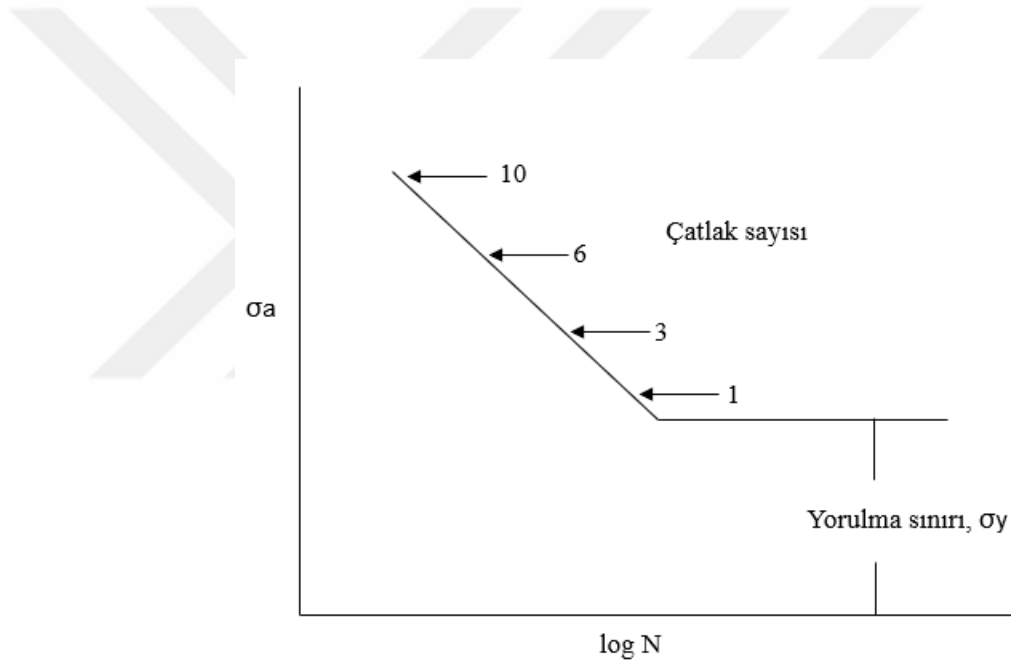


Şekil 2. 4. Yorulma çatlağının zamanla ilerlemesi [20]

Çatlak yayılması, genellikle çekirdeklenme sürecinin büyümesi olarak düşünülse de çatlak yayılmasının ilk aşamaları hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır. İlk aşamada, çatlaklar genellikle yüzeyde çekirdeklenecek yayılmaya başlar. Örneğin, yüzeydeki bir kayma bandında bir çatlak oluştuğunda, kayma bandı boyunca ilerleyerek bir sınıra ulaşabilir. Bu aşamadan itibaren, çatlak yayılması genellikle gerilme eksenine dik yönde baskın hale gelir.

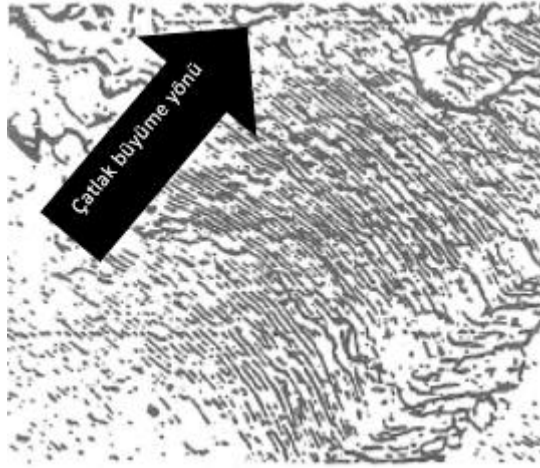
Çatlak ucunda gerilme birikimi meydana gelir ve bölgesel plastik deformasyona yol açabilir. Çatlak büyüdükçe plastik deformasyon artar ve çatlak boyutu numunenin kalınlığıyla karşılaştırılabilecek bir boyuta ulaşır. Bu boyuta ulaşıldığında, çatlak yayılmasının son aşaması meydana gelir ve çatlak tamamen yayılır ve malzemenin kırılması gerçekleşir. Bu son aşama, genellikle çatlak büyüklüğü, gerilme yoğunluğu ve malzemenin özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak gerçekleşir. [21].

Genlik gerilmesi arttıkça, çatlak sayıları da artmaktadır. Ancak yorulma sınırına yakın gerilme değerlerinde, tek bir çatlak çekirdeklenmesi olabilir, çekirdek sayısının genlik gerilmesine bağlı olarak değişimi Şekil 2.5'te gösterilmektedir [17].



Şekil 2. 5. Çekirdek sayısının genlik gerilmesine bağlı olarak değişimi [17]

Yorulma çatlağının makro-çatlak ilerlemesi sırasında yorulma yüzeyinde elektron mikroskopuyla gözlemlenebilen şekil 2.6'da gösterilen ince yorulma çizgileri oluşmaktadır [17].



Şekil 2. 6. İnce yorulma çizgileri [17]

İnce yorulma çizgileri, her yük tekrarı sonucunda çatlakın belirli bir mesafe ilerlemesiyle oluşur. Bu çizgiler arasındaki mesafe, çatlakın büyümesi nedeniyle meydana gelen artışı temsil eder. Çatlak ilerledikçe, çatlak ucundaki lokal gerilmeler daha da artarak çatlak ilerleme hızını arttırmaktadır ve bu nedenle yorulma süreci boyunca çatlakın büyümesiyle birlikte çizgiler arasındaki mesafe de genellikle artar [17].

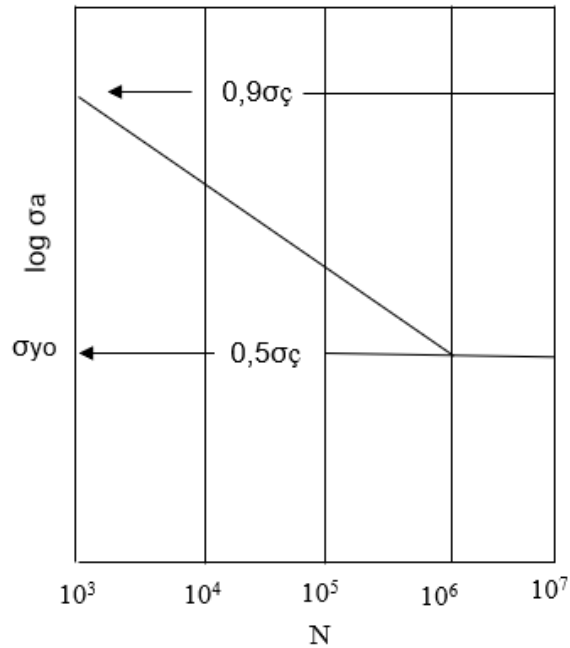
Verilmiş bir ortalama gerilme seviyesi için, sonsuz ömre karşılık gelen maksimum gerilmeye yorulma sınırı adı verilmektedir. Pratikte malzemelerin yorulma sınırları, tam değişken gerilme makinelerinde ve parlatılmış yüzeye sahip deney parçalarında elde edilmektedir. Çeliklerde 10^6 tekrar sonucu hasar oluşturmayan genlik gerilmesi yorulma sınırı olarak kabul edilmektedir. Çekme dayanımı 1400 MPa'nın altında olan çeliklerde, tam değişken gerilme halindeki yüklemde yorulma sınırı σ_{y0} , çeliğin çekme dayanımı σ_c 'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [17].

$$\sigma_{y0} = \sigma_c \quad (2.1)$$

Bu değer dökme demirde, $\sigma_{y0} = 0,4\sigma_c$, alüminyum ve magnezyumda ise, $\sigma_{y0} = 0,35\sigma_c$ olarak alınmaktadır. Demir dışı metallerde belirgin bir yorulma sınırı olmadığından, bunların yorulma sınırı olarak 10^8 tekrara karşılık gelen yorulma dayanımı kullanılmaktadır [17].

Pratikte, parçalar tam değişken gerilmeye maruz kalmayan ve parlatılmış deney parçalarından farklı şekillerde yüklenirler ve bunların yüzeyleri de farklı özelliktedir. Aynı zamanda birçok parçadan sonsuz ömür istenmemektedir. Elemanın çeşitli değişken yükleme şatları altında yorulma dayanımını saptamak için, yorulma sınırı aşağıdaki faktörler göz önüne alınarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.7’de çeliklerin yorulma dayanımının tekrar sayısına göre değişim eğrisi (S-N eğrisi) standart deney parçası için gösterilmektedir [17].

- Yükleme şekli
- Parça boyutları
- Yüzey şartları
- Çentik
- Ortalama gerilme
- İstenen ömür



Şekil 2. 7. Döner eğilmeye maruz standart çelik malzemelerde S-N eğrisi [17]

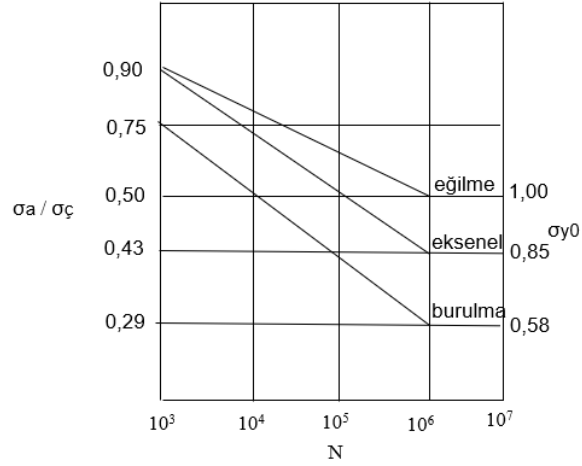
Yorulmada aksenal, eğilme ve burulma olmak üzere üç temel yükleme şekli mevcuttur. Yorulma sınırı eğilme ile saptanmaktadır. Ancak tam değişken aksenal yüklemeye maruz parlatılmış deney parçalarının yorulma sınırı, eğilmeye maruz deney parçalarının yorulma sınırının %85’i kadardır. Yükleme şekli S-N eğrisinin 10³ tekrara

karşılık gelen noktasını aşağıdaki gibi etkilemektedir. Üç tip yüklemeye maruz parlatılmış çeliklerdeki S-N eğrileri şekil 2.8’de gösterilmektedir [17].

Tam değişken eğilmede $\sigma_a = 0,9\sigma_c$

Tam değişken aksenal yüklemde $\sigma_a = 0,9\sigma_c$

Tam değişken burulmada $\tau_a = 0,74\sigma_c$



Şekil 2. 8. Tam değişken eğilme, çekme ve burulmaya maruz kalan standart çelik parçalarda S-N eğrileri [17]

Yorulmada boyut etkisine ilişkin deneysel veriler çelişkilidir ve tam olarak net değildir. Ters eğilme ve burulmadaki testlerde, numune çapı ile yorulma sınırında herhangi bir değişiklik bulunamamıştır fakat artan çapla yorulma sınırının azaldığı gözlemlenmiştir [22].

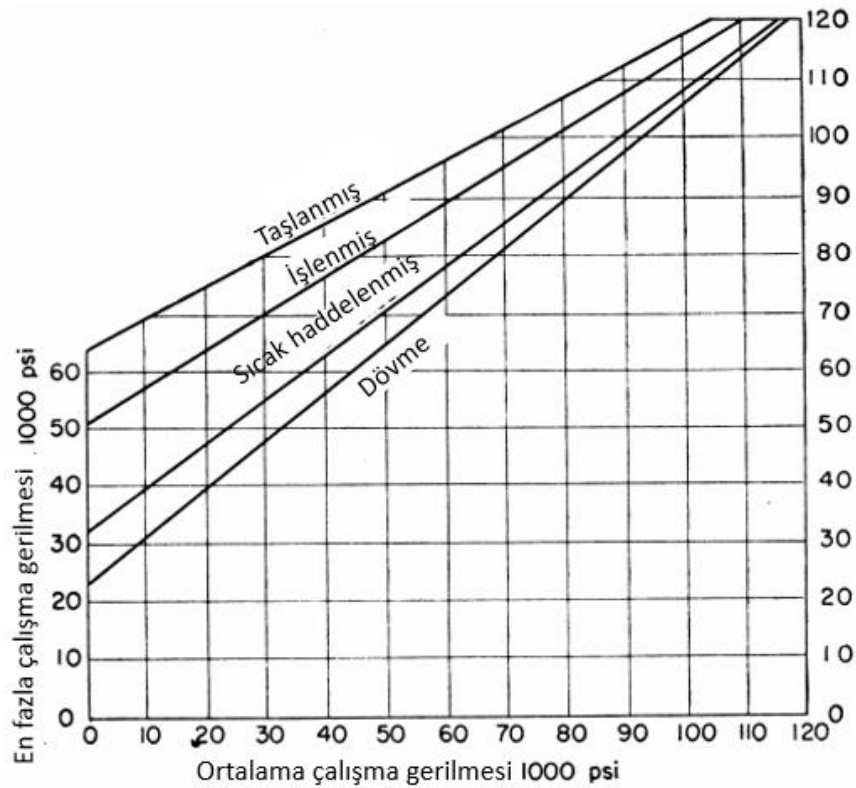
Yumuşak çelik için, 2 ila 50 mm arasında değişen çaplar için eğilme yorulması sınırındaki azalması yaklaşık yüzde 10'u geçmemektedir. Çeliğin eğilme yorulmasında boyut etkisine ilişkin veriler Tablo 2.1'de özetlenmektedir. C_b faktörü, bir yorulma azaltma faktörüdür [23].

Tablo 2. 1. Eğilmede parça boyut faktörü [23]

Çap, D(mm)	Faktör (C_b veya K_b)
$D < 10$	1
$10 < D < 50$	0,9
$50 < D < 230$	$1-(D-7,6)/380$

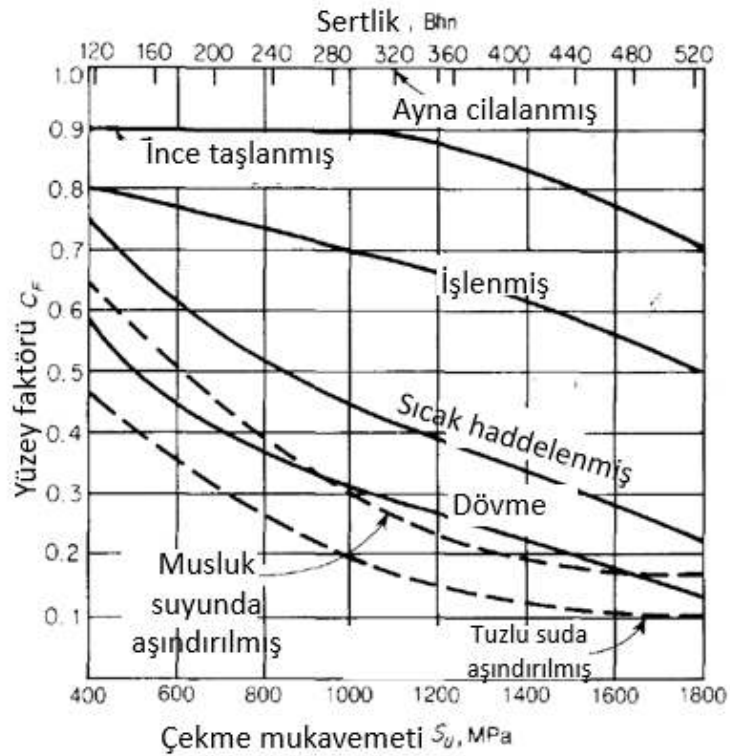
Pratik olarak tüm yorulma arızaları yüzeyde başlamaktadır. Eğilme ve burulma gibi birçok yaygın yükleme türü için maksimum gerilme yüzeyde meydana gelmektedir, bu nedenle hatanın oradan başlaması mantıklıdır. Bununla birlikte, eksenel yüklemede de yorulma arızası neredeyse her zaman yüzeyde başlamaktadır. Yorulma özelliklerinin yüzey durumuna çok duyarlı olduğuna dair çok sayıda kanıt bulunmaktadır. Bir yorulma numunesinin yüzeyini etkileyen faktörler kabaca üç kategoriye ayrılabilir: (1) yüzey pürüzlülüğü veya gerilme arttırıcılar, (2) yüzey metalinin yorulma mukavemetindeki değişiklikler ve (3) yüzeyin artık gerilme durumu.

İnce çiziklerin (gerilme arttırıcılar) ana çekme gerilmesinin yönüne paralel yönlendirildiği düzgün parlatılmış numuneler, yorulma testlerinde en yüksek değerleri vermektedir. Bu tür özenle parlatılmış örnekler genellikle laboratuvar yorulma testlerinde kullanılmaktadır. Şekil 2.9, maksimum ve ortalama maruz kaldığı gerilmenin yüzey hazırlama türüne göre nasıl değiştiğini göstermektedir [24].



Şekil 2. 9. Maksimum ve ortalama maruz kalınan gerilmenin yüzey hazırlama türüne göre değişimi [24]

Yorulma arızası yüzeyin durumuna çok bağlı olduğundan, yüzey malzemesinin yorulma mukavemetini değiştiren herhangi bir şey, yorulma özelliklerini büyük ölçüde değiştirmektedir. Isıl işlem görmüş çeliklerde yüzeyin dekarbürizasyonu özellikle yorulma performansı için zararlıdır. Benzer şekilde, alüminyum alaşımlı levhaların yorulma mukavemeti, yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlı levhaya yumuşak bir alüminyum kaplama uygulandığında azalmaktadır. Yorulma özelliklerindeki belirgin gelişmeler, karbonlama ve nitrürleme ile çelik parçalar üzerinde daha sert ve daha güçlü yüzeylerin oluşmasından kaynaklanabilmektedir. Bununla birlikte, bu işlemlerle yüzeyde elverişli baskılı artık gerilmeler üretildiğinden, daha yüksek yorulma özelliklerinin yalnızca yüzeyde daha yüksek mukavemetli malzeme oluşumundan kaynaklandığı düşünülmemektedir. Yorulma performansını iyileştirmede karbürleme ve nitrürlemenin etkinliği, bir eksenel yorulma testine göre bükülme veya burulmada olduğu gibi yüksek bir gerilme gradyanının mevcut olduğu durumlarda daha fazladır. Şekil 2.10, dikkatlice parlatılmış numunelerin yorulma sınırını azaltmada çeşitli yüzey kaplamalarının çelik üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 2. 10. Çeşitli yüzey işlemlerinden dolayı çeliğin yorulma sınırı için azaltma faktörü [23]

Çentik gibi bir gerilme arttırıcının eklenmesiyle yorulma mukavemeti ciddi şekilde azalmaktadır. Çentiklerin yorulma mukavemeti üzerindeki etkisi, çentikli ve çentiksiz numunelerin S-N eğrileri karşılaştırılarak belirlenir. Çentikli numuneye ilişkin veriler genellikle numunenin net kesitine dayalı olarak nominal gerilme cinsinden çizilir. Çentiğin yorulma sınırını azaltmadaki etkinliği, yorulma mukavemeti azaltma faktörü veya yorulma çentik faktörü, K_f ile ifade edilir. Bu faktör, basitçe, çentiksiz numunelerin yorulma sınırının çentikli numunelerin yorulma sınırına oranıdır [23].

Yorulma halindeki bir malzemenin çentik hassasiyeti çentik duyarlılığı faktörü q ile ifade edilmektedir.

$$q = \left(\frac{K_f - 1}{K_t - 1} \right) \quad (2.2)$$

Denklem (1), bir çentikten ($K_f = 1$) dolayı yorulmada azalma yaşamayan bir malzemenin $q = 0$ faktörü, çentiğin tam teorik etkisine sahip olduğu bir malzemenin ($K_f = K_t$) $q = 1$ çarpanına sahiptir [23].

Yorulmada çentik hassasiyeti için bir başka yaklaşım Neuber tarafından geliştirilmiştir. Sembollerin anlamı aşağıda belirtilmektedir. Alüminyum alaşımları ve çeliklere ait malzeme sabitleri tablo 2.2’de gösterilmektedir [23].

$$K_f = 1 + \left(\frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\rho/r}} \right) \quad (2.3)$$

r = çentiğin kökündeki kontur yarıçapı

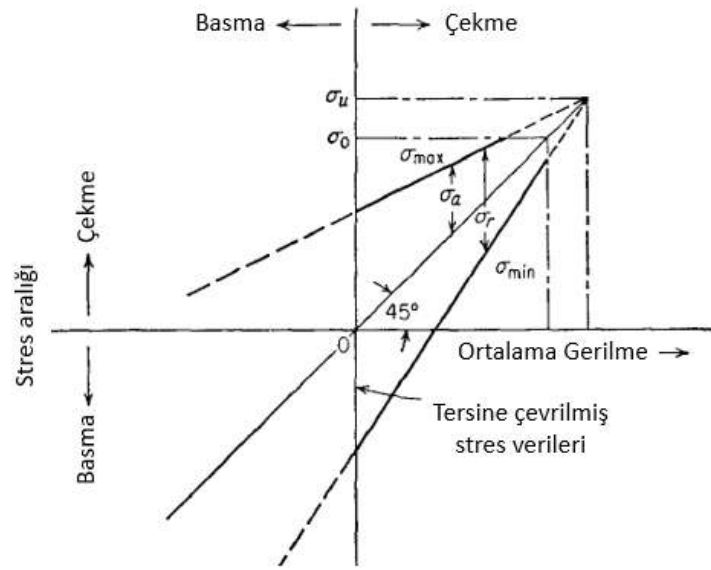
ρ = metalin mukavemetine bağlı bir malzeme sabiti.

Tablo 2. 2. Metal mukavemetine bağlı malzeme sabitleri [23]

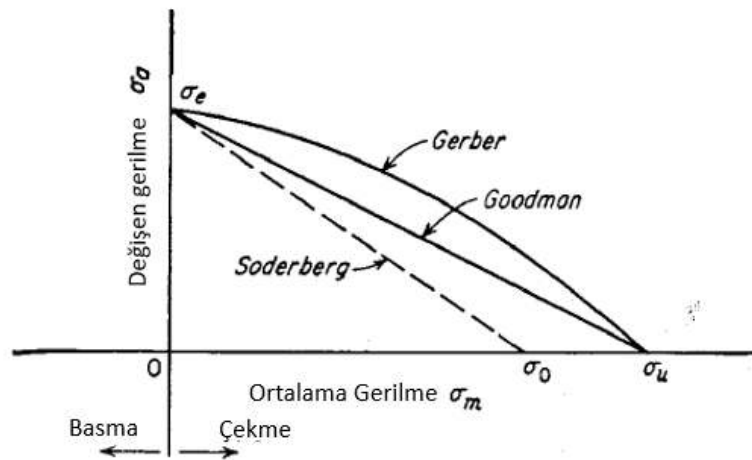
Malzeme	Mukavemet (MPa)	ρ (mm)
Çelik	552	0,15
Çelik	896	0,07
Çelik	1310	0,01
Alüminyum alaşım	150	2,00

Aluminyum alaşım	300	0,60
Aluminyum alaşım	600	0,40

Parçalara genellikle hem tekrarlı hem de statik gerilme birlikte etki etmektedir. Bu durumda yükleme tam değişken değildir, ortalama gerilme σ_0 sıfırdan farklıdır. Böyle durumlarda ortalama gerilmenin hem yorulma sınırına hem de yorulma dayanımına etkisinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Goodman, Gerber ve Soderberg diyagramları kullanılmaktadır, şekil 2.11 ve 2.12’de örnek diyagramlar gösterilmektedir [23].

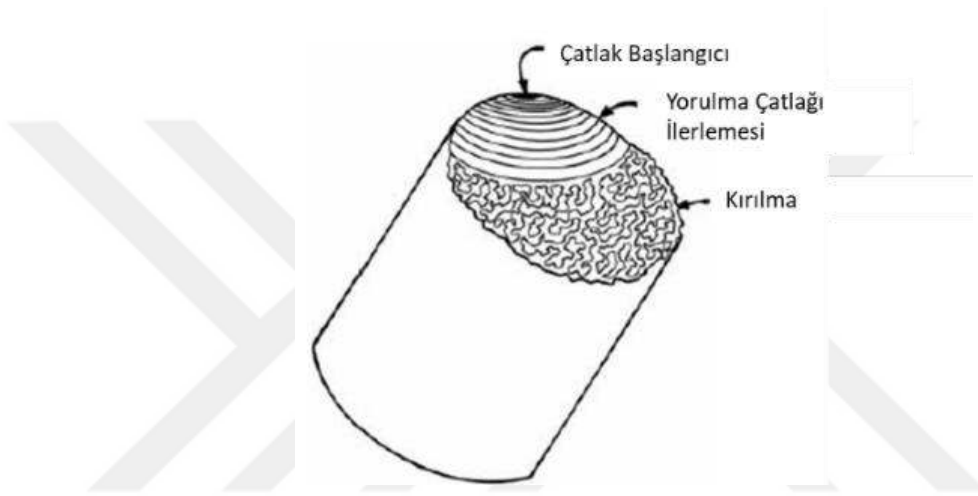


şekil 2. 11. Goodman Diyagramı [23]



şekil 2. 12. Gerber, Goodman ve Soderberg Diyagramları [23]

Çoğunlukla, bir yorulma kırılma yüzeyini çavuş işaretleri gibi bazı kolayca tanımlanabilen makroskobik özellikler göstermektedir. Şekil 2.13, yorulmada başarısız olan bir çelik şaftın kırılma yüzeyinin bir şematüğünü göstermektedir. Bu tür bir kırılmanın ana özellikleri, genellikle yüzeyde bir yorulma çatlak başlatma sahasıdır; çavuş işaretlerini gösteren bir yorulma çatlak yayılma bölgesi ve çatlak uzunluğunun kritik bir uzunluğu aştığı hızlı kırılma bölgelerinden oluşmaktadır. Tipik olarak, döngüsel yükleme altındaki hasar, rutin yükleme altındaki mukavemetten çok daha düşük gerilme seviyelerinde meydana gelmektedir [25].



Şekil 2. 13. Örnek bir yorulma çatlak [25]

Malzemelerin döngüsel davranışlarının incelenmesi aşağıdaki üç sınıfa ayrılabilir [25]:

- Stres ömür yaklaşımı
- Gerinim ömür yaklaşımı
- Kırılma mekaniği yaklaşımı

Stres-ömür yöntemi, yalnızca stres seviyelerine dayanan bir yaklaşım olduğu için özellikle düşük çevrim uygulamaları için en az doğru yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemde, farklı stres seviyeleri altında malzemenin ömrü tahmin edilmeye çalışılır. Ancak, gerçek dünya uygulamalarında birçok farklı etken ve faktör bulunmaktadır ve yalnızca stres seviyelerine dayanan bir yöntem bu faktörleri

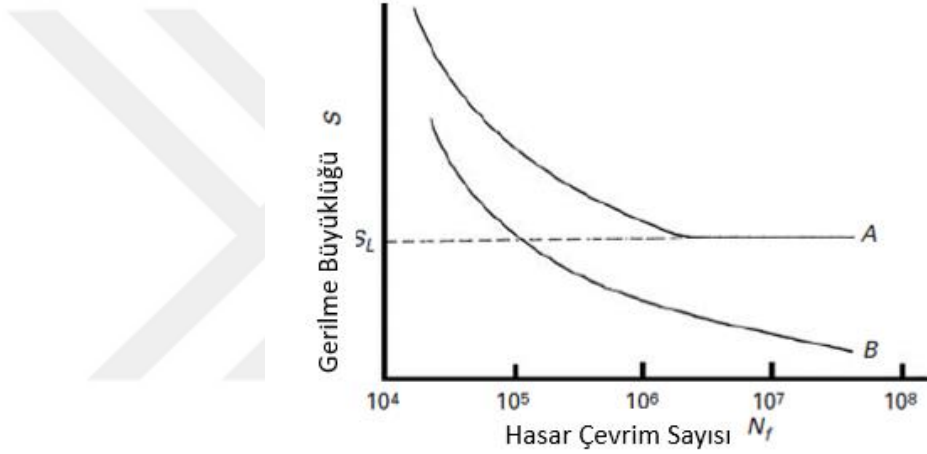
yeterince temsil etmeyebilir. Bu nedenle, stres-ömür yöntemi en geleneksel yöntem olarak kabul edilir ve birçok tasarım uygulamasında kullanılır. Bu yöntem, genellikle bol miktarda destekleyici veriye sahiptir ve yüksek döngülü uygulamaları yeterince temsil etmektedir. [1].

Gerinim-ömür yöntemi, gerilme ve gerinim değerlerinin dikkate alındığı lokalize bölgelerdeki plastik deformasyonun daha ayrıntılı analizini içeren bir yöntemdir. Bu yöntemde, malzemenin gerilme-gerinim davranışı incelenerek yorulma ömrü tahminleri yapılır. Bu yöntem, özellikle düşük çevrimli yorulma uygulamaları için daha uygundur. Bu yöntemi uygularken, birkaç idealleştirmenin birleştirilmesi gerekir ve bu nedenle sonuçlarda belirsizlikler olmaktadır. Bu sebeple sadece yorulmanın sonucunun anlaşılmasına katkı sağlaması bakımından ele alınmaktadır [1].

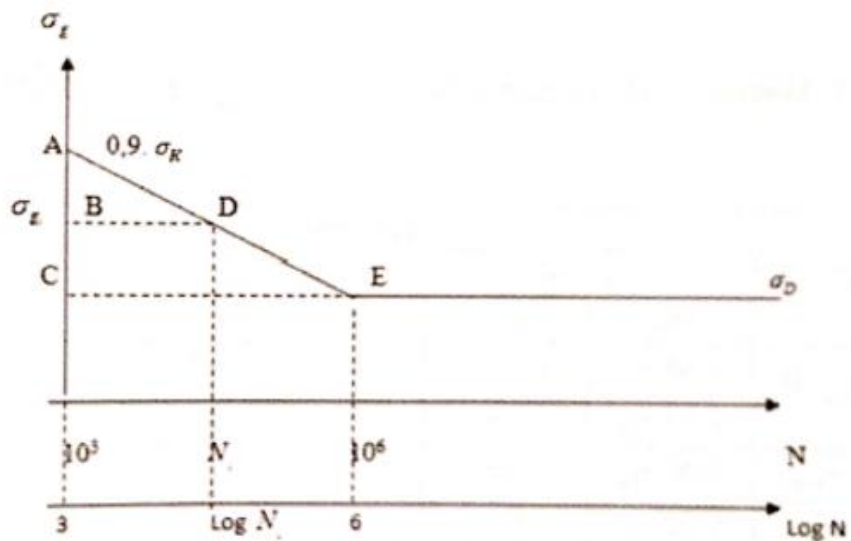
Kırılma mekaniği yöntemi, bir çatlakın zaten mevcut olduğunu ve tespit edildiğini varsayan bir yöntemdir. Bu yöntem, çatlakın büyümesini stres yoğunluğuna dayanarak tahmin etmek için kullanılır. Büyük yapılar üzerinde uygulandığında, bilgisayar kodları ve periyodik bir denetim programı ile birlikte en pratik yöntemlerden biri haline gelmektedir [1].

Stres ömrü yaklaşımı, döngüsel yorulma verilerini işlemenin en eski yöntemlerinden biridir. Bu yaklaşım, gerilmeler ve gerinimler elastik davrandığında kullanışlıdır. Temel olarak, belirli bir gerilme düzeyindeki yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak gerilme-ömür (stres-ömür) eğrisi oluşturulur. Bu eğri, belirli bir gerilme düzeyinde malzemenin tahmini ömrünü gösterir. Stres ömrü yaklaşımının temel dezavantajı, yorulma ömrünün başlangıç ve yayılma aşamalarının ayrıştırılamamasıdır. Gerinim ömrü yaklaşımı, önemli miktarda kalıcı deformasyon olduğunda faydalıdır. Bu koşullar altında yorulma ömrü tipik olarak oldukça kısa olmaktadır. Kırılma mekaniği yaklaşımında, kırılma mekaniğinin temel fikirleri döngüsel yorulmaya uygulanmaktadır, yani çatlak sebebi olarak döngüsel gerilme yoğunluğu faktörü kullanılmaktadır. Bir çatlakın ilk boyuttan daha büyük boyuta veya hasara karşılık gelen kritik boyuta yayılmasında harcanan ömrün tahmin edilmesini sağlamaktadır [25].

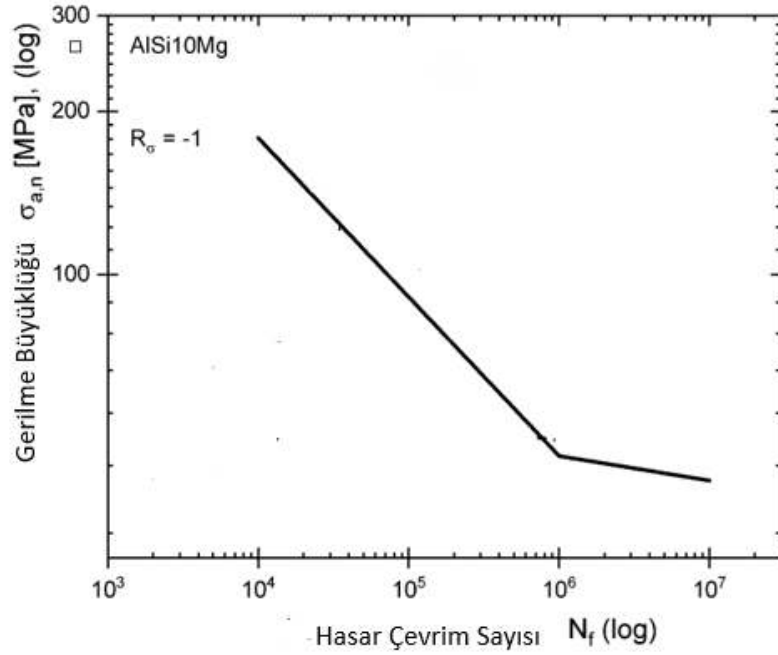
Geleneksel olarak, bir malzemenin yorulma altındaki davranışı S-N (veya $\sigma - N$) eğrileriyle tanımlanır (Şekil 2.14), burada S (veya σ) gerilmedir ve N, arızaya kadar olan çevrim sayısıdır. Böyle bir S-N eğrisine, 1860'larda demiryolu arabası tekerleklerinde bu tür bir yorulma davranışını ilk kez gözlemleyen Alman mühendis Wöhler'in ardından, genellikle Wöhler eğrisi adı verilmektedir [25]. Wöhler eğrisinin gerçek ve logaritmik ölçekteki pratik çizimi şekil 2.15'te gösterilmektedir [26]. 10^3 çevrim sayısından düşük çevrim sayıları düşük devirli yorulma (statik) olarak ifade edilirken, 10^3 çevrim sayısından büyük çevrim sayıları, yüksek devirli yorulmayı ifade etmektedir. 10^6 döngü, dayanıklılık limitini veya yorulma limitini tanımlamaktadır [1].



Şekil 2. 14. Gerilme Genliği – Ömür grafiği [25]



Şekil 2. 15. Wöhler Eğrisinin logaritmik ölçekte pratik çizimi [26]



Şekil 2. 16. AlSi10Mg alaşımına ait gerilme-ömür grafiği [27]

10^3 ve 10^6 aralığındaki ömür sayısı değerlendirildiğinde ömür denklemi Şekil 2.16'daki gerilme ömür grafiğine göre üçgenlerde benzerlik metoduyla aşağıdaki gibi elde edilebilir [26].

$$\frac{0,9\sigma_k - \sigma_g}{0,9\sigma_k - (\sigma_D)} = \frac{\log N - \log 10^3}{\log 10^6 - \log 10^3} \quad (2.3)$$

$$\log N = 3 + 3 \left(\frac{0,9\sigma_k - \sigma_g}{0,9\sigma_k - \sigma_D} \right) \quad (2.4)$$

Burada laboratuvar çubuğu üzerine etki eden gerilme değerini σ_g değeri, kullanılan malzemenin kopma gerilmesi değerini σ_k değeri, σ_D değeri sürekli mukavemet değerini, uygulanan gerilme genliğinde meydana gelen ömür değerini is N ifade etmektedir. Parça üzerine gelen gerçek gerilme değeri, parçanın üzerine etki eden gerilme değerinin boyut, yüzey ve çentik faktörleriyle çarpılması ile elde edilmektedir [26].

$$[\sigma_g]_{gerçek} = \frac{K_\xi}{K_b \cdot K_y} \cdot \sigma_g \quad (2.5)$$

2.3 Yüksek Basıncılı Döküm

Otomobil hafifliğinin ana yolu, demir-çelik parçalar yerine alüminyum parçaların veya komponentlerinin kullanılması ile sağlanmaktadır. Yüksek basınçlı döküm yöntemi, parçaları şekillendirmek için kullanılan en popüler döküm yöntemlerinden biridir.

Basıncılı döküm, büyük hacimli döküm baskı türüne yönelik artan ihtiyaca yanıt olarak 1820'lerin başlarında ortaya çıkmıştır. Metalik kalıplara basınç altında metal enjeksiyonu ilk başta el krankları kullanılarak tamamen mekanik olarak uygulanmıştır. Daha sonra, uygulamalar bisiklet, pikap ve tüketici dayanıklı parçaları içerecek şekilde büyüdükçe pnömatik ve hidrolik sistemler kullanılmıştır. 1870 yılına gelindiğinde, kalıp döküm makineleri şaşırtıcı derecede otomasyonla kurşun ve diğer düşük sıcaklık metalleri üretmiştir. Basıncılı döküm alüminyumdaki ilerleme, 1920'lerde soğuk hazneli basınçlı döküm işleminin gelişmesine kadar sınırlı olarak kalmıştır [28].

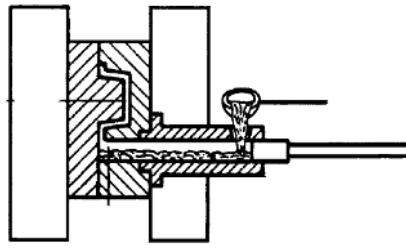
Basıncılı döküm, erimiş alaşımın metal bir kalıba döküldüğü ve basınca tabi tutulduğu süreci tanımlamaktadır. Bu, aşağıdaki etkileri sağlamaktadır [29]:

- Kalıp boşluğunun çok hızlı ve iyi şekilde doldurulması,
- Katılaşma çekintisinin beslenmesi,
- İnce taneli kristal yapı,
- Karmaşık biçimli küçük parçaların dökülebilmesi,
- İnce cidarlı yapıda parçalar üretilebilmesi

Genellikle metal enjeksiyon olarak bilinen yüksek basınçlı dökümde, erimiş alaşım, yüksek hassasiyette bölünmüş bir metal kalıba basınç altında enjekte edilmektedir. Alüminyum alaşımları için en yaygın kullanılan döküm işlemidir. Üretim oranları hızlıdır, süreç yüksek oranda otomatikleştirilebilir ve boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi mükemmeldir. İnce cidarlı bileşenler mümkündür ve

delikler, oluklar ve girintiler dökülebildiği için döküm parçada çok az veya hiç işlemeye gerek yoktur [30].

Alüminyum alaşımları soğuk kamaralı basınçlı döküm makinelerinde dökülmektedir. Kalıp, genellikle metalin enjekte edildiği iki çekirdekten oluşan takım çeliğinden yapılmaktadır. Kalıp çekirdekleri kapatıldıktan sonra yüksek enjeksiyon basıncına dayanmak için hidrolik olarak birbirine kilitlenmektedir. Ergimiş metal kovana verildikten sonra çelik bir piston 100 MPa'ya (1000 bar) kadar bir basınç altında sıvı metali kalıp boşluğuna enjekte etmektedir. Şekil 2.17 soğuk kamaralı basınçlı döküm mekanizmasını göstermektedir [30].

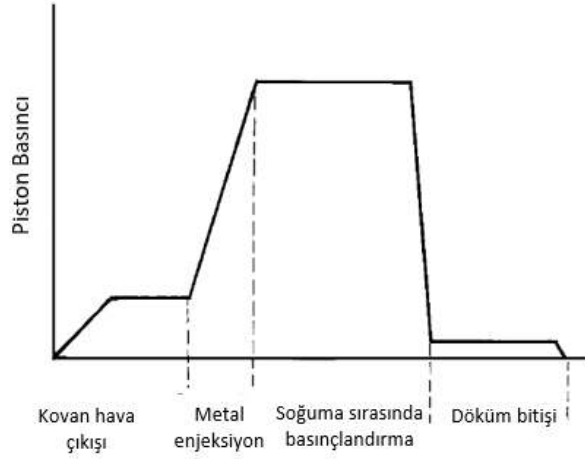


Şekil 2. 17. Soğuk Kamaralı Basınçlı Alüminyum Döküm [30]

Kalıp doldurma süreleri çok kısadır, 3–4 mm et kalınlığına sahip dökümler 0,1 saniyeden daha kısa sürede doldurulmaktadır. Metal, su soğutmalı kalıpla iyi termal temas nedeniyle hızla katılaşır ve bitmiş dökümü çıkarmak için kalıp çekirdekleri açılır, daha sonra işlem tekrarlanmaktadır. Çevrim süreleri, parçaların boyutuna ve kesit kalınlığına bağlı olarak değişmektedir [30].

Şekil 2.17'de gösterilen basınçlı döküm işleminde üç aşama vardır [30]:

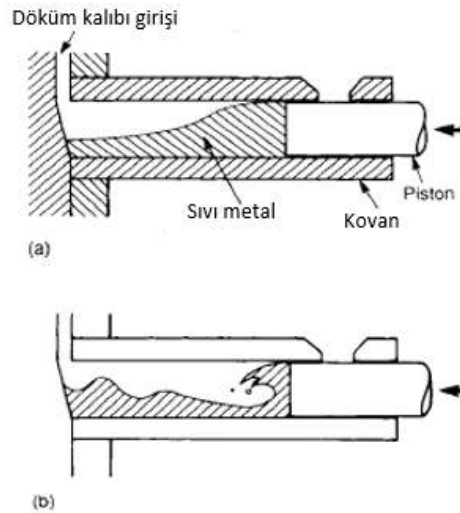
- 1- Kovanın dolumu
- 2- Kalıbın doldurulması
- 3- Soğuma sırasında basınç uygulanması



Şekil 2. 18. Basınçlı Döküm İşlemi [30]

Son yıllarda bu aşamaların hassas bir şekilde kontrol edilmesiyle pres dökümlerin iç kalitesi artmıştır. 0,1 saniye kadar kısa kalıp doldurma süreleri ile, metal akış hızları çok yüksektir (yaklaşık 50 m / sn) [30].

Piston hızının kontrolü, kovandaki türbülansı azaltabilir ve bu sayede hava hapsolmesini azaltır ve döküm gözenekliliğini iyileştirir, şekil 2.19’da enjeksiyonun kontrollü ve kontrolsüz ilk aşamalarını karşılaştıran, soğuk kamaralı bir pres döküm kovanındaki enjeksiyonu gösterilmiştir [30].



Şekil 2. 19. Enjeksiyonun kontrollü (a) ve kontrolsüz (b) ilk aşamalarını karşılaştıran, soğuk kamaralı bir pres döküm kovanındaki enjeksiyonu [30]

Enjeksiyon strokunun basınç profilini kontrol etmek, kalıp dolumu bitmeden pistonu yavaşlatarak strok sonunda hidrolik darbeyi azaltırken kalıbın hızlı bir şekilde doldurulmasını sağlamaktadır. Bu durum çapağı azaltmakta ve dökümün boyutsal doğruluğunu artırmaktadır. Maksimum basınç uygulaması katılaşma başlayana kadar ertelenerek, ardından kalan sıvı metal üzerinde çapak oluşumuna neden olmadan mümkün olduğunca yüksek bir basınç sağlamak için basınç uygulanmaktadır. Piston hızını ve basıncını ölçen dönüştürücüler, hızlı, gerçek zamanlı elektronik kontrol sistemleri aracılığıyla doldurmanın üç aşamasını hassas bir şekilde kontrol etmek için kullanılmaktadır [30].

2.4 Alüminyum Alaşımları

Otomotiv sektöründe artan güvenlik standartları nedeniyle, yeni nesil araçların gövde yapısının daha iyi yapısal bütünlüğe ve çarpışma sırasında enerji yutma kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda yeni çevre kuralları nedeniyle karbon salınımının da daha düşük olması gerekmektedir. Motor ve şanzıman verimliliği, araç ağırlığı, aerodinamik ve yuvarlanma direnci, karbon emisyonlarını ve yakıt tüketimini etkileyen temel faktörlerdir. Bir arabanın 100 kg ağırlık tasarrufu, km başına 9 gram CO₂ tasarrufu sağlayabilmektedir. Bu nedenle, CO₂ emisyonunu azaltmak ve aynı zamanda performansı, sürüş kalitesini ve en önemlisi güvenliği korumak için en etkili önlemler olduğundan, araç ağırlığının azaltılması zorunludur [31]. Otomotiv yapısı tam araç ağırlığının yaklaşık% 40'ına sahip olduğundan, gövde yapısındaki ağırlık azaltımı, yakıt verimliliği, zararlı emisyon azaltımı ve hammadde tasarrufu sağlamanın önemli bir yoludur [32].

Çeşitli tasarım metodolojileri, alüminyum, magnezyum, kompozitler gibi yenilikçi malzeme seçenekleri ve doğru malzemelerin seçilmesi, araç gövde ağırlığının azaltılmasında en önemli etkidir. Alüminyum, maliyet, talaşlı imalat, korozyona olan direnci ve geri dönüşüm avantajları ve yaygın kullanımıyla otomotiv endüstrisinde kullanılacak malzemelerin başında gelmektedir [33].

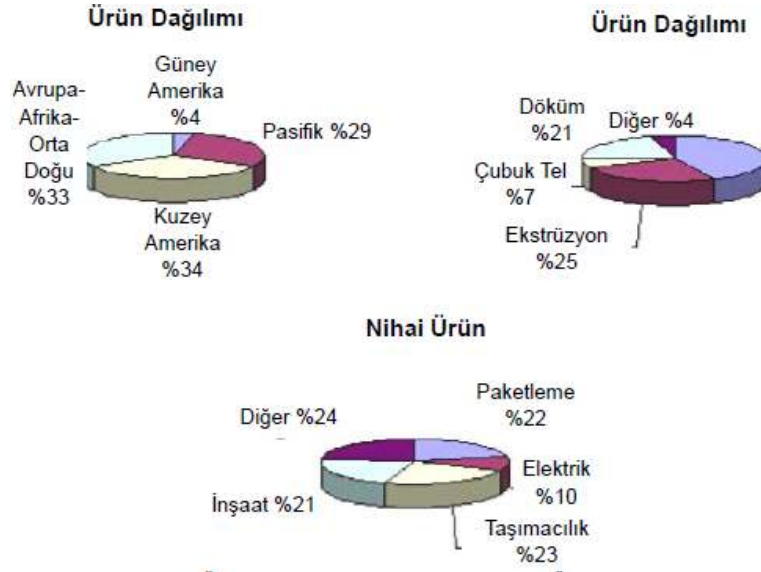
Alüminyum, demir-çelik malzemelerden sonra çağımızın en yaygın kullanılan ikinci metalidir. Mekanik özelliklerinin üstünlüğü nedeniyle, alüminyum birçok uygulamada ideal ve ekonomik bir malzeme olarak tercih edilmektedir. Alüminyumun

metalik özellikleri, hafifliği, yüksek mukavemeti, korozyona dayanıklılığı, ısı ve elektrik iletimi gibi özelliklerini içerir. Bu özellikler, alüminyumun otomotiv, havacılık, yapı, ambalaj ve elektronik gibi çeşitli endüstrilerde geniş bir kullanım alanı bulmasını sağlar. Ayrıca, alüminyumun geri dönüştürülebilir olması ve düşük karbon ayak izi gibi çevresel avantajları da onu tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir [33].

Alüminyumun aşağıdaki özellikleri, kullanımının hızla yaygınlaşmasına ve 21. yüzyılda damgasını vuran bir metal olmasına neden olmuştur [34]. Şekil 2.20’de alüminyum ürünün dünyadaki bölgesel dağılımı, ürün dağılımı ve nihai ürün olarak sınıflandırılması gösterilmiştir [33].

- Uygun mekanik özelliklerle birlikte düşük ağırlık: Alüminyum, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerine sahiptir. Bu sayede, alüminyum malzemelerin kullanılmasıyla hafif ve dayanıklı yapılar tasarlanabilir.
- Korozyona karşı dayanım: Alüminyum, doğal olarak koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak korozyona karşı dayanıklıdır. Bu özelliği sayesinde, açık hava koşullarında veya nemli ortamlarda dahi uzun ömürlü ve dayanıklı yapılar inşa edilebilir.
- Çeşitli alaşımların sağlamlık ve yumuşaklık açısından çeşitlilik göstermesi: Alüminyum alaşımları, farklı metallerin eklenmesiyle elde edilir ve bu sayede istenilen mekanik özelliklere sahip malzemeler üretilir. Bu çeşitlilik, farklı uygulama alanlarına uygun malzemelerin seçilmesini sağlar.
- Koku ve kimyasallara karşı dayanım ve hijyenik koşullar: Alüminyum, kokusuz ve kimyasal olarak inert bir metaldir. Bu özelliği sayesinde, gıda ve ilaç endüstrisinde hijyenik koşulları sağlayan ambalaj malzemeleri olarak tercih edilir.

- Uygulanan enerjiyi barındırma yeteneği: Alüminyum, yüksek ısı ve elektrik iletim kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, elektrik kabloları, ısı değiştiricileri ve enerji iletim hatları gibi alanlarda etkin bir şekilde kullanılabilir.
- Geri dönüşebilir olması: Alüminyum, geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Bu özelliği sayesinde, atık alüminyum malzemelerin yeniden kullanılmasıyla enerji ve kaynak tasarrufu sağlanır ve çevresel etkiler azaltılır.
- Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği: Alüminyum, elektriksel ve termal iletkenliği yüksek olan bir metaldir. Bu özellikleri, elektrikli cihazların ve ısı transfer sistemlerinin etkin bir şekilde çalışmasını sağlar.
- Parlama ve alev almazlık: Alüminyum, yüksek yanma sıcaklığına sahip olduğu için parlamaz ve alev almaz özellik gösterir. Bu özelliği, yangın güvenliği açısından önemli bir avantaj sağlar.
- Magnetik nötralite: Alüminyum, magnetik olarak nötr bir metaldir. Bu özelliği, manyetik alanda kullanılan cihazlar için etkileşimleri minimize eder.
- Kolay işlenebilme ve biçimlendirilebilme: Alüminyum, dövme, haddeleme, ekstrüzyon ve kaynak gibi işlemlerle kolaylıkla şekillendirilebilir ve işlenebilir. Bu özelliği, farklı tasarımların ve karmaşık şekillerin elde edilmesini sağlar.
- Çok farklı yöntemlerle yüzey işlemleri: Alüminyumun yüzeyi, anodizasyon, elektrolitik kaplama, boyama gibi çeşitli işlemlerle korunabilir ve estetik açıdan çeşitli seçenekler sunar. Bu sayede, alüminyum malzemelerin estetik görünümü ve dayanıklılığı artırılabilir.



Şekil 2. 20. Alüminyum Ürünün Dünyadaki Bölgesel Dağılım, Ürün Dağılımı ve Nihai Ürün Olarak Sınıflandırılması [33]

Alüminyum alaşımları, mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini alaşım elementlerine ve mikroyapısına bağlı olarak değiştirir. Alüminyum alaşımlarına katılan en önemli alaşım elementleri arasında silisyum, bakır, magnezyum, mangan ve çinko bulunur.

2.4.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları imal şekillerine göre dövme ve döküm olmak üzere iki ana alt gruba ayrılmaktadır. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımları, farklı mikroyapı ve kimyasal bileşime sahiptirler. Dövme alüminyum alaşımları külçe veya kütük halinde dökülür, daha sonra haddeleme, ekstrüzyon veya dövme ile nihai ürünlere dönüştürülür, döküm alaşımları ise ergitme işlemi sonrası üretilecek parça şekline sahip kalıba dökülür ve sonrasında katılaştırılır [35].

Dövme yöntemi ile çeşit ürünlerde döküm yöntemi ile türlerine nazaran daha bir içyapı oluşmaktadır. İçyapıda bulunan süreksizlikler plastik deformasyon ile giderilmektedir. Döküm yöntemi ile yapılan üretimlerde ise içyapıda bulunan süreksizlikleri gidermek ve istenilen yapının elde edilmesi amacı ile bazı önlemler ve işlemler gereklidir, mekanik özellikleri iyileştirme amacıyla döküm alaşımlarının bazıları ısıtılma işlemi prosesine tabi tutulmaktadır [35].

Alüminyum Birliği'nin dövme alüminyum alaşımları için kullandığı sınıflandırma sistemi, dört numara ile temsil edilir ve bazı alaşımlar için numaraların ön veya arkasına harfler eklenir. İlk rakam alüminyum serisinde kullanılan alaşım grubunu belirtir. İkinci rakam alaşım içindeki ana alaşımın kullanım miktarındaki değişimi gösterir. Orijinal kompozisyonda bu rakam her zaman sıfır (0) olurken, bir sonraki kullanım yüzdesi için bu değer bir (1) veya iki (2) gibi rakamlarla temsil edilir. Üçüncü rakam ise ana alaşımın kompozisyon içindeki kullanım miktarındaki değişimi ifade eder. Örneğin, ikinci rakamın sıfır olduğu durumlarda işlem görmemiş alüminyum ana alaşımında kabul edilen katkı miktarı yüksek seviyededir. Özel performans değerlerini sağlamak amacıyla katkı miktarını azaltmak için belirli prosesler veya eklemeler sonrası oluşturulan alaşımlarda ise sıfır yerine bir ile dokuz arasında bir rakam kullanılır.

1xxx serisi alaşımlarında, üçüncü ve dördüncü rakamlar kompozisyon içerisinde bulunan alüminyum oranı hakkında bilgi vermektedir. Örneğin 1060 alaşım serisinin kompozisyonunda minimum %99,60 oranında Al bulunduğunu belirtir.

Amerikan Alüminyum Birliği'ne göre, alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırması şu şekildedir [36]:

1XXX: Saf alüminyum. 1xxx serisi alaşımların kompozisyonunda 99.00% veya daha fazla oranda alüminyum bulunur. Serinin son iki rakamı, kompozisyonundaki minimum alüminyum yüzdesini belirtir. 1xxx serisi alaşımlar, ısıtılma işlemi vermezler ve bu nedenle ısıtılma işlemi uygulanmaz. Bunun yerine, plastik şekillendirme ve soğuk işlemle sertleştirme sağlanabilir, böylece sertlik ve mukavemet artırılabilir. Ancak, sertleştirme sonrası bile düşük mukavemet değerlerine sahiptirler. Öne çıkan özellikleri arasında kolay şekillendirilebilirlik ve yüksek süneklik değerleri bulunur. Bu nedenle genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde tercih edilirler.

2XXX: Al-Cu alaşımları. 2xxx serisi alaşımların esas alaşım elementi bakırdır. Bunun yanı sıra magnezyum gibi diğer alaşım elementleri de bulunabilir. Bu alaşımlar, çökeltme prosesinde bakırın alüminyum fazı içerisinde çözünme yeteneğine sahip olması nedeniyle ısıtılma işlemi prosesine son derece uygundur. Bu özellikleri sayesinde

yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir. Bu sebeple havacılık sektöründe yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda sıkça tercih edilir.

3XXX: Al-Mn alaşımları. Esas alaşım elementi mangandır. Bu alaşımlar, ısıtılma işlemi prosesine yanıt vermezler, ancak plastik şekillendirme ile mukavemet kazandırılabilirler. Ayrıca yüksek korozyon direncine sahiptirler. Bu özellikleri nedeniyle genellikle yüksek korozyon direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Ayrıca bu alaşımların kaynak kabiliyeti oldukça iyidir. 3xxx serisi alaşımlar genellikle boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılır.

4XXX: Al-Si alaşımları. Esas alaşım elementi silisyumdur. Bu alaşımların termal genişleme katsayısı düşüktür ve aşınma direnci ile korozyon dayanımı yüksektir. Genellikle kaynaklı yapılar, levha üretimi ve otomobil parçaları gibi uygulamalarda kullanılırlar. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilen malzemeler arasındadır.

5XXX: Al-Mg alaşımları. Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranının artmasıyla sertlik ve mukavemet artar, ancak süneklik azalır. Bu alaşımların enerji emilimi kabiliyetleri yüksektir. Ayrıca, denizel korozyona karşı dirençleri yüksektir, bu nedenle deniz ortamlarında kullanılan yapıların imalatında tercih edilirler. Bu alaşımlar, deniz araçları, gemi parçaları, deniz platformları ve diğer suya maruz kalan uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

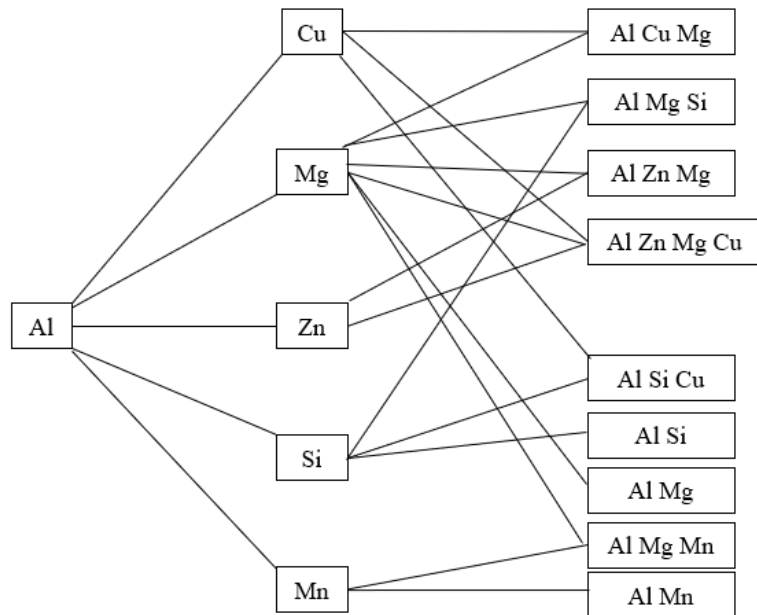
6XXX: Al-Mg-Si alaşımları. Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Bu alaşımların kompozisyonunda Mg_2Si fazı bulunur ve çökelme sertleşme kabiliyetleri çok iyidir. Bu nedenle ısıtılma işlemi sonrasında yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir. Yüksek şekillendirme kabiliyetine sahip olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon yöntemiyle üretilen parçaların imalatında sıklıkla tercih edilir. Bu alaşımlar otomotiv sektöründe, inşaat malzemeleri, elektrik iletim hatları, boru sistemleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır.

7XXX: Al-Zn alaşımlar. Bu seride esas alaşım elementi bakırdır ve magnezyum, krom ve zirkonyum gibi ek alaşım elementleri bulunabilir. 7xxx serisi, alüminyum alaşımları arasında en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Bu alaşımlar özellikle uçak

parçalarının yapımı ve diğer yüksek dayanım gerektiren alanlarda tercih edilir. Yüksek mukavemetleri ve hafiflikleri nedeniyle havacılık endüstrisinde önemli bir rol oynamaktadır. Aynı zamanda roketler, uzay araçları, spor ekipmanları gibi birçok uygulamada da kullanılmaktadır.

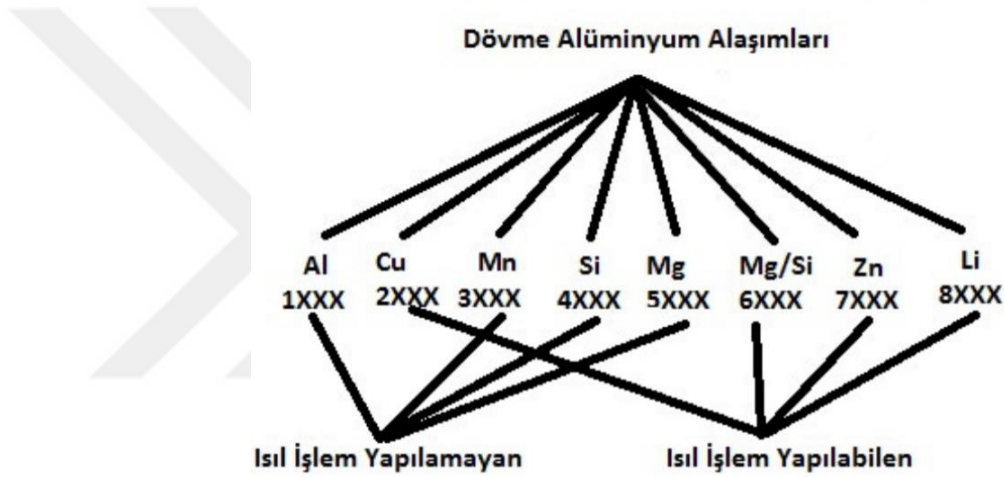
8XXX: Al-Li alaşımları: Bu seride esas alaşım elementi lityumdur ve bazen kalay da eklenir. Al-Li alaşımları özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk gibi özelliklere sahiptir. Bu nedenle havacılık ve uzay endüstrisinde hafiflik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak, diğer alüminyum alaşımlarına göre üretim maliyetleri daha yüksek olabilir. Al-Li alaşımlarının avantajları ve özel özellikleri, özellikle hava araçlarındaki performans ve yakıt verimliliği gibi faktörlerin önemli olduğu alanlarda tercih edilmelerini sağlamaktadır.

Şekil 2.21’de alüminyumun alaşım elementeriyle çeşitli kombinasyonlarda yapılan alaşımları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 21. Alüminyumun alaşım elementeriyle çeşitli kombinasyonlarda yapılan alaşımlarının şematik gösterimi [37]

1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx serisi alüminyum alaşımları ısıtıl işlem uygulanamayan alaşımlardır. Bu serilerdeki alaşımlar sadece plastik deformasyon yoluyla şekil değıştirme ile sertleştirilebilirler. Isıl işlem uygulandığında bu alaşımların özellikleri değışmez veya istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Diğer yandan, 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx serisi alüminyum alaşımları ısıtıl işlem ile sertleştirilebilirler. Bu serilerdeki alaşımlar, belirli bir ısıtıl işlem prosesi olan çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleriyle istenen mukavemet ve sertlik özelliklerine ulaşabilirler. Bu işlemler alaşımın mikro yapısında değışikliklere neden olur ve mukavemetin artmasını sağlar. Isıl işlem uygulanabilirliğine göre dövme alaşımları şekil 2.22’de şematik olarak gösterilmiştir [36].



Şekil 2. 22. Isıl işlem uygulanabilirliğine göre dövme alaşımları [36]

Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum döküm alaşımları aşağıdaki harflendirme ile sınıflandırılmaktadır [36].

1XX.X: Saf alüminyum. Bu serideki alaşımlar genellikle %99 veya daha fazla alüminyum içerir.

2XX.X: Esas alaşım elementi bakırdır. Bu serideki alaşımların bazıları bakır ile diğer alaşım elementlerini içerebilir.

3XX.X: Esas alaşım elementi silisyumdur. Bu serideki alaşımlar silisyumun yanı sıra bakır, magnezyum gibi diğer alaşım elementlerini içerebilir. Bu serideki alaşımlar özellikle döküm uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.

4XX.X: Esas alaşım elementi silisyumdur. Bu serideki alaşımlar genellikle daha yüksek silisyum içeriğine sahip ve döküm uygulamaları için kullanılır.

5XX.X: Esas alaşım elementi magnezyumdur. Bu serideki alaşımlar magnezyumun yanı sıra diğer alaşım elementlerini içerebilir. Deniz suyu gibi korozyona maruz kalan ortamlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

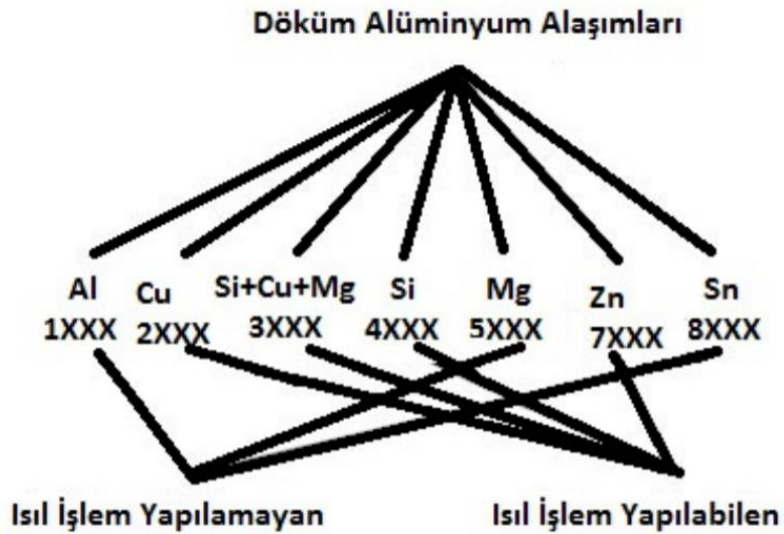
6XX.X: Bu seri numarası genellikle kullanılmaz ve boş bırakılır.

7XX.X: Esas alaşım elementi çinkodur. Bu serideki alaşımlar çinko ile diğer alaşım elementlerini içerebilir.

8XX.X: Esas alaşım elementi kalaydır. Bu serideki alaşımlar genellikle kalay ile diğer alaşım elementlerini içerir.

2.4.2 Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem

Isıl işlem uygulanabilirliğine göre döküm alaşımları şekil 2.23’de şematik olarak gösterilmiştir [36].



şekil 2. 23. Isıl işlem uygulanabilirliğine göre döküm alaşımları [36]

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları, istenilen dayanımı elde etmek için çeşitli ısı işlem prosesleri kullanılarak sertleştirilebilir. Bu ısı işlem prosesleri, alaşımın i yapısındaki klmelerin kontrol edilmesi ve dağılımının sağlanmasıyla mukavemetin artmasını sağlar. Öte yandan, ısı işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları, çökelme sertleştirmesi ile glendirilemez. Bu tür alaşımların dayanımı

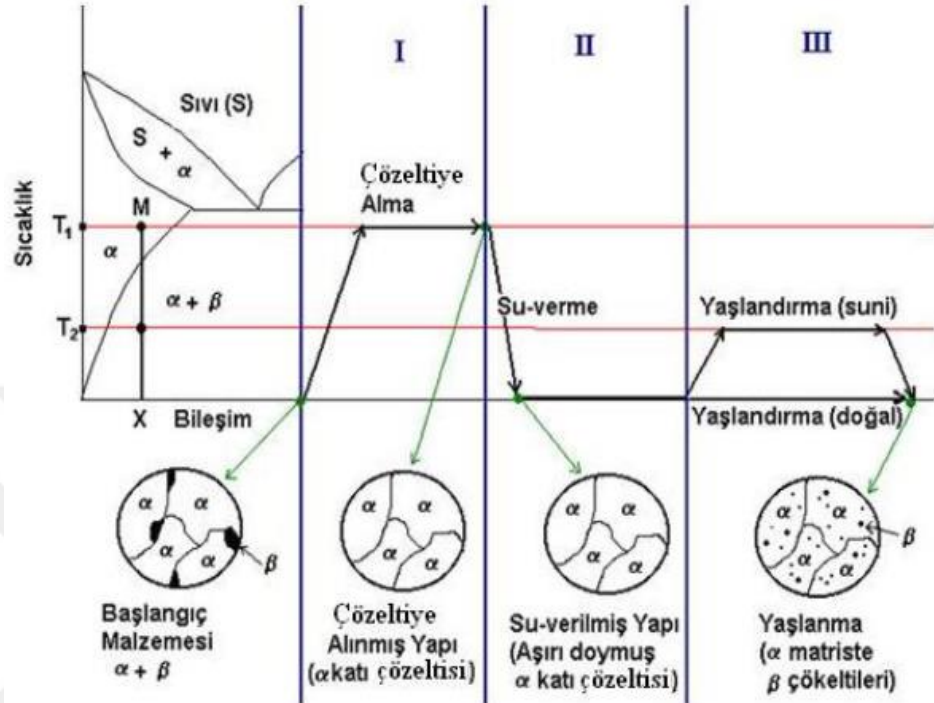
genellikle soğuk işleme yöntemleriyle artırılır. Soğuk işleme, alaşımın plastik deformasyona uğratılmasıyla gerçekleşir ve kristal yapıda yoğun çökelmelerin oluşmasına neden olur. Böylece alaşımın mukavemeti ve sertliği artar. Bazı ısıtıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarında ise katı eriyik mukavemetlendirmesi, ve pekleşme mukavemetlendirmesi gibi yöntemlerle güçlendirme yapılır. Bu yöntemler, alaşım içindeki fazların kontrolü, dislokasyonların engellenmesi ve partikül takviyesi gibi mekanizmaları içerir. [33].

Alüminyum alaşımları için temper seri numaralarının tanımları tablo 2.3'te tanımlanmıştır.

Tablo 2. 3. Alüminyum alaşımları temper seri numaralarının tanımları [33]

Temper Kodu	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
O	Tavlanmış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder)
H12	Soğuk şekillendirme, 0 ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H14	Soğuk şekillendirme, 0 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H18	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar
H19	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
H2X	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
W	Çözeltili ısıtıl işlemi görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözeltili ısıtıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T4	Çözeltili ısıtıl işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltili ısıtıl işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarında yaşlanma ısıl işlemi, genel olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu adımlar; solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma adımlarıdır. Şekil 2.25'te bu adımlar gösterilmektedir [38].



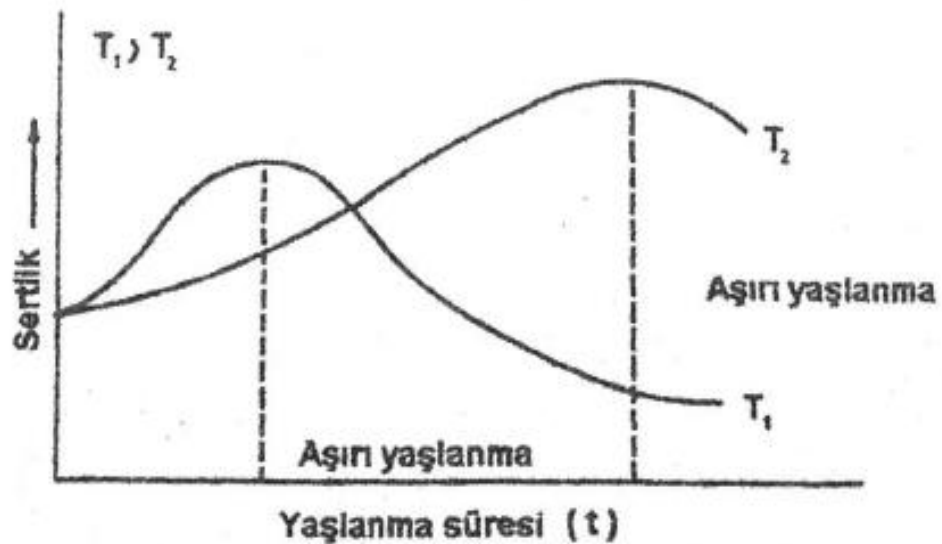
Şekil 2. 25. Çöktürme sertleşmesinin uygulama adımları [38]

Şekil 2.24 ve şekil 2.25 birlikte değerlendirildiğinde, öncelikle; C1 bileşimindeki α ve β fazları içeren alaşım, tek fazlı yapı elde etmek için T_1 sıcaklığına kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta β fazı tamamen çözülene kadar tutulur. Bu işlem şekil 2.25'te birinci ve ikinci oklar ile temsil edilmiş olan solüsyona alma işlemidir. Solüsyona alma işlemi çözme tavlaması veya homojenleştirme olarak da adlandırılabilir. Bu işlem sonrasında su verme işlemiyle alaşım oda sıcaklığına ani olarak soğutulur ve bu sıcaklıkta aşırı doymuş α katı eriyiği elde edilir. Bundan sonra alaşım kendi halinde oda sıcaklığında bırakılarak doğal yaşlandırmaya veya belirli bir sıcaklığa çıkılarak yapay yaşlandırmaya tabi tutulabilir. Bu yaşlanma aşamasında α katı çözeltisi içerisinde bulunan β fazının küçük tanecikler halinde çökmesi sağlanmış olur. Şekil 2.25'te görüldüğü gibi belirli bir sıcaklığa çıkılarak yapılan yapay yaşlandırma işlemi sürenin kısalmasını sağlamaktadır, fakat daha yüksek sıcaklıkta ve daha az sürede yapılan yaşlandırma işlemlerinin daha düşük sıcaklıkta ve

uzun sürelerde yapılan yaşlandırmaya göre mekanik özellikler üzerinde bazı küçük olumsuz etkileri mevcuttur [38].

Yaşlandırma işlemi sonrasında mukavemetin artmasının temeli dislokasyon hareketlerine dayanır. Yaşlandırma sonrası oluşan çökelti parçacıkları dislokasyon kaymasını engelleyerek alaşımın mukavemetinin artmasını sağlar [38].

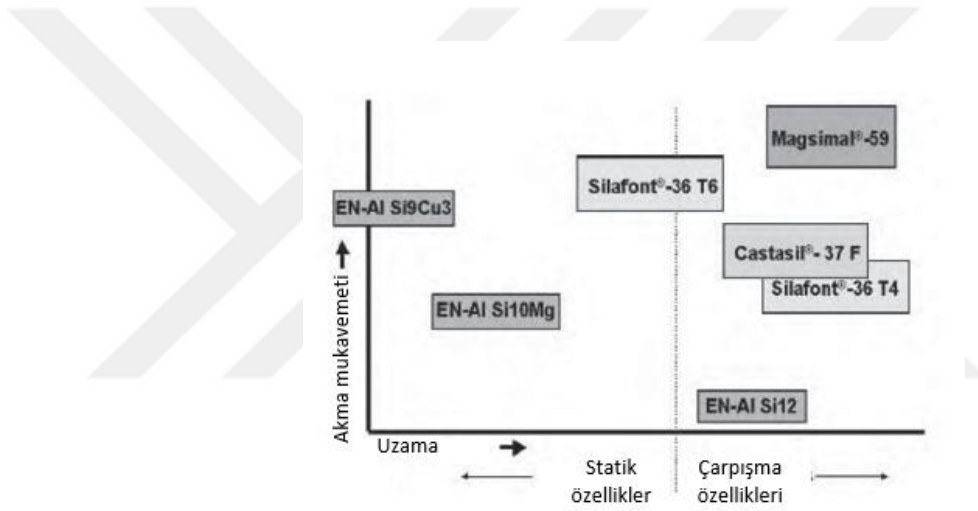
Yaşlanma aşamasının ilk evrelerinde oluşan çökelti boyutu çok küçük olduğu için dislokasyon hareketlerini etkilemeleri zordur ve dolayısıyla çökelti başlangıcında malzemenin sertliğinde veya mukavemetinde önemli bir değişiklik görülmez. Zaman etkisiyle artmaya başlayan çökelti boyutları dislokasyon hareketlerini daha çok güçlendirmeye başlar ve mukavemet miktarı belirgin düzeyde artar. Yaşlanma süresinin çok fazla uzatılması da aşırı yaşlanma olarak adlandırılan ve mukavemetin düşmesine sebep olan bir olaya sebep olur. Aşırı yaşlanma durumunda çökelti boyutu çok fazla büyümüştür ve çökelti sayısı azalmıştır, bu durum ters etki yaparak malzemenin mukavemetinde düşüş meydana getirir. Yaşlanma süresine bağlı olarak alaşım mukavemetinin değişimi ve aşırı yaşlanma durumu şekil 2.26'da görülmektedir [38].



Şekil 2. 26. Sabit sıcaklıkta yaşlanmanın süresine bağlı olarak alaşım mukavemetinin değişimi [38]

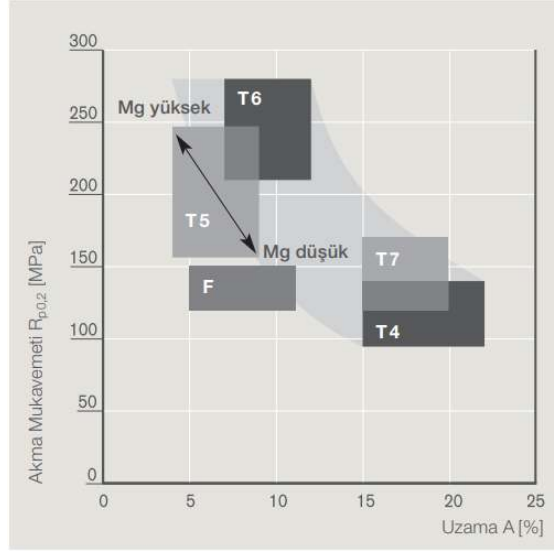
2.4.3 AlSi10MgMn Alaşımı ve Özellikleri

Otomotiv endüstrisi, yeni kalıp döküm alaşımlarının geliştirilmesi ve üretimi için itici güç sağlamıştır. Teknik açıdan, standart alüminyum alaşımlarının uygulama alanı sınırlıdır. Bu alaşımlar temel olarak basit bir gereksinim profiline sahip, genellikle düşük ağırlık ve belirli bir akma dayanımına sahip parçalar için kullanılır. Şekil 2.27'deki değerlendirme, standart alaşımların sınırlarını göstermektedir. AlSi9Cu3 tipi, yüksek basınçlı dökümde esas olarak süneklik veya korozyona karşı iyi dirençle ilgili herhangi bir gereksinimi olmayan parçalar için kullanılmaktadır. Bir AlSi12 alaşımı, bir kalıba döküldüğünde belirli bir süneklik sağlar, ancak kayda değer bir akma dayanımına sahip değildir [39].



Şekil 2. 27. Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklere göre sıralaması [39]

AlSi10MgMn ilk kez 1994 yılında yüksek basınçlı döküm için ilk sünek alüminyum alaşımı olarak sunulmuştur. Akma dayanımı ile uzama değerinin farklı ısıl işlemler ve magnezyum oranına göre değişimi şekil 2.28'de gösterilmektedir [40].



Şekil 2. 28. AlSi10MgMn alaşımında çeşitli ısıtım durumlarında ve magnezyum oranlarında akma dayanımı ve uzama [40]

AlSi10MgMn alaşımının sahip olduğu fiziksel özellikler ile standart yüksek basınçlı döküm alaşımlarına kıyasla özellikleri tablo 2.4'te gösterilmiştir. Şekil 2.29, 2.30, ve 2.31'de AlSi10MgMn ile üretilen bazı parçalar gösterilmiştir.

Tablo 2. 4. AlSi10MgMn ile diğer yüksek basınçlı döküm alaşımlarının karşılaştırılması [40]

Alaşım Tipi	AlSi10MnMg	AlSi10Mg(Fe)	AlSi9Cu3(Fe)
Isıl İşlem Uygulanabilirliği	çok iyi	iyi	orta
Sıcak Yırtılma Eğilimi	Düşük	Düşük	Düşük
Yapışma Eğilimi	Düşük	Düşük	Düşük
Kalıp Ömrü	>%80	>%80	100%
Lineer Çekinti	%0,4-0,6	%0,4-0,6	%0,4-0,6



Şekil 2. 29. AlSi10MgMn alaşımı ile dökümü yapılmış travers parçası [40]



Şekil 2. 30. AlSi10MgMn alaşımı ile dökümü yapılmış motor beşiği [40]



Şekil 2. 31. AlSi10MgMn alaşımı ile dökümü yapılmış direksiyon karteri [40]

AlSi10MgMn,% 99,8 saflıkta alüminyum metal esas alınarak üretilen, basınçlı döküm tipi stronsiyum içeren bir alaşımdır. Dar toleranslı alaşım elementleri, sürekli

olarak iyi döküm kalitesi sağlamaktadır. Stronsiyum, ötektik silikonun modifikasyonu için alaşıma dahil edilmektedir [40].

Yaklaşık % 10.5 silikon içeriği, iyi bir dökülebilirlik sağlamaktadır. Silikon fazının döküm halinde halihazırda ince bir şekilde dağılımını sağlamak için, alüminyum-silikon ötektik stronsiyum ilavesiyle modifiye edilmektedir. Bu, döküm halinde yüksek uzama değerlerine yol açmakta ve ayrıca sonraki ısı işlemler durumunda silikonun küreselleşmesine yardımcı olmaktadır [40].

Yüksek uzama değerlerini sağlayabilmek için, yapıda meydana gelen plaka tipi AlFeSi fazlarının payını olabildiğince düşük tutmak amacıyla alaşımda demir içeriği olabildiğince düşüktür. Bu fazlar, morfolojilerinden dolayı ve özellikle dinamik yüklerin varlığında çatlak oluşumunun başlangıç noktası olarak hareket ettikleri için düşük mukavemet ve uzama değerlerinin temel sebebidir [40].

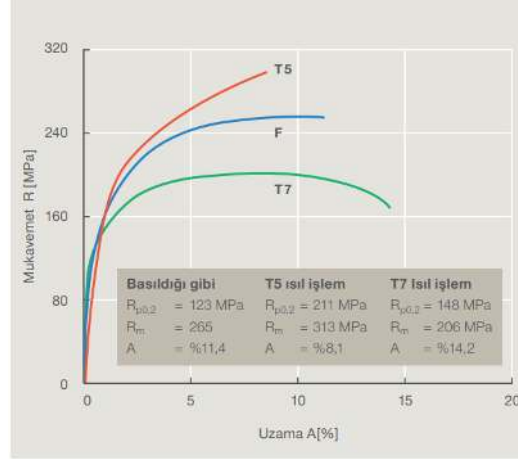
Döküm sırasında parçanın kalıba yapışma eğilimini azaltmak için mangan içeriği yaklaşık %0.65 olarak alaşımda bulunmaktadır. Manganez, kalıba yapışma eğiliminin azaltılması açısından demir ile aynı etkiye sahiptir. Bununla birlikte, demirin aksine, katılaşma sırasında oluşan çökeltiye yuvarlaktır ve sivri değildir [40].

AlSi10MgMn basınçlı döküm alaşımının gerekli süneklik ve mukavemeti, özellikle parçalar ısı işlem göreceksen, parçanın gereksinimlerini karşılamak için en uygun magnezyum içeriği ile ayarlanabilmektedir. Tablo 2.5 çeşitli magnezyum oranlarına göre döküm yapılacak parça kullanım alanlarını göstermektedir [40].

Tablo 2. 5. AlSi10MgMn alaşımı ile Mg oranlarının kullanım amaçları [40]

Mg Aralığı (%)	Kullanım amacı
0,13-0,19	Çarpışma ile ilgili parçalar için
0,18-0,28	Yorulma yüklerinin varlığında sert ve hatta çarpışma güvenlik parçaları için
0,24-0,35	Darbe gerilmesine karşı yüksek çalışma mukavemetine sahip parçalar için
0,28-0,35	Çözeltiye alma işleminden sonra hava verme ile ısı işlem görmüş parçalar için
0,35-0,45	Döküm, tavlanmış, T4 veya T6 ısı işlem görmüş dayanıma odaklı parçalar için

AlSiMg alaşımları arasındaki yüksek uzama, AlSi10MgMn alaşımının ayırt edici özelliğidir. Şekil 2.32, döküm halinde, T5 ısıt işlem görmüş ve T7 ısıt işlem görmüş durumda AlSi10MgMn için gerilme-gerinim eğrisini göstermektedir [40].



Şekil 2. 32. Döküm halinde, T5 ısıt işlem görmüş ve T7 ısıt işlem görmüş durumda AlSi10MgMn için gerilme-gerinim eğrisi [40]

Akma mukavemeti artan magnezyum içeriği ile armaktadır, fakat bu durumda uzama azalmaktadır. Yüksek akma mukavemeti gereken durumlarda, magnezyum içeriği bu nedenle alaşım standartlarının üst aralığında ayarlanmaktadır. Daha yüksek uzama gereken durumlarda ve akma mukavemeti önemli bir rol oynamıyorsa, %0.15'lik düşük bir magnezyum içeriği tercih edilmektedir. Tablo 2.6'da çeşitli magnezyum içerikleri için mekanik özellikler gösterilmektedir [40].

Tablo 2. 6. Çeşitli magnezyum oranlarına göre mekanik özellikler [40]

Mg Oranı (%)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
0,15	117	250	11,2
0,28	121	264	10,2
0,3	133	279	8,1
0,33	141	261	6,3
0,42	146	286	5,8

Bu sayede, döküm halinde çok çeşitli mekanik özellikler sağlanabilmektedir. %0.5'in üzerindeki magnezyum içerikleri, Mg_2Si fazı olarak çökeldiğinden ve alüminyum katı çözeltisinin sertleşmesine daha fazla katkıda bulunamadığından, akma mukavemetinde daha fazla artış sağlamamaktadır [40].

AlSi10MgMn alaşımının mekanik özellikleri, çeşitli magnezyum içeriklerinin yanı sıra ısıtıl işlem uygulamaları ile de sağlanabilmektedir. Isıl işlem durumunda çözeltiye alarak veya çözeltiye almadan olmak üzere iki yöntem bulunmaktadır [40].

Çözeltiye almadan;

- O: Düşük sıcaklıkta tavlınmış
- T5: Kalıptan çıkarıldıktan hemen sonra su verildikten sonra yapay olarak yaşlandırılmış

Ötektik silikonun istenen küreselleşmesi amacıyla çözeltiye alarak;

- T4: Çözelti, su verilmiş, doğal olarak 6 günden fazla yaşlandırılmış
- T6: Çözelti, su verilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış
- T7: Çözelti, su verilmiş ve aşırı yaşlandırılmış

Çözeltiye almadan yapılan ısıtıl işlemler:

O: Düşük sıcaklıkta tavlınmış

Bu ısıtıl işlem yönteminde akma mukavemetinde veya uzamada hafif bir artış, dökümde çarpılma riski olmadan elde edilebilmektedir. Bu işlem için iki farklı değişken tanımlanmaktadır:

- O (I): daha düşük sıcaklıkta tavlınmış (320 ° C / 30 - 60 dak.)
- O (II): daha yüksek sıcaklıkta tavlınmış (380 ° C / 30 - 60 dak.)

3 mm et kalınlığına ve O (I) tavisında %0,2 magnezyum içeriğine sahip ince numunelerde akma dayanımında %8-12 uzamayla 140 - 160 MPa'ya artış elde edilebilmektedir. O (II) tavisındaki özdeş numuneler, 100 - 130 MPa akma dayanımı ile % 12 - 16 uzama sağlamaktadır [40].

T5: Kalıptan çıkarıldıktan hemen sonra su verilip yapay olarak yaşlandırılmış

AlSi10MgMn + T5'in mekanik özellikleri, çeşitli döküm parçalarında iki farklı magnezyum içeriği için tablo 2.7 ve 2.8'de verilmiştir. T5 ısıtma işlemi sayesinde akma dayanımı, döküm durumuna kıyasla neredeyse 100 MPa artırılabilir. Uzama azalmamakta fakat % 5 ile 9 arasında kalmaktadır. Akma mukavemetindeki en yüksek artışlar, tablo 2.8'de görüldüğü gibi, döküm ve yaşlandırma arasında en az 10 saatlik depolama süresi varsa, %0,30'un üzerinde magnezyum içeren AlSi10MgMn ile elde edilmektedir.

Tablo 2. 7. %0,33 magnezyum içeriği olan AlSi10MgMn alaşımının T5 ısıtma işlemi sonrası mekanik özellikleri [40]

Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma Süresi (saat)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
170	3	193	290	4,5
170	4	199	295	4,8
170	6	206	300	5
200	0,5	193	290	5,7
200	1	200	297	5,6
220	0,5	199	293	5,8
250	0,5	180	268	3,5

Tablo 2. 8. %0,32 magnezyum içeriği olan AlSi10MgMn alaşımının 1 saat süreyle 200 ° C'de yaşlandırmadan önce farklı saklama sürelerine sahip T5 ısıtma işlemi sonrası mekanik özellikleri [40]

Bekletme Süresi (saat)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
1	207	307	6,9
10	233	324	6,6
72	232	324	6,8

Çözeltiliye alarak yapılan ısıtma işlemleri:

T4: Çözelti, su verilmiş, doğal olarak 6 günden fazla yaşlandırılmış

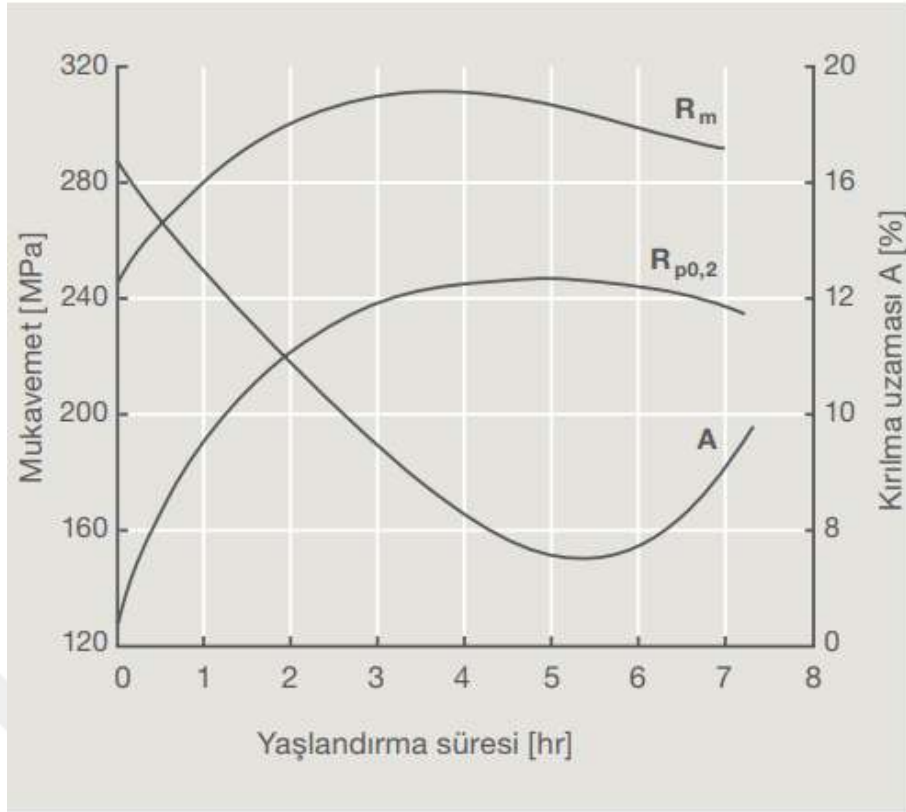
Tablo 2.9, çözeltiye alma (490 ° C / 3 saat) ve ardından su verme sonrası sağlanabilen mekanik özellikleri listelemektedir. Silisyumun küreselleşmesi ve bu şekilde elde edilen diğer metaller arası fazlar, magnezyum içeriğine bağlı olarak uzamada% 15 ve daha fazla bir artış sağlamaktadır [40].

Tablo 2. 9. AlSi10MgMn'nin magnezyum içeriğine bağlı olarak T4 ısıtım işlem sonrası mekanik özellikleri [40]

Mg Oranı (%)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
0,15	94	206	20,6
0,2	107	223	20,4
0,25	119	229	17,3
0,28	121	242	16,7
0,42	141	259	15

T6: Çözelti, su verilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış

T6 ısıtım işlem maksimum mukavemeti sağlamaktadır. Bu amaçla, alaşımın sertleşme potansiyelinden yararlanmak için basınçlı dökümde %0.3'ün üzerinde bir magnezyum içeriği hedeflenmektedir. Uzama, daha düşük değerlere ulaşmaktadır. Şekil 2.33,%0.3 magnezyum içeriği için yaşlanma süresi boyunca mekanik özellikleri grafiksel olarak göstermektedir. Maksimum mukavemet noktası, 240 MPa'lık bir akma mukavemetinde ve 310 MPa'lık maksimum çekme mukavemetindedir, ancak% 7.1'lik bir uzama sağlanabilmektedir.



Şekil 2. 33. Yaşlanma süresinin %0,3 magnezyum içeriğine sahip AlSi10MnMg'nin mekanik özelliklere etkisi (490 ° C'de 3 saat çözelti, su verme ve 170 ° C'de yaşlandırma) [40]

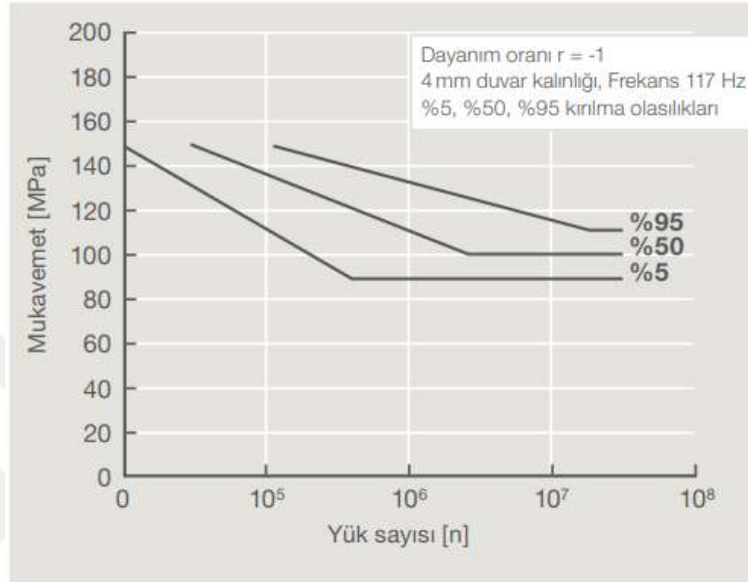
T7: Çözelti, su verilmiş ve aşırı yaşlandırılmış

Şekil 2.32'deki eğriler, uzamanın artan yaşlanma süresiyle, yani giderek daha fazla yaşlanmış durumda tekrar arttığını göstermektedir. Gerçek döküm numuneleriyle yapılan denemeler, hedeflenen ısıtma işlemleri ile %20'ye yaklaşan uzamaların elde edilebileceğini göstermiştir; akma dayanımı daha sonra 120 - 130 MPa değerlerine ulaşmaktadır [40].

Yüksek basınçlı dökümlerin bozulmasını en aza indirmek için çözelti işleminden sonra su yerine hava ile söndürme yapılmaktadır. 120 MPa'nın üzerinde akma mukavemeti, 170 ° C'lik sıcaklık seviyesinde 2 saat süreyle sonradan yaşlandırma gerçekleştirilirse, yalnızca% 0,3'lük bir magnezyum içeriği ile elde edilebilmektedir [40].

AlSi10MgMn alaşımında döküm sonrası 4 mm et kalınlığına sahip yüksek basınçlı döküm plakalar için yorulma mukavemetleri, Wöhler eğrilerine göre Şekil

2.33'de gösterilmektedir. Yorulma testleri, 117 Hz civarında bir frekansa sahip yüksek frekanslı bir titreşim üretici üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.34, bu test koşulları altında yorulma mukavemetinin 89 MPa'ya ulaştığını göstermektedir; bu, akma mukavemetinin yaklaşık % 66'sına eşit olmaktadır [40].



Şekil 2. 34. AlSi10MgMn alaşımı döküm sonrası Wohler eğrisi [40]

2.5. Alüminyum Alaşımlarında Yorulma

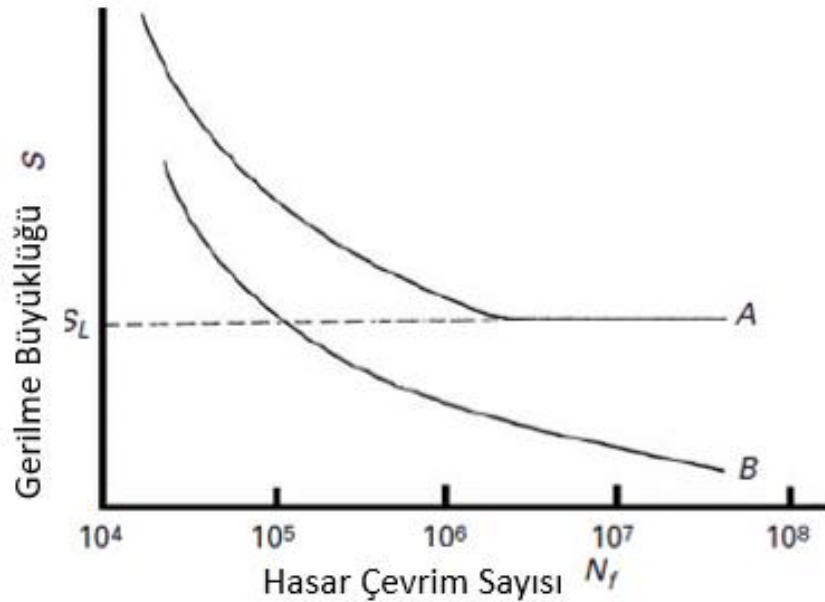
Alüminyum alaşımlarının yorulma performansı ve çalışma parametrelerinin yorulmaya etkisi, uygulamanın gereksinimlerini karşılamak için detaylı bir inceleme gerektirir. Bu inceleme, gerilme-ömür (S-N) verilerini içeren geniş bir veri tabanının oluşturulmasını gerektirebilir. Gerilme-ömür (S-N) verileri, belirli gerilme seviyelerinde alaşımın dayanıklılığını temsil eder. Bu veriler, alüminyum alaşımlarının farklı çalışma şartları altında yorulma davranışını değerlendirmek için kullanılır. Gerilme-ömür eğrileri, belirli gerilme düzeylerine maruz kalan alaşım parçalarının ömürlerini tahmin etmeye yardımcı olur.

S-N eğrileri, numune parçanın tekrarlı sabit yüklemelere maruz bırakılarak gerçekleştirilen yorulma testleriyle elde edilir. Bu testlerde, numune parçası belirli bir gerilme düzeyinde tekrarlı yüklemelere tabi tutulur ve yük miktarı ile çevrim sayısı

kaydedilir. Test süreci boyunca numune parçası üzerinde oluşan çatlakların gözlenmesi veya parçanın kopmasıyla test sonlandırılır. Bu noktada çevrim sayısı kaydedilir ve test sonucunda numunenin dayanıklılık davranışı belirlenmiş olur. Elde edilen yük ve çevrim değerleri, logaritmik bir grafiğe yansıtılarak S-N eğrisi oluşturulmaktadır.

Bazı malzemelerde, belirli bir gerilme düzeyinde parça test boyunca kopmadığı gözlemlenebilir. Bu durumda, yüksek çevrim değerlerinde S-N eğrisi yatay bir seyir gösterir ve malzemenin bu gerilme düzeyinin altındaki yüklemeler için sonsuz bir ömre sahip olduğu varsayılmaktadır.

Çelik malzemeler bu gruba girmekte olup S-N eğrisinde 10^6 çevrim sayısına karşılık gelen gerilme değeri yorulma sınırı olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte Şekil 2.35'te görüldüğü üzere çelikten farklı olarak alüminyum malzemede yorulma sınırı bulunmamaktadır. Bu sebeple alüminyum uygulamalarında parçaların değişken yüklere maruz bırakılarak yorulma davranışının incelenmesi, tasarım sürecinde önemli bir parametre haline gelmiştir.



Şekil 2. 35. Gerilme Genliği – Ömür grafiği [25]

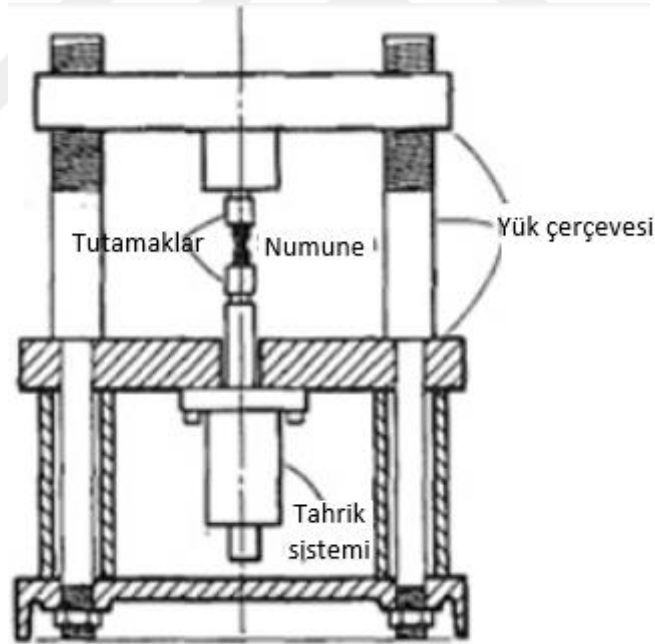
2.6. Yorulma Deney Türleri

Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine adını vermektedir. Gerilme türüne göre yorulma deneyleri başlıca dört ana başlıkta incelenmektedir [41].

2.6.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi

İçten yanmalı motorların bağlantı rotları gibi uygulamalarda, numuneye boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Bu gerilmeler, numunenin eni boyunca dağılır ve numunenin gerçek çalışma koşullarını taklit etmeye çalışır.

Eksenel gerilme yorulma test makinesi, bir test numunesini kesitinden tek tip bir gerilmeye veya gerinime maruz bırakır. Aynı kesit için, bir eksenel yorulma test makinesi, aynı gerilmeyi elde etmek için statik eğme makinesinden daha büyük bir kuvvet uygulaması gerekmektedir [41].



Şekil 2. 36. Eksenel gerilme yorulma test şeması [42]

2.6.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi

Bu deney türü kendi arasında iki tipe değerlendirilmektedir.

2.6.2.1. Düzlemsel Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi

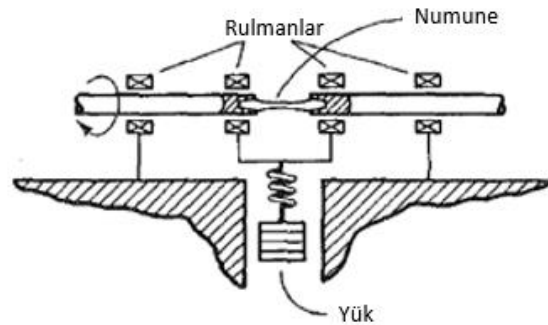
Bu yöntemde numune nötr bir düzleme (veya eksene) göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelerin oluştuğu en iyi örnek, taşıtlarda kullanılan yaprak yaylarıdır [42].

Test numunesinin konik bir genişliğe, kalınlığa veya çapa sahip olduğu konsol kirişli makineler, aynı kesit boyutunda tekdüze eğme veya eksenel yorulma için gerekenden daha küçük yük gereksinimlerine sahip tekdüze gerilmeye sahip test alanı kısmına neden olmaktadır [41].

2.6.2.2. Dönen Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi

Bu yöntemde numune devamlı dönen bir tarafsız eksene göre eğilme gerilmelerine maruz bırakıldığı deneyler, gerçek dünya uygulamalarında meydana gelen gerilmelerin taklit edilmesi için kullanılır. Hareket halindeki taşıtların aksları gibi uygulamalarda, dönen yükler nedeniyle numuneler eğilme gerilmelerine maruz kalır. [42].

Döner eğme makinesi tipleri Şekil 2.37'de gösterilmektedir. R. R. Moore tipi makineler (Şekil 2.37.a) 10000 rpm'ye kadar çalışabilmektedir. Tüm eğme tipi testlerde, yalnızca yüzeye yakın malzeme maksimum gerilmeye maruz kalır; bu nedenle, küçük çaplı bir numunede, yalnızca çok küçük bir malzeme hacmi test edilmektedir [41].

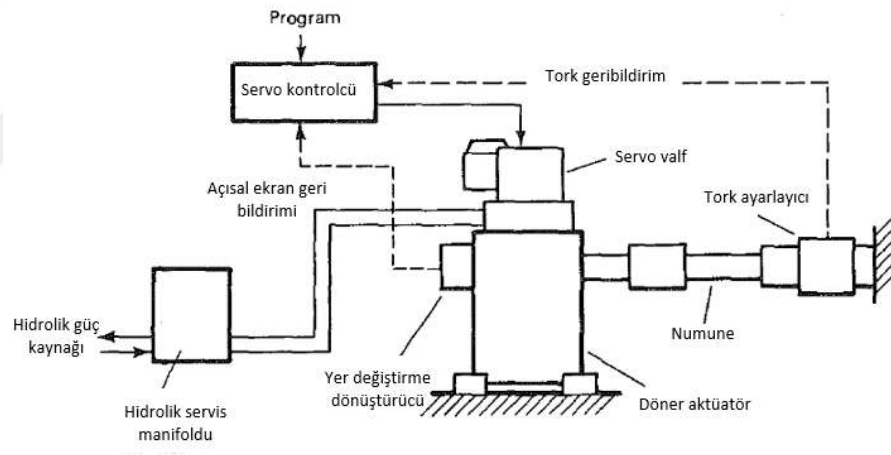


Şekil 2. 37. Döner eğme yorulma test makinesi şemaları [41]

2.6.3. Burma Gerilmeli Yorulma Deneyi

Deney numunesinin sabit bir eksene göre tekrarlanan burma gerilmeleri altında test edildiği deneyler, gerçek dünya uygulamalarında karşılaşılan burma gerilmelerini taklit etmek için kullanılır. Örneğin, araçların süspansiyon yaylarında veya çekme-basma kuvvetlerinin uygulandığı helisel yaylarda burma gerilmeleri oluşur [42].

Burulma yorulma testleri, gerekli maksimum burulma küçükse, uygun fıkstürler kullanılarak aksenal tip makinelerde gerçekleştirilebilmektedir. Özel olarak tasarlanmış burulma yorulma test makineleri, kranklar kullanılarak doğrusal hareketin dönme hareketine dönüştürüldüğü elektromekanik makinelerden ve döner aktüatörlerin kapalı devre test sistemine dahil edildiği servohidrolik makinelerden oluşmaktadır [41].



Şekil 2. 38. Servohidrolik burulma yorulma test makinesinin şeması [41]

2.6.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi

Reel uygulamalarda, bazı parçaların maruz kaldığı gerilmeler birden fazla bileşeni içerebilir. Bu durumda, bileşik gerilmeler meydana gelir. Örneğin, motorların krank mili başlıklarında gerilme, eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu bir bileşik gerilme durumuna sahiptir. Bu parçalar, motordaki dönme hareketi ve motorun çalışması sırasında meydana gelen yükler nedeniyle karmaşık bir gerilme durumuna maruz kalır. Eğme gerilmeleri, krank mili başlıklarının eğilme hareketi

nedeniyle oluşurken, burma gerilmeleri ise dönme hareketinden kaynaklanır. Ayrıca, eksenel yükler de gerilme durumuna dahil olabilir. [42].

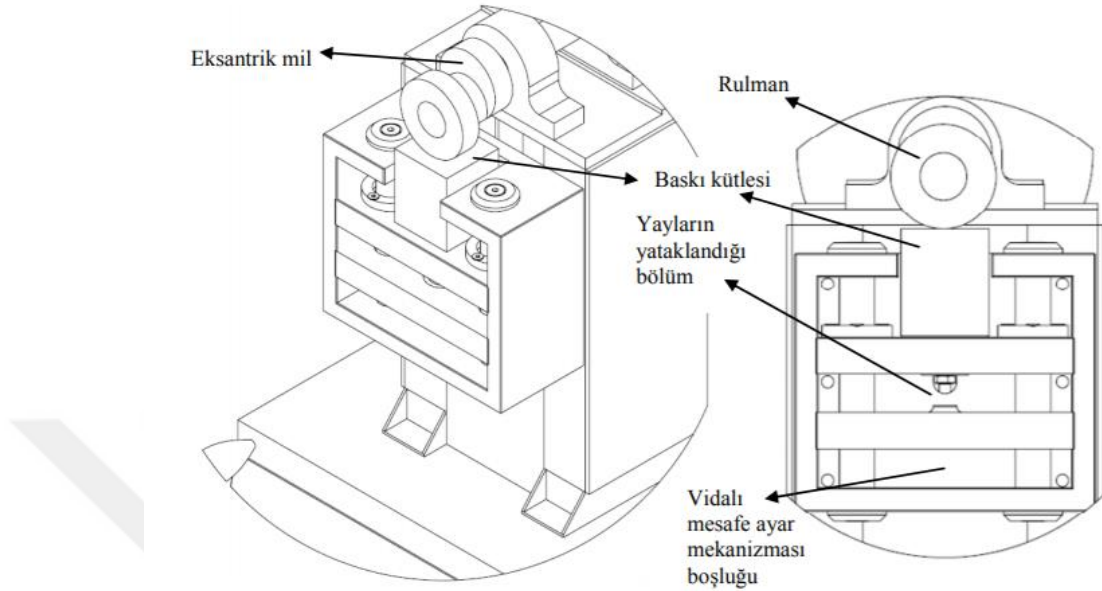
2.7. Yorulma Test Makineleriyle İlgili Genel Bilgiler ve Akademik Çalışmalar

Günümüzde otomotiv sektöründe kullanılan parçaların çoğu dinamik yüklere maruz kalması sebebiyle bu parçalarda yorulma olayı meydana gelmektedir. Bu sebeple seri üretim koşullarında parçanın maruz kalacağı dinamik yükleri simüle edebilmek amacıyla tasarlanmış yorulma test makineleri ile yapılan testler ile malzemelerin yorulma ömürleri belirlenmektedir.

Dinamik yüklemelerin eksenel, radyal veya açısal oluşu parçaların maruz kaldığı yorulma türlerinin de birbirlerinden farklı olmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden, yorulma testi için kullanılacak test makinesinin tipi, dinamik zorlamanın nereden uygulanacağına göre değişiklik göstermektedir.

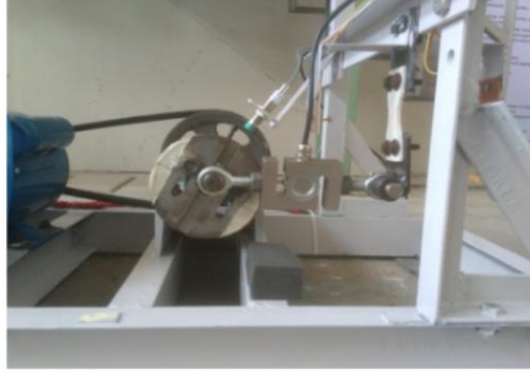
Burhan ve ark. çalışmalarında [43] , farklı tel çaplarına ve boylarına sahip basma yaylarının belirli aralıklarda değişen yükler altındaki ömür analizlerini yapabilmek için bir deney cihazı tasarlanması ve imalatı üzerine bir araştırma yapılmıştır. Kayış kasnak mekanizması ile devri düşürülen eksantrik milinin ucuna çakılan bir rulman aracılığıyla, üst tablaya baskı uygulanarak yük yay iletilmektedir. Bu mekanizma, bir motorun çalışmasıyla eksantrik milin ucundaki rulmanın üst tablaya kuvvet uygulaması ve yayın sıkıştırılması işlemiyle çalışır. Motorun dönmesiyle eksantrik milinin ucunda bulunan rulman, dönme hareketini mekanik olarak ileterek üst tablaya kuvvet uygular. Bu kuvvet, üst tablayı aşağı doğru bastırır ve yayın sıkışmasını sağlar. Yay, bu baskı sonucunda deformasyona uğrar ve potansiyel enerji depolar. Bu mekanizma, yayın sıkıştırma işlemiyle potansiyel enerji depolamasını ve daha sonra bu enerjiyi serbest bırakarak kullanılmasını sağlar. Yayın serbest bırakılmasıyla üst tabla hareket eder ve belirli bir kuvvet veya hareketi gerçekleştirir. Bu mekanizma, yayın elastik özelliklerinden yararlanarak enerji depolayıp bırakma prensibi üzerine çalışır. Kayış kasnak mekanizmasıyla devri düşürülen eksantrik milinin ucuna çakılan rulman ve yaylı sistem, birçok uygulamada kullanılan bir mekanizmadır. Bu mekanizma, yayın elastik özelliklerini kullanarak

hareket enerjisini depolayabilen ve gerektiğinde bu enerjiyi serbest bırakabilen bir sistem olarak çalışır. Tasarlanan cihaz şekil 2.39’da gösterilmektedir.



Şekil 2. 39. Yay yorma cihazının genel görünüşü [43]

Kulkarni ve ark. [44] çalışmalarında, bir uçak eğme yorulma testinin geliştirilmesi kompozit malzeme için makine tasarımı yapmışlardır. Test cihazında L-şeklinde parçaları kullanmışlardır. Numuneler tekrarlanan dalgalı gerilmelere ve döngü sayısına maruz bırakılarak numunenin kırılmasına kadar sayılarak sonuçlar çizilmektedir. Yorulma makinesinin tasarımında izlenen çalışma prensibi, eğme teorisinde kullanılan konsol yüklemeli elastik kiriş eğme prensibidir. Kiriş, eksenine dik yükleri destekleyebilen nispeten uzun bir eleman olarak kabul edilmektedir. Eğmenin bir sonucu olarak kiriş üzerindeki gerilme, eğme gerilmeleri olarak adlandırılmaktadır. Kirişin bir ucunda sabitlendiği varsayılır, diğer ucunda eğme gerilmelerini geliştiren bir nokta yükü taşır. Şekil 2.40 eksantrik krank düzeneğini, şekil 2.41 uçak eğme yorulma testi için deneysel düzeneği göstermektedir.

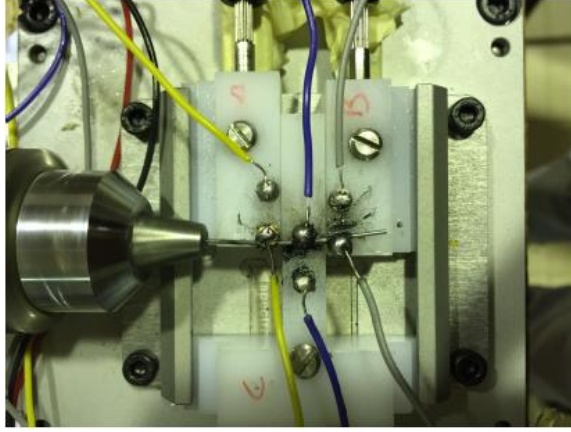


Şekil 2. 40. Eksantrik krank düzeneği [44]



Şekil 2. 41. Uçak eğme yorulma testi için deneysel düzenek [44]

Carvalho ve ark. [45] endodontik çalışmalar için otomatik ayarlanabilir bir döner eğme test makinesi tasarlamıştır. Bu test makinesini eğme derecesini basit noktasal eğmeden daha karmaşık çok noktalı eğmeye uyarlamak ve değiştirmek için tasarlamışlardır. Makine, numuneyi istenen karmaşık bir şekle deforme eden servo motorlar tarafından konumlandırılan üç çift pimden oluşmaktadır. Numune daha sonra yorulma kırılması gerçekleşene kadar döndürülmektedir. Numunenin ne zaman arızalandığını tespit etmek için bir elektronik arıza tespit sistemi uygulanmıştır. Bu sistem, numune ile her bir pim arasındaki voltaj seviyesini sürekli izleyerek herhangi bir arızayı tespit etmek için NiTi alaşımlarının doğal iletkenliğini kullanmaktadır. Devre açık olduğunda, numunenin başarısız olduğu ve testin otomatik olarak durduğu anlamına gelmektedir. Şekil 2.42’de test esnasında hasara uğrayan tel numunesi gösterilmektedir.



Şekil 2. 42. Test sırasında yorulma hasarına uğrayan tel numunesi [45]

Ghielmetti ve ark. [46] çalışmalarında, bronz kaplama uygulanmış ve kaplama uygulanmamış alüminyum numuneleri test edebilmek amacıyla bir kuvvet kontrol ünitesi adapte edilmiş bir elektromekanik yorulma test makinesi tasarımı hazırlamışlardır. Çalıştıkları sistem bir elektro-mekanik sarsıcı, bir yük hücresi, bir kontrolör, özel yazılım ve numuneyi kısıtlamak için harici bir metalik yapı içermektedir. Düz numune üzerindeki eğme yorulma testi, sabit frekanslı bir çevrimsel kuvvet uygulanarak ölçülmektedir.

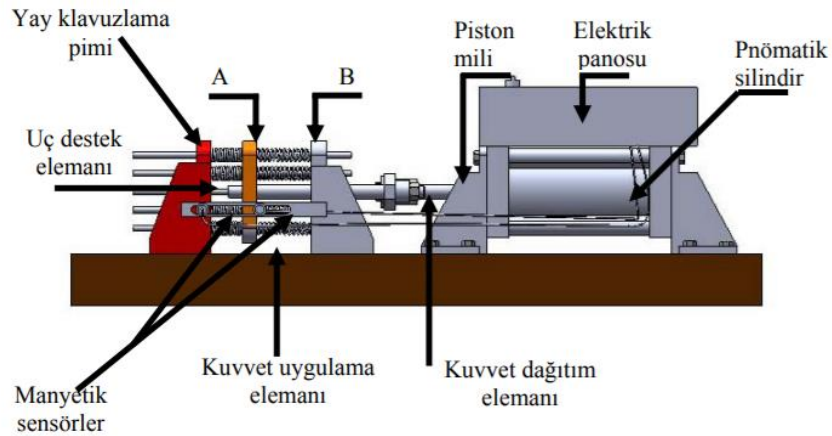
Balcıoğlu ve ark. [47] çalışmalarında, fiber takviyeli kompozit levhalar, ahşap levhalar, plastik esaslı levhalar ve hafif metalik levhaların eğilmeli yorulma davranışlarını karakterize etmek amacıyla özgün bir yorulma test makinesi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri özel bilgisayar yazılımı ile kontrol edilebilen ankastre-tip eğilmeli test makinesi, yorulma testi için deplasman kontrol metodunu kullanmaktadır. Geliştirilen test makinesinin aynı anda 10 numuneyi test edebilme özelliği, zamandan ve enerjiden tasarruf sağlamaktadır. Bu özellik, daha hızlı ve verimli bir test süreci sunarak testlerin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlar. Yazılım ara yüzü üzerinden yapılacak basit veri girişleri ile farklı sehim oranları (R) ve 0.1-10 Hz frekans altında yorulma testleri yapılabilir. Bu test makinesinin kullanıcı dostu bir yazılım arayüzü ve internet tabanlı erişim sağlama özelliği sayesinde, her bir numune için test zamanı, test frekansı, eğme kuvveti, rijitlik kaybı, yük tekrar sayısı gibi parametrelerin izlenmesi ve müdahale edilmesi mümkündür. Bu, araştırmacıların test koşullarını istedikleri gibi ayarlamalarını ve takip etmelerini sağlar. Ayrıca, numunelerden herhangi biri hasara uğradığında sistem, araştırmacının

e-postasına uyarı mesajı gönderir ve ilgili test verilerini bildirir. Bu sayede, araştırmacılar anında müdahale edebilir ve sorunlu numuneyi değiştirerek testin kesintisiz devam etmesini sağlayabilir. Tasarlanan çok numuneli ankastre tip eğilmeli yorulma cihazı şekil 2.43'te gösterilmektedir.



Şekil 2. 43. Çok numuneli ankastre tip eğilmeli yorulma cihazı [47]

Gönen ve ark. [49] çalışmalarında tasarladıkları mekanik yay yorulma cihazının, farklı özelliklere sahip yayların ömür değerlerini tespit etmek amacıyla kullanıldığı belirtilmiştir. Cihazın özgün özelliği, aynı anda iki farklı sıkıştırma oranında yorulma analizi yapabilme imkânı sunmasıdır. Bu özellik, ömür-gerilme (S-N) diyagramı çizilirken iki farklı noktayı belirlemeyi kolaylaştırır. İki farklı sıkıştırma oranında yapılan testler sayesinde, farklı gerilme seviyelerindeki yayların ömür değerleri belirlenebilir. Bu veriler kullanılarak, yayların gerilme düzeyine bağlı olarak ömürlerini tahmin etmek ve S-N diyagramını oluşturmak mümkün olur. Tasarlanan mekanik yay yorulma cihazı Şekil 2.44'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 44. Mekanik yay yorulma cihazı tasarımı [49]

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Çalışmada kullanılacak olan malzeme alaşımı AlSi10MgMn ile ilgili detaylı bilgiler bölüm 2.4.3'te incelenmiştir.

Alaşımın kimyasal kompozisyon dağılımı tablo 3.1'de, gösterilmektedir [40].

Tablo 3. 1. AlSi10MgMn kimyasal kompozisyonu [40]

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	P	Diğerleri
En Az	9,5	-	-	0,5	0,1	-	0,04	0,01	-	-
En Çok	11,5	0,15	0,03	0,8	0,5	0,07	0,15	0,025	0,001	0,1

AlSi10MgMn alaşımının sahip olduğu fiziksel özellikler tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 2. AlSi10MgMn fiziksel özellikleri [40]

		Birim	Geçerlilik Aralığı
Katılma Sıcaklığı	590-550	°C	
Yoğunluk	2,64	kg/dm ³	20°C
Elastisite Modülü	74-83	Gpa	20°C
Lineer Isıl Genleşme Katsayısı	21	1/K x 10 ⁻⁶	20-200°C
Isıl İletkenlik (Tavlanmış)	1,50	W/(K x cm)	20-200°C
Elektrik İletkenliği (Döküm)	21-26	Ms/m	20°C
Yorulma Mukavemeti (Döküm)	89	MPa	50x10 ⁶ çevrim

AlSiMg alaşımında yapılmış olan çalışmada T5 ısıtma işlemi 160°C ile 200°C aralığında ve 1 saat ile 48 saat arasında ısıtma işlemine maruz bırakıldığı belirtilmiştir [48]. Döküm sonrası tüm parçalar kalıptan 300°C sıcaklıkta çıkarılarak suya indirilmiştir. Isıl işlem sıcaklığını optimum seviyeye getirebilmek amacıyla tüm numuneler için ısıtma işlem süresi eşit olarak 4 saat olarak tanımlanmıştır. Tüm numuneler ısıtma işlem uygulaması için ilk 15 dakikada bekleme sıcaklığına getirilerek devamındaki 4 saat

boyunca ısıtılma maruz bırakılmıştır. Bu çalışmada yorulma davranışı incelemek amacıyla döner eğmeli yorulma test makinesinde tablo 3.3'te belirtilen yapay yaşlandırma ısıtılma işlem parametrelerine göre numuneler üretilerek yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Parametrelerdeki farklılık sadece sıcaklık olması sebebiyle sonraki açıklamalarda sadece sıcaklık değişken olarak belirtilmiştir.

Tablo 3. 3. AlSi10MgMn alaşım ve ısıtılma işlem parametreleri

Alaşım	Isıtılma İşlem Parametre
AlSi10MgMn	-
AlSi10MgMn	T5 (170°C / 15 dk+4 saat)
AlSi10MgMn	T5 (180°C / 15 dk+4 saat)
AlSi10MgMn	T5 (190°C / 15dk+4 saat)

Proje kapsamında yapılan yorulma testleri aşağıda belirtilmektedir.

Tablo 3. 4. Yorulma Test Metotları

Düşük Çevrim Yorulma Testi	10 ³ çevrim
Sürekli Mukavemet Yorulma Testi	10 ⁶ çevrim

3.1. Test Cihazları

AlSi10MgMn alaşımıyla döküm yapılmış parçalardan kesilen numuneler laboratuvar tipi ısıtılma fırınında ısıtılma işlem uygulaması yapılmıştır (şekil 3.1, şekil 3.2, şekil 3.3 ve şekil 3.4)



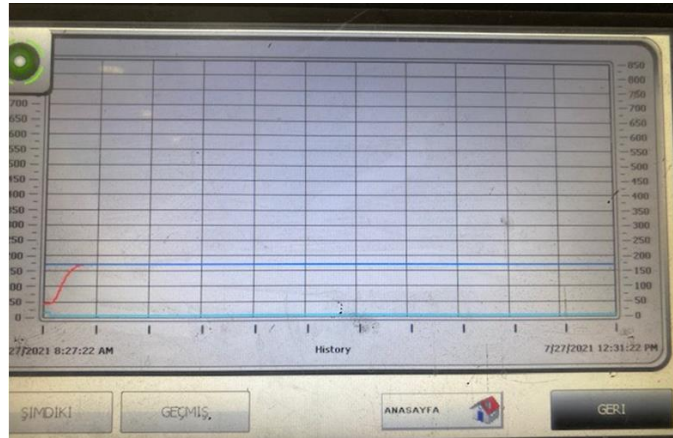
Şekil 3. 1. Laboratuvar tipi ısıtılma fırını



Şekil 3. 2. Laboratuvar tipi ısıt işlem fırını arayüzü

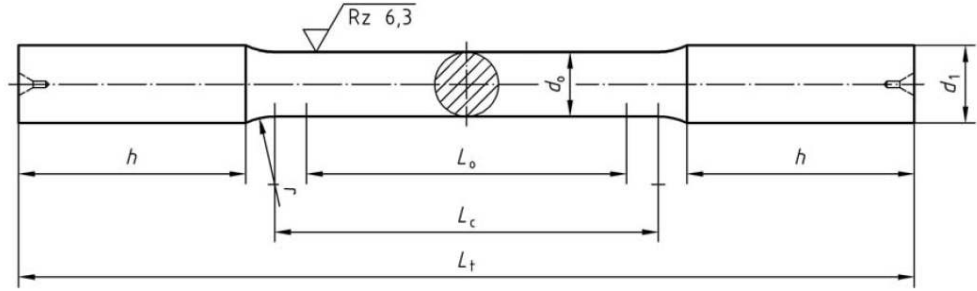


Şekil 3. 3. Numunelerin ısıt işlem fırını içerisindeki yerleşimi



Şekil 3. 4. Isıt işlem esnasındaki sıcaklık zaman grafiği

Yorulma testlerindeki stres değerlerini belirleyebilmek amacıyla tablo 3.3'te belirtilen parametreler için DIN 50125 standardına göre hazırlanan beşer adet çekme test numunesi hazırlanarak INSTRON 5982 (100kN) ekstensiyometreli test cihazında çekme testleri uygulanmıştır. Numune teknik resmi şekil 3.5'te, boyutlar tablo 3.5'te, çekme test cihazına ait görseller şekil 3.6, 3.7 ve 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 5. DIN 50125'e göre hazırlanan çekme test numunesi teknik resmi

Tablo 3. 5. Çekme test numunesi ölçüleri

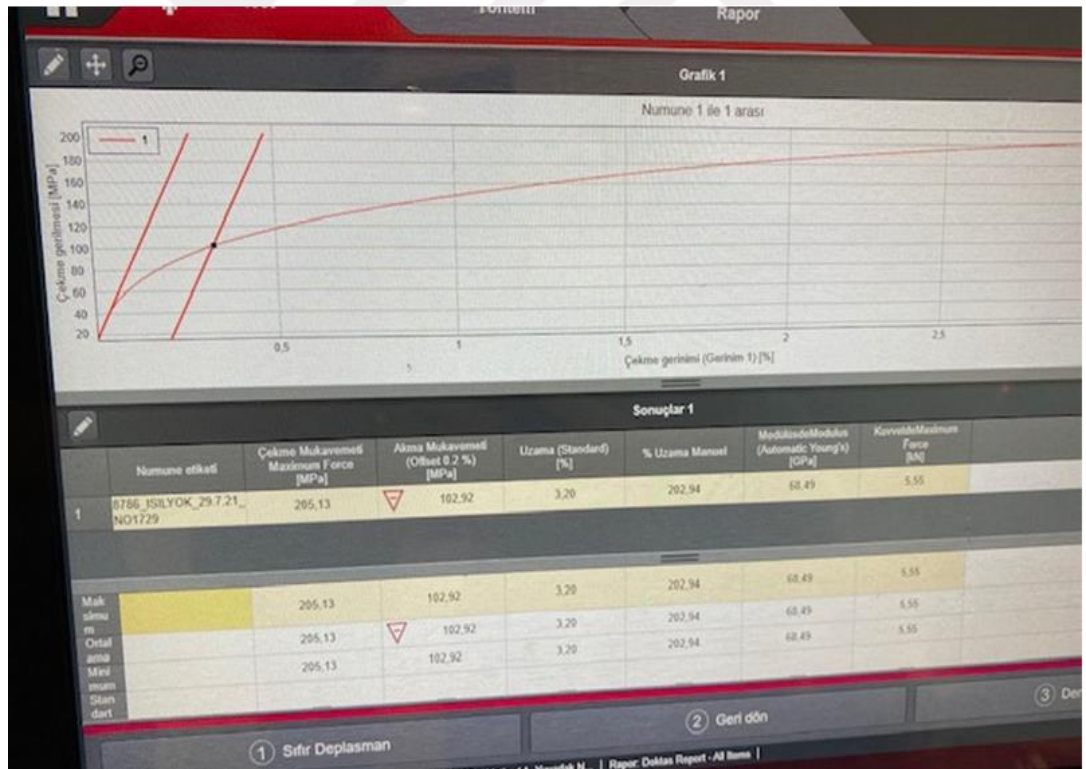
do	Lo	d1 (min)	r (min)	h (min)	Lc (min)	Lt (min)
6 mm	30 mm	8 mm	5 mm	25 mm	36 mm	92 mm



Şekil 3. 6. Instron 5982 çekme test cihazı



Şekil 3. 7. Çekme test numunesi



Şekil 3. 8. Çekme test cihazı grafik ve sonuç raporu

3.2. Test Metodu

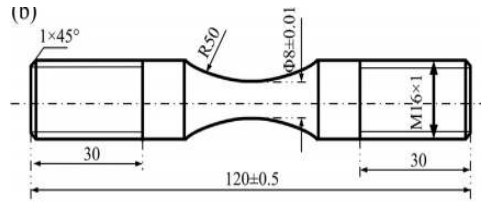
Testlerde kullanılacak test makinesi, temelde bir eğilmeli yorulma makinesidir. Makine, testlerin kısa sürmesi adına dönmeli eğilme-yorulma testi yapmaktadır. Makine uyarlanabilir şekilde olup, farklı malzemedeki, farklı boyut ve uzunluktaki parçaların yoruma testlerine uygun olarak çalışmaktadır. Test makinesi, yüksek dayanımlı malzemelerin testlerini de gerçekleştirebilmektedir. Yorulma test makine ekipmanlarının ön tasarımı, çeşitli makinelerde mevcut olan ve hali hazırda üretimi yapılan ve yaygın bulunan parçalar (üniversal torna aynası, rulmanlı yataklar, esnek kaplinler, elektrik motoru, cıvatalar vs.) kullanılmaktadır. Mesafe sensörü incelenmesi vasıtasıyla kurulacak algoritmalar ve matematiksel modeller ile çeşitli malzemelerin yorulma karakteristikleri ortaya koyulmaktadır. Çatlak başlangıcından ilerlemesine kadar olan sürelerin analizi, malzeme türlerine göre çatlak oluşum ve ilerleme şekilleri incelenerek bunlarla ilgili veriler toplanıp işlenmiştir. Kullanılan yorulma test cihazını şekil 3.9’da gösterilmektedir.



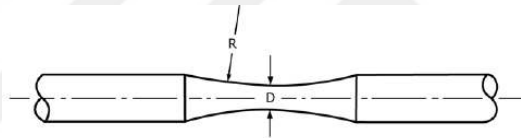
Şekil 3. 9. Yorulma test cihazı

3.3. Test Numunesi

ASTM E466-15 standarttaki yorulma test numuneleri talaşlı imalat yöntemi ile üretilmiştir. Şekil 3.10’da literatürdeki bir yorulma testinde kullanılan numunenin teknik resmi, şekil 3.11’de ASTM E466-15 standardında belirtilen numune resmi gösterilmektedir.

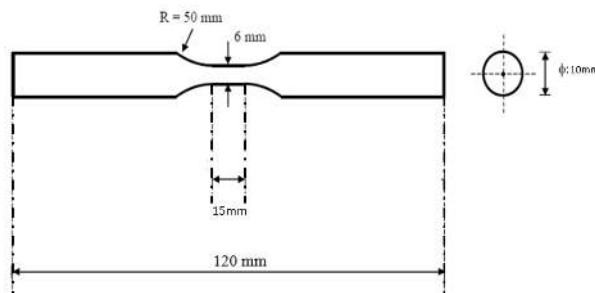


Şekil 3. 10. Yorulma testinde kullanılan bir numunenin teknik resmi [50]



Şekil 3. 11. ASTM E466-15 standardı genel numune gösterimi [51]

ASTM E 466-15 standardına göre yuvarlak test numunelerinde, numunenin sahip olduğu radius(R), test kesit çapı (D)’nin en az 8 katı büyüklüğe sahip olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca test kesit uzunluğunun, test kesit çapından (D) en az 2 veya 3 kat uzunlukta olması gerekmektedir. Test kesitinin kırılmasını sağlamak için, kavrama kesit alanı test kesit alanının en az 1,5 katı olmalıdır. ASTM E466-15 standardında belirtilen numune resmi ve şekil 3.12’de standarda göre hazırlanan testlerde kullanılacak numunenin teknik resmi gösterilmektedir.



Şekil 3. 12. ASTM E466-15 standardına göre hazırlanan numune teknik resmi

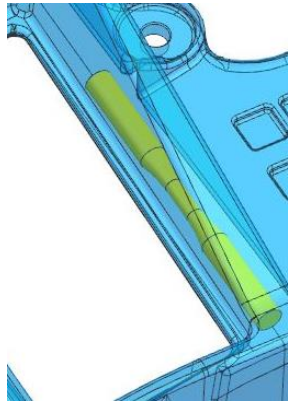
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yorulma prosesi genellikle plastik deformasyonun etkisi altında gerçekleşir. Malzemede tekrarlı yüklemelere maruz kalan lokal bir bölge, plastik deformasyona tabi tutulduğunda yorulma çatlağının çekirdeklenmesi başlar.

Bu çalışmada tasarım ömrünü belirlemek için yapılan testlerin düşük çevrimli ve yüksek çevrimli ömür bölgesinde testlerin gerçekleştirilmesi ve S-N eğrilerinin çıkarılması hedeflenmiştir.

4.1 Çekme ve Yorulma Numunelerinin Hazırlanması

Yorulma ve çekme testlerini gerçekleştirmek üzere seri imalatı devam etmekte olan bir parça; malzeme mekanik özelliklerine göre seçilen AlSi10MgMn malzeme ile yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiştir. Döküm sonrası parçalar hem ısıtılıp işlemsiz olarak hem de farklı sıcaklıklardaki T5 ısıtılıp işlemine tabi tutularak ayrılmıştır. Parçanın soğuma karakteristiğinin etkisini gözlemlemek adına her parça üzerinden aynı lokasyondan talaşlı imalat yöntemi ile numuneler elde edilmiştir. Numune lokasyonları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. Parça üzerinden alınan test numune lokasyonları

Alınan numunelerin işlenecek parçanın aynı bölgesinden ve aynı soğuma/katılaşma karakteristiğine sahip bölgelerinden alınmasına dikkat edilmiştir.

Test numunelerinin iç kusur kontrolleri x-ray cihazında yapılmıştır. X-ray incelemesi yapılmış bir numuneye ait görsel Şekil 4.2’de paylaşılmıştır.



Şekil 4. 2. Test numunesi X-ray kontrolü

4.2 Çekme Test Deneyi ve Sonuçları

Deneylerde kullanılacak olan numunelerin mukavemet değerlerini görebilmek amacıyla Instron 5982 çekme test cihazında çekme testleri uygulanmıştır. Karşılaştırılan veri sınıfları için çekme testleri 5 kere yapılmıştır ve veriler alınan sonuçların ortalamasını içermektedir. Tablo 4.1’de ısıtılmış AlSi10MgMn numunelerine ait çekme test sonuçları gösterilmektedir. Tablo 4.2, tablo 4.3 ve tablo 4.4’te farklı ısıtma parametreleri uygulanan numunelerden elde edilen mukavemet değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4. 1. Isıtılmış AlSi10MgMn numunelerine ait mekanik özellikler

Numune No	Alaşım / Isıl İşlem Parametre	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
1	AlSi10MgMn/ Döküm	205,13	102,92	3,2
2	AlSi10MgMn/ Döküm	171,96	104,44	1,72
3	AlSi10MgMn/ Döküm	224,39	105,18	4,8
4	AlSi10MgMn/ Döküm	188,65	103,92	2,03
5	AlSi10MgMn/ Döküm	176,45	109,83	1,58
	Ortalama Değerler	193,32	105,26	2,67
	Standart Sapma	21,61	2,69	1,35

Tablo 4. 2. 170°C’de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait mekanik özellikler

Numune No	Alaşım / Isıl İşlem Parametre	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
1	AlSi10MgMn/ 170°C	170,92	152,7	0,58
2	AlSi10MgMn/ 170°C	225,64	155,52	1,92
3	AlSi10MgMn/ 170°C	230,15	155,86	2,25
4	AlSi10MgMn/ 170°C	224,74	152,2	2,02
5	AlSi10MgMn/ 170°C	198,86	160,95	0,9
	Ortalama Değerler	210,06	155,45	1,53
	Standart Sapma	25,10	3,48	0,74

Tablo 4. 3. 180°C’de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait mekanik özellikler

Numune No	Alaşım / Isıl İşlem Parametre	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
1	AlSi10MgMn/ 180°C	258,24	167,18	3,03
2	AlSi10MgMn/ 180°C	260,97	176,11	4,22
3	AlSi10MgMn/ 180°C	165,57	157,86	0,45
4	AlSi10MgMn/ 180°C	256,43	171,5	3,28
5	AlSi10MgMn/ 180°C	239,53	167,31	2,04
	Ortalama Değerler	236,15	167,99	2,60
	Standart Sapma	40,34	6,75	1,43

Tablo 4. 4. 190°C’de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait mekanik özellikler

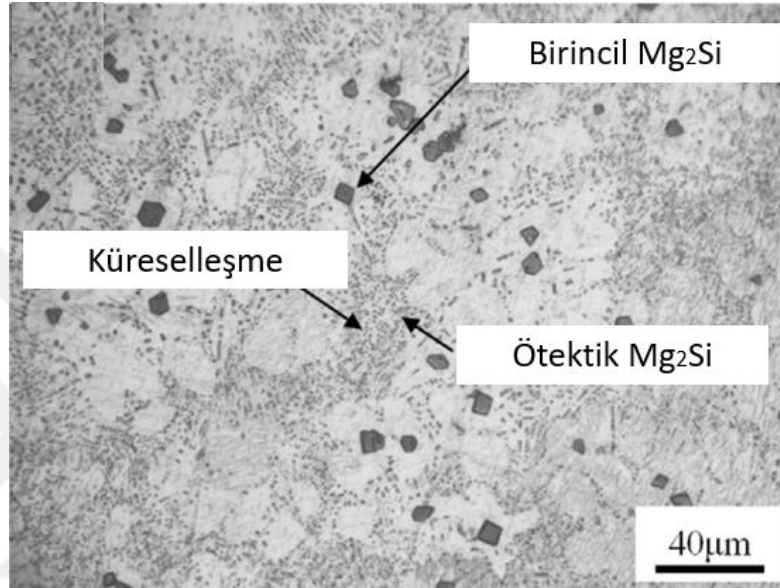
Numune No	Alaşım / Isıl İşlem Parametre	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
1	AlSi10MgMn/ 190°C	201,61	184,03	0,67
2	AlSi10MgMn/ 190°C	205,06	162,65	1,07
3	AlSi10MgMn/ 190°C	226,02	177,36	1,2
4	AlSi10MgMn/ 190°C	262,12	176,99	3,27
5	AlSi10MgMn/ 190°C	222,98	172,68	1,47
	Ortalama Değerler	223,56	174,74	1,54
	Standart Sapma	24,07	7,88	1,01

Elde edilen çekme test sonuçları ile literatürdeki düşük çevrim ve sürekli mukavemetlilik testleri için başlangıç stres değerleri belirlenmiştir. Literatüre göre düşük çevrim yorulma testleri (10^3) için çekme mukavemetinin 0,90 katı, sürekli mukavemet yorulma testleri için (10^6) akma mukavemetinin 0,66 katı başlangıç stres değeri olarak belirlenmiştir. Buna göre düşük çevrim yorulma testlerinde en yüksek ortalama çekme mukavemetine ulaşılan 180°C ısıtılma işlem sonuçlarındaki 236,15 MPa’nın yaklaşık 0,90 katı olan 210 MPa başlangıç stres değeri olarak alınmıştır. 210 MPa sonrasında sırasıyla 180 MPa ve 150 MPa stres değerlerinde yorulma testleri gözlemlenmiştir.

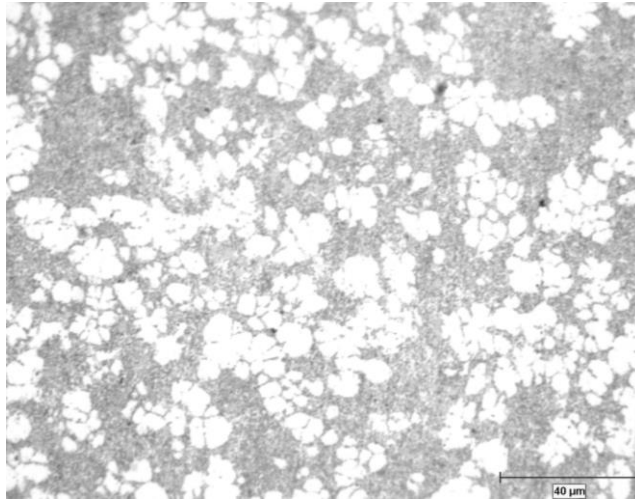
Sürekli mukavemet değeri belirlemek için de ısıtılma işlem uygulanan numuneler içinde en düşük ortalama akma mukavemetine ulaşılan 170°C ısıtılma işlem sonuçlarındaki 155,45 MPa’nın yaklaşık 0,66 katı olan 100 MPa başlangıç stres değeri olarak belirlenmiştir. 100 MPa sonrasında sırasıyla 85 MPa ve 72 MPa stres değerlerinde yorulma testleri uygulanmıştır.

4.3. Mikroyapı Analizleri

Bu çalışma kapsamında, tüm numunelere ait mikroyapı incelemeleri detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Temel amaç, yaşlandırma ısı işlemi sonucunda meydana gelen çökelti oluşumunu gözlemlemektir. Şekil 4.3'te yer alan görsel, bu oluşumu daha iyi anlamak için önemli bir referans sağlamaktadır. Şekil 4.4 ısı işlemi yapılmamış numuneye ait 500x yakınlaştırılmış mikroyapı görüntüsü göstermektedir.

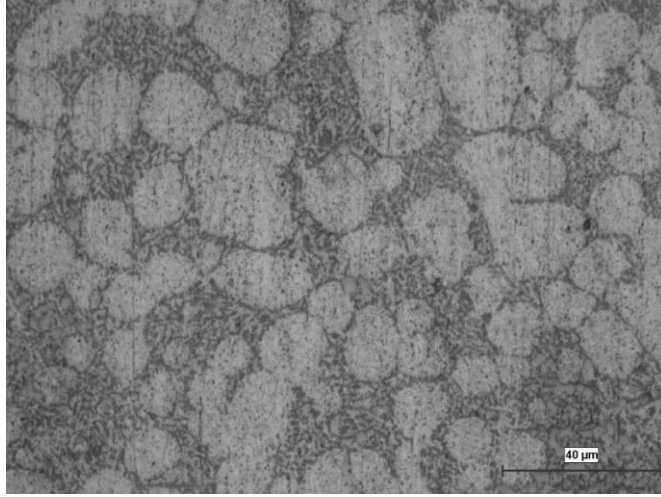


Şekil 4. 3. Yaşlandırma sonrası ötektik Mg₂Si çökmesi [52]



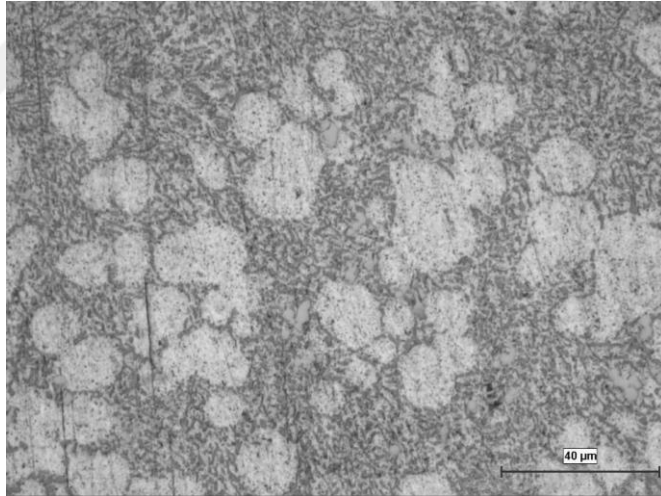
Şekil 4. 4. Isıl işlemlenmemiş AlSi10MgMn mikroyapı görüntüsü

Şekil 4.5 170°C’de ısı işlem uygulanmış numuneye ait 500x yakınlaştırılmış mikroyapı görüntüsü göstermektedir.



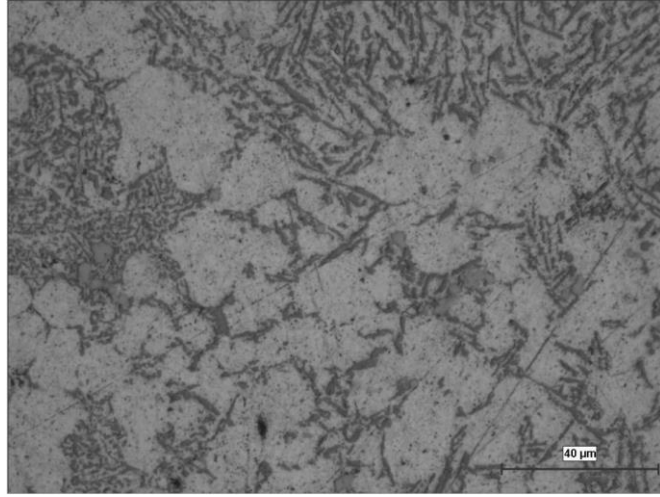
Şekil 4. 5. 170°C ısıt ışıleml ılı AlSi10MgMn mikroyapı görüntüsü

Şekil 4.6 180°C’de ısıt ışıleml ılı uygulanmış numuneye ait 500x yak ınılaştırılmış mikroyapı görüntüsü göstermektedir.



Şekil 4. 6. 180°C ısıt ışıleml ılı AlSi10MgMn mikroyapı görüntüsü

Şekil 4.7 190°C’de ısıt ışıleml ılı uygulanmış numuneye ait 500x yak ınılaştırılmış mikroyapı görüntüsü göstermektedir.



Şekil 4. 7. 190°C ısıt ışıleml ışıleml ışıleml AlSi10MgMn mikroyap ışıleml ışıleml ışıleml

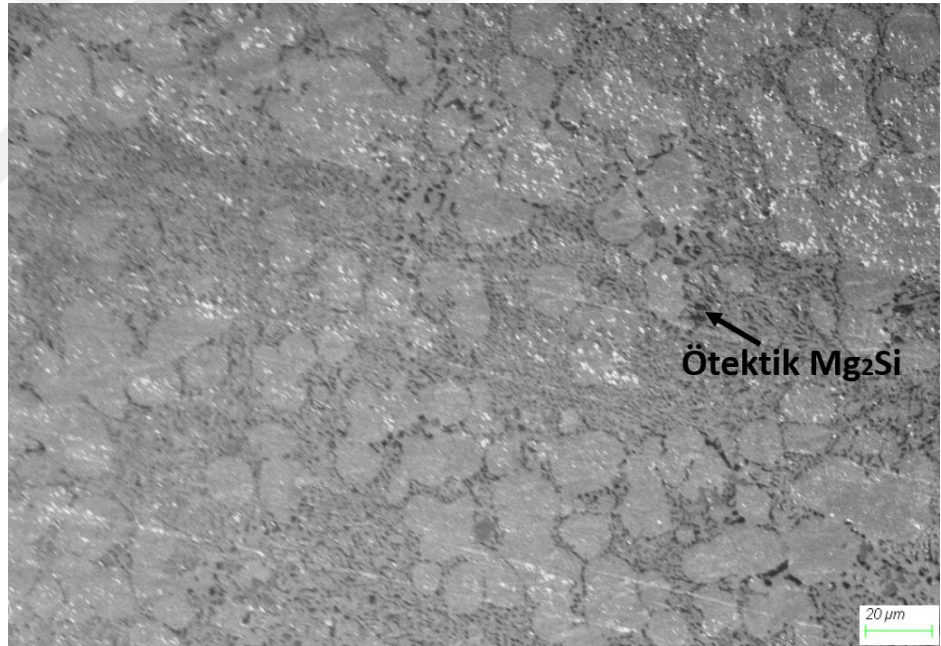
Mikroyap ışıleml ışıleml ışıleml sonucunda, ısıt ışıleml ışıleml numunelerde gözlemlenen ötektik Mg₂Si çökeltisi dikkat çekici bir şekilde tespit edilmiştir. Bu çökelti, malzemenin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkileyebilecek önemli bir bileşendir. Ötektik Mg₂Si çökeltisi, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek sertlik ve yüksek mukavemet gibi avantajlar sunarak malzemenin dayanıklılığını ve performansını artırma potansiyeline sahiptir. Araştırma sonuçları, yaşlandırma ısıt ışıleml ışıleml ışıleml numunelerde ötektik Mg₂Si çökeltisi oluşumunu teşvik ettiğini ve bu çökeltinin malzemenin mikroyapısında belirgin bir rol oynadığını göstermektedir. Bu bulgular, malzeme mühendisliği alanında ısıt ışıleml ışıleml ışıleml edilmesi ve malzemelerin performansının artırılması için önemli bir temel oluşturmaktadır.

4.4. SEM Analizleri ve EDS Ölçümleri

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), malzeme biliminde ve mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan güçlü bir görüntüleme ve analiz aracıdır. SEM, malzemelerin mikro yapılarını yüksek çözünürlükte incelemektedir. Ayrıca malzemelerin tane boyutu, tane şekli, porozite, çatlaklar, çökelti, yüzey pürüzlülüğü ve benzeri mikro yapısal detaylarının analizinde kullanılmaktadır. Üretilen ve yaşlandırma uygulanan numunelere ayrıca SEM incelemesi de yapılmıştır. Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’de her numune için alınmış SEM görüntüleri gösterilmiştir.



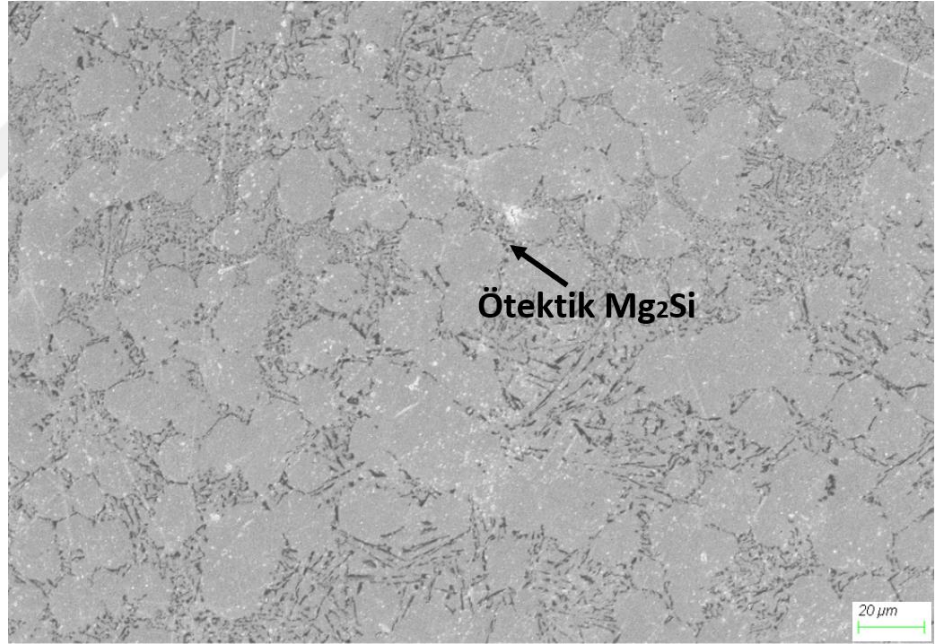
Şekil 4. 8. Isıl işlemsiz AlSi10MgMn SEM görüntüsü



Şekil 4. 9. 170°C ısıt işlemlı AlSi10MgMn SEM görüntüsü



Şekil 4. 10. 180°C ısıtılmış AlSi10MgMn SEM görüntüsü



Şekil 4. 11. 190°C ısıtılmış AlSi10MgMn SEM görüntüsü

Isıl işlemli ve ısıtılmamış numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri karşılaştırıldığında, ısıtılmış numunelerde gözlenen ötektik Mg_2Si çökeltileri dikkat çekmektedir. Bu çökeltiler, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Ötektik Mg_2Si , yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek sertlik ve yüksek mukavemet gibi avantajlar sunabilir. Bu nedenle, ısıtılmış

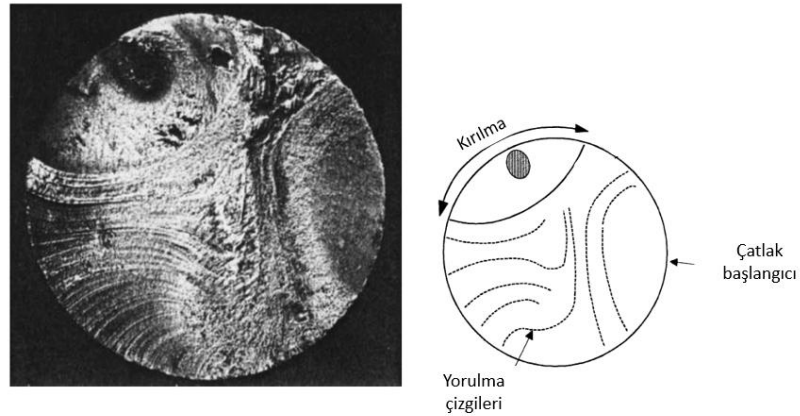
numunelerde ötektik Mg_2Si çökeltilerinin varlığı, malzemenin termal kararlılığını artırabilir ve mekanik performansını olumlu yönde etkileyebilir. Bu bulguları desteklemek amacıyla Tablo 4.5'te, ısıtılmış numunelere ait enerji dağılım spektroskopisi (EDS) sonuçları paylaşılmıştır. EDS sonuçları, farklı Mg oranlarına sahip numunelerde Mg oranının yüksek olduğu numunede, yorulma ömrünün daha uzun olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. 5 Isıl işlemlenmiş numunelere ait EDS sonuçları

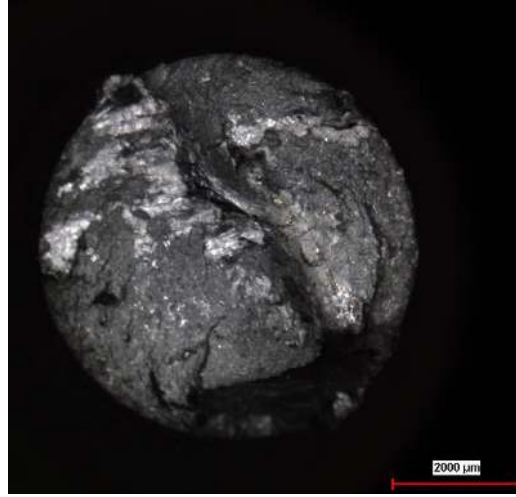
Alaşımlar	Isıl İşlem Parametre	Al %	Si %	Mg %
AlSi10MgMn	T5 (170°C)	73,05	10,59	0,84
AlSi10MgMn	T5 (180°C)	73,65	14,21	1,03
AlSi10MgMn	T5 (190°C)	70,29	14,58	0,86

4.5. Stereo Mikroskop Kırık Yüzey İncelemeleri

Stereo mikroskoplar, malzemelerin kırık yüzeylerini incelemek için yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Bu incelemeler, malzemelerin yapısal bütünlüğünü, çatlakların oluşumunu ve yayılmasını, yorulma kırılmalarını ve diğer kırık mekanizmalarını anlamak için önemlidir. Yorulma testi sonucunda kırılan numunelerin kırık yüzeyleri Şekil 4.12'de gösterildiği şekilde numuneler üzerinde yorulma çizgileri oluşumunu gözlemlemek amacıyla stereo mikroskop ile incelenmiştir. Şekil 4.13 ısıtılmış numuneye ait kırık yüzey görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 4. 12. Aks yorulma kırılması [53]



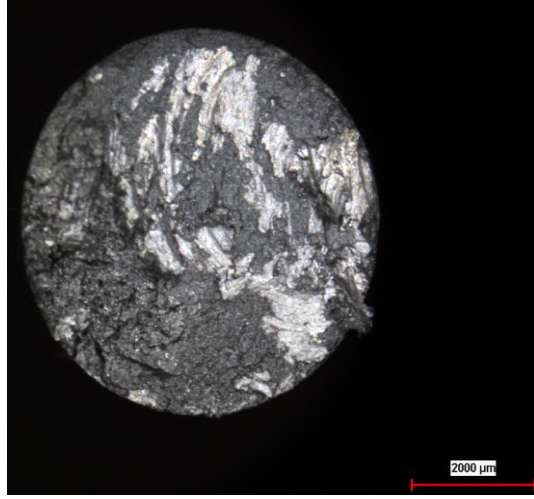
Şekil 4. 13. Isıl işlemsiz AlSi10MgMn stereo mikroskop görüntüsü

Şekil 4.14 170°C’de ısıt işlem uygulanmış numuneye ait kırık yüzey görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 4. 14. 170°C ısıt işlemli AlSi10MgMn stereo mikroskop görüntüsü

Şekil 4.15 180°C’de ısıt işlem uygulanmış numuneye ait kırık yüzey görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 4. 15. 180°C ısıt işlemlı AlSi10MgMn stereo mikroskop görüntüsü

Şekil 4.16 190°C’de ısıt işlem uygulanmış numuneye ait kırık yüzey görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 4. 16. 190°C ısıt işlemlı AlSi10MgMn stereo mikroskop görüntüsü

Yapılan incelemeler sonucunda, ısıt işlemlı numunelerde yorulma çizgilerinin görsel olarak daha net bir şekilde görüldüğü gözlenmiştir. Bu durum, ısıt işlemlı numunelerin yorulma direncinin daha yüksek olduğunu işaret etmektedir. Yorulma çizgilerinin daha belirgin olması, ısıt işlemlı numunelerin yorulma ömrünün potansiyel olarak daha uzun olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, malzemenin mikroyapısındaki değişikliklerin yorulma davranışını nasıl etkilediğini anlamak açısından önemlidir. Isıt işlemlı numunelerde gözlenen daha net yorulma çizgileri,

gerilme birikimi, çatlak başlangıcı ve çatlak yayılımı gibi yorulma mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasını sağlar. Ayrıca, ısıtılmalı numunelerin yorulma direncinin artmasının, malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapısal özelliklerindeki değişikliklerden kaynaklanabileceği düşünülebilir. Bu sonuçlar, ısıtılmalı işlemlerin malzemelerin yorulma ömrü üzerindeki etkisini değerlendirmek ve daha dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine yönelik stratejileri belirlemek için önemli bir temel sağlamaktadır. Döküm kaynaklı porozitelerin parça içerisinde bulunması ise yorulma başlangıcının poroziteden başlanmasına sebep olmaktadır, yorulma çizgilerinin iç taraftan başladığı gözlemlenen numunelerde döküm kaynaklı porozitelerin bulunduğu değerlendirilmektedir.

4.6. Sertlik Ölçümü

Üretilen numunelere sertlik ölçümü de yapılmıştır. Her parametre için sertlik ölçüm değerleri tablo 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9’da gösterilmiştir.

Tablo 4. 6. Isıl işlemsiz AlSi10MgMn numunelerine ait sertlik değerleri

Numune No	Alaşım / Isıl İşlem Parametre	Sertlik (HB)
1	AlSi10MgMn/ Döküm	75,00
2	AlSi10MgMn/ Döküm	71,90
3	AlSi10MgMn/ Döküm	76,30
	Ortalama Değerler	74,40
	Standart Sapma	2,26

Tablo 4. 7. 170°C’de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait sertlik değerleri

Numune No	Alaşım / Isıl İşlem Parametre	Sertlik (HB)
1	AlSi10MgMn/ 170°C	79,50
2	AlSi10MgMn/ 170°C	75,80
3	AlSi10MgMn/ 170°C	76,40
	Ortalama Değerler	77,23
	Standart Sapma	1,99

Tablo 4. 8. 180°C’de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait sertlik değerleri

Numune No	Alaşım / Isıl İşlem Parametre	Sertlik (HB)
1	AlSi10MgMn/ 180°C	85,40
2	AlSi10MgMn/ 180°C	83,00
3	AlSi10MgMn/ 180°C	88,80
	Ortalama Değerler	85,73
	Standart Sapma	2,91

Tablo 4. 9. 190°C’de 4 saat yapay yaşlandırılmış AlSi10MgMn numunelerine ait sertlik değerleri

Numune No	Alaşım / Isıl İşlem Parametre	Sertlik (HB)
1	AlSi10MgMn/ 190°C	84,70
2	AlSi10MgMn/ 190°C	77,30
3	AlSi10MgMn/ 190°C	90,30
	Ortalama Değerler	84,10
	Standart Sapma	6,52

Sertlik ölçüm sonuçlarına bakıldığında ısıtılma işlemi uygulanmayan numunelerin sertlik değerlerinin en düşük olması beklenen bir durumdur. 170°C ısıtılma işlemi uygulanan numunelerde sertlik değerleri artmış ve maksimum sertlik değeri bir adet 190°C ısıtılma işlemi uygulanan numunede sonuçlanmış olsa da optimum sertlik değerlerine 180°C ısıtılma işlemi uygulanan numunelerde ulaşıldığı görülmektedir.

4.7. Yorulma Testleri

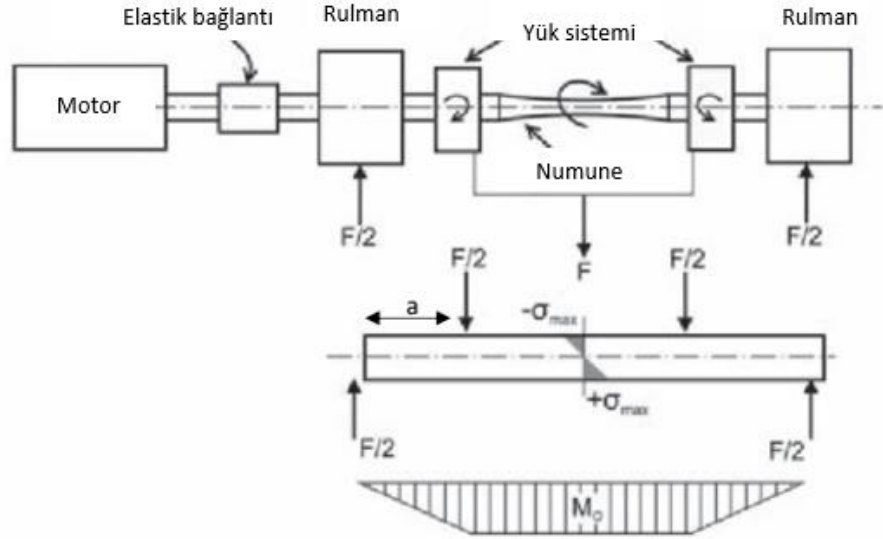
Yorulma testleri Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği malzeme laboratuvarında bulunan yorulma test cihazı ile eşit gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Test cihazına ait görsel şekil 4.17’de gösterilmektedir.



Şekil 4. 17. Yorulma test cihazı

4.7.1 Yorulma Momenti Hesaplaması

Yorulma testleri için gerekli kuvvet ve ağırlık değerleri şekil 4.18’de gösterildiği gibi eğilme momentinden hesaplanmıştır.



Şekil 4. 18. Yorulma moment hesaplama

Yorulma moment hesabına göre denklem bilgileri ve test numunesine ait değerler aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_{eğilme} = \frac{M_{eğilme}}{W_{eğilme}} \quad (4.1)$$

$$M_{eğilme} = \frac{F.a}{2} \quad (4.2)$$

$$W_{eğilme} = \frac{\pi.d^3}{32} \quad (4.3)$$

Kuvvet kolu mesafesi (a): 105 mm

Test numune çap ölçüsü (d): 6 mm

Kesit modülü ($W_{eğilme}$): $\pi * (6)^3/32$: 21,2058 mm³

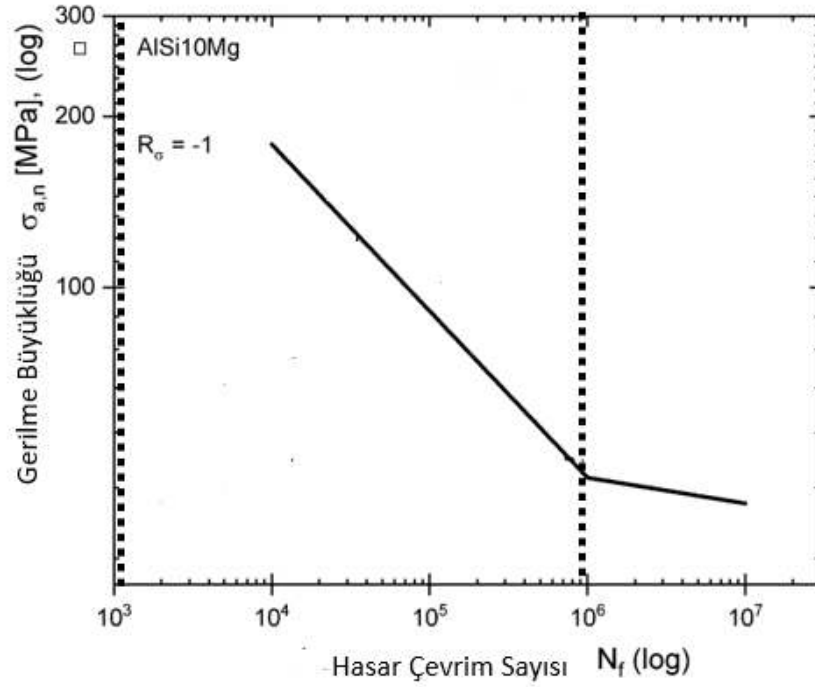
Belirlenmiş olan yukarıdaki değerlere göre test yapılan stres değerlerine göre uygulanan kuvvet değerleri hesaplanarak tablo 4.10'da özetlenmiştir.

Tablo 4. 10. Gerilmeye göre uygulanan kuvvet değerleri

Test Tipi	$\sigma_{eğilme}$ (MPa)	F (N)	Kütle (kg)
Düşük Çevrim Yorulma Testi	210	84,82	8,65
	180	72,71	7,41
	150	60,59	6,18
Yüksek Çevrim Yorulma Testi	100	40,39	4,12
	85	34,33	3,50
	72	29,08	2,96

4.7.2 Yorulma Ömürlerinin Alüminyum Alaşımları Çalışmalarına Göre Teorik Hesaplaması

Literatürdeki alüminyum alaşımları ile ilgili yapılan yorulma testlerinde 1000 çevrimin altındaki hasarlar düşük çevrim yorulma altı olarak değerlendirilmiştir, yüksek çevrim ise 10⁶ ve üstü çevrim sayısı olarak alınmıştır [53]. Çalışmada kullanılan çevrim sayısı aralığı ile beklenen grafik şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 19. AlSi10Mg alaşımına ait gerilme-ömür grafiği [27]

Bu durumda denklem 2.3 ve 2.4'ün güncel halleri denklem 4.4 ve 4.5'te gösterilmiştir.

$$\frac{0,9\sigma_k - \sigma_g}{0,9\sigma_k - (\sigma_D)} = \frac{\log N - \log 10^3}{\log 10^6 - \log 10^3} \quad (4.4)$$

$$\log N = 3 + 3 \left(\frac{0,9\sigma_k - \sigma_g}{0,9\sigma_k - \sigma_D} \right) \quad (4.5)$$

Denklem 4.5 ve tablo 4.9'da belirtilen gerilme değerlerine ait teorik yorulma ömürleri hesaplanarak tablo 4.11, 4.12, 4.13 ve 4.14'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 11. AlSi10MgMn/ Döküm numunelere ait uygulanan stres değerlerine göre hesaplanan teorik yorulma ömürleri

σ_g (MPa)	N	log (N)	σ_k (MPa)	σ_D (MPa)
72	754329	5,88	193,32	67,6606
85	324158	5,51	193,32	67,6606
100	122327	5,09	193,32	67,6606
150	4750	3,68	193,32	67,6606
180	676	2,83	193,32	67,6606

210	96	1,98	193,32	67,6606
-----	----	------	--------	---------

Tablo 4. 12. AlSi10MgMn/ 170°C numunelere ait uygulanan stres değerlerine göre hesaplanan teorik yorulma ömürleri

σ_g (MPa)	N	log (N)	σ_k (MPa)	σ_D (MPa)
72	1095249	6,04	210,06	73,5217
85	503443	5,70	210,06	73,5217
100	205331	5,31	210,06	73,5217
150	10331	4,01	210,06	73,5217
180	1718	3,24	210,06	73,5217
210	286	2,46	210,06	73,5217

Tablo 4. 13. AlSi10MgMn/ 180°C numunelere ait uygulanan stres değerlerine göre hesaplanan teorik yorulma ömürleri

σ_g (MPa)	N	log (N)	σ_k (MPa)	σ_D (MPa)
72	1762176	6,25	236,15	82,6525
85	882628	5,95	236,15	82,6525
100	397476	5,60	236,15	82,6525
150	27824	4,44	236,15	82,6525
180	5643	3,75	236,15	82,6525
210	1144	3,06	236,15	82,6525

Tablo 4. 14. AlSi10MgMn/ 190°C numunelere ait uygulanan stres değerlerine göre hesaplanan teorik yorulma ömürleri

σ_g (MPa)	N	log (N)	σ_k (MPa)	σ_D (MPa)
72	1420344	6,15	223,56	78,246
85	684246	5,84	223,56	78,246
100	294600	5,47	223,56	78,246
150	17754	4,25	223,56	78,246
180	3291	3,52	223,56	78,246
210	610	2,79	223,56	78,246

4.7.3 Yorulma Testleri Sonuçları

Numunelerde yorulma sebebi ile meydana gelen kırılmanın gerçekleştiği ömür değerleri ve teoride hesaplanan değerler tek bir tablo 4.15'te özetlenmiştir.

Tablo 4. 15 Uygulanan stres değerlerine göre kırılmanın gerçekleştiği ömür değerleri ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

Isıl İşlem Parametresi	$\sigma_{e\tilde{g}ilme}$ (MPa)	Deney			Teori	
		Ortalama Değer	Standart Sapma	Log (Ömür)	Ömür	Log (Ömür)
AlSi10MgMn (Döküm)	72	4941390	5195269	6,69	754329	5,88
AlSi10MgMn (Döküm)	85	96046	102997	4,98	324158	5,51
AlSi10MgMn (Döküm)	100	67287	63574	4,83	122327	5,09
AlSi10MgMn (Döküm)	150	4942	887	3,69	4750	3,68
AlSi10MgMn (Döküm)	180	1253	125	3,10	676	2,83
AlSi10MgMn (Döküm)	210	159	33	2,20	96	1,98
AlSi10MgMn + T5 (170°C)	72	687114	969796	5,84	1095249	6,04
AlSi10MgMn + T5 (170°C)	85	297478	280800	5,47	503443	5,70
AlSi10MgMn + T5 (170°C)	100	102363	15139	5,01	205331	5,31
AlSi10MgMn + T5 (170°C)	150	9448	29	3,98	10331	4,01
AlSi10MgMn + T5 (170°C)	180	2399	491	3,38	1718	3,24
AlSi10MgMn + T5 (170°C)	210	234	60	2,37	286	2,46
AlSi10MgMn + T5 (180°C)	72	2180217	3000654	6,34	1762176	6,25
AlSi10MgMn + T5 (180°C)	85	1389882	618065	6,14	882628	5,95
AlSi10MgMn + T5 (180°C)	100	294748	276939	5,47	397476	5,60
AlSi10MgMn + T5 (180°C)	150	25796	338,44	4,41	27824	4,44
AlSi10MgMn + T5 (180°C)	180	3287	216,06	3,52	5643	3,75
AlSi10MgMn + T5 (180°C)	210	807	324,57	2,91	1144	3,06
AlSi10MgMn + T5 (190°C)	72	1294633	1801343	6,11	1420344	6,15
AlSi10MgMn + T5 (190°C)	85	549028	766892	5,74	684246	5,84
AlSi10MgMn + T5 (190°C)	100	108835	124762	5,04	294600	5,47
AlSi10MgMn + T5 (190°C)	150	16035	2208	4,21	17754	4,25

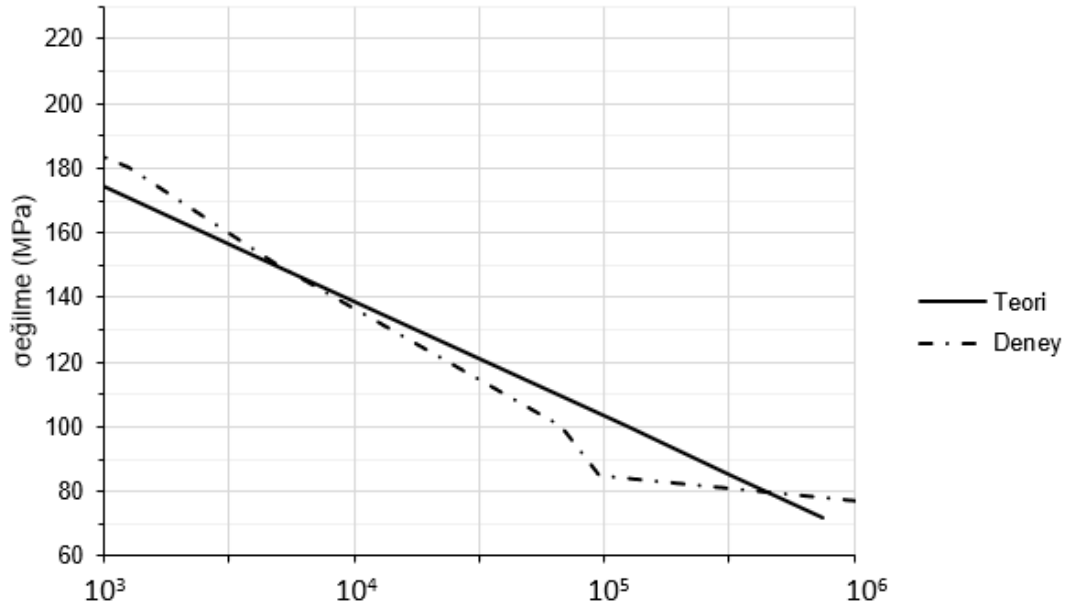
AlSi10MgMn + T5 (190°C)	180	3204	63	3,51	3291	3,52
AlSi10MgMn + T5 (190°C)	210	378	51	2,58	610	2,79

Gerilme-ömür grafikleri ve bir ısıtıl işlem parametresi için tablo 4.16, tablo 4.17, tablo 4.18, tablo 4.19 ile şekil 4.20, şekil 4.21, şekil 4.22 ve şekil 4.23'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 16. AlSi10MgMn (Döküm) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri

σ_{gerilme} (MPa)	Log (Ömür) Deney	Log (Ömür) Teori
72	6,69	5,88
85	4,98	5,51
100	4,83	5,09
150	3,69	3,68
180	3,10	2,83
210	2,20	1,98

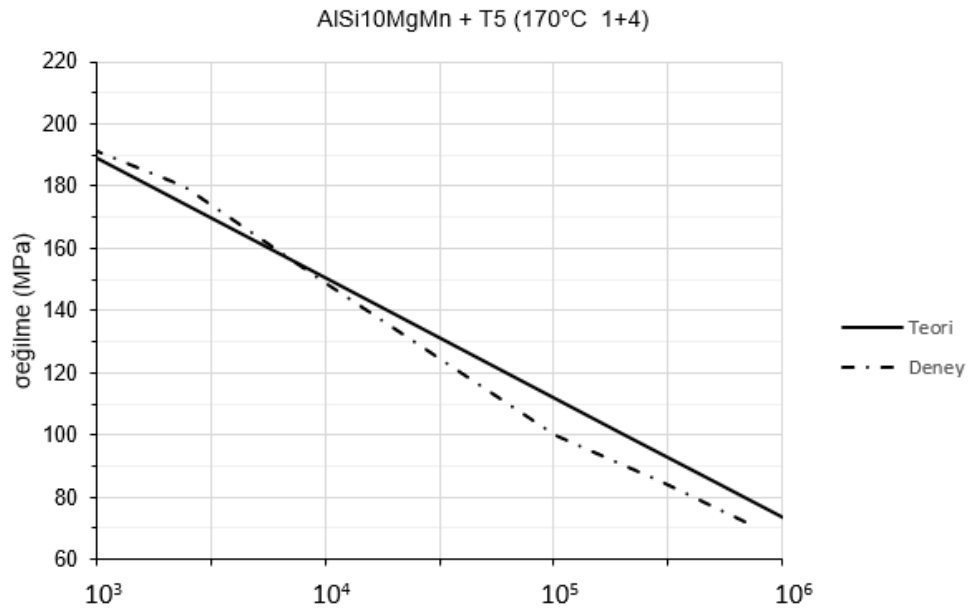
AlSi10MgMn (Döküm)



Şekil 4. 20. AlSi10MgMn (Döküm) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri grafiği

Tablo 4. 17. AlSi10MgMn + T5 (170°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri

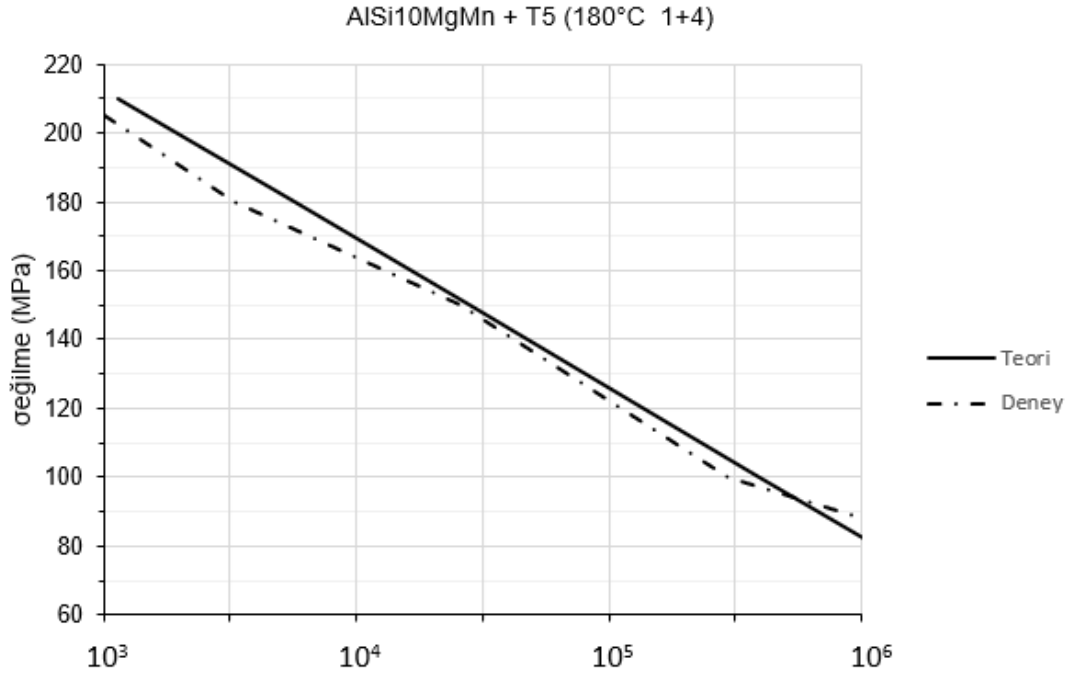
$\sigma_{\text{eğilme}}$ (MPa)	Log (Ömür) Deney	Log (Ömür) Teori
72	5,84	6,04
85	5,47	5,70
100	5,01	5,31
150	3,98	4,01
180	3,38	3,24
210	2,37	2,46



Şekil 4. 21. AlSi10MgMn + T5 (170°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri grafiği

Tablo 4. 18. AlSi10MgMn + T5 (180°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri

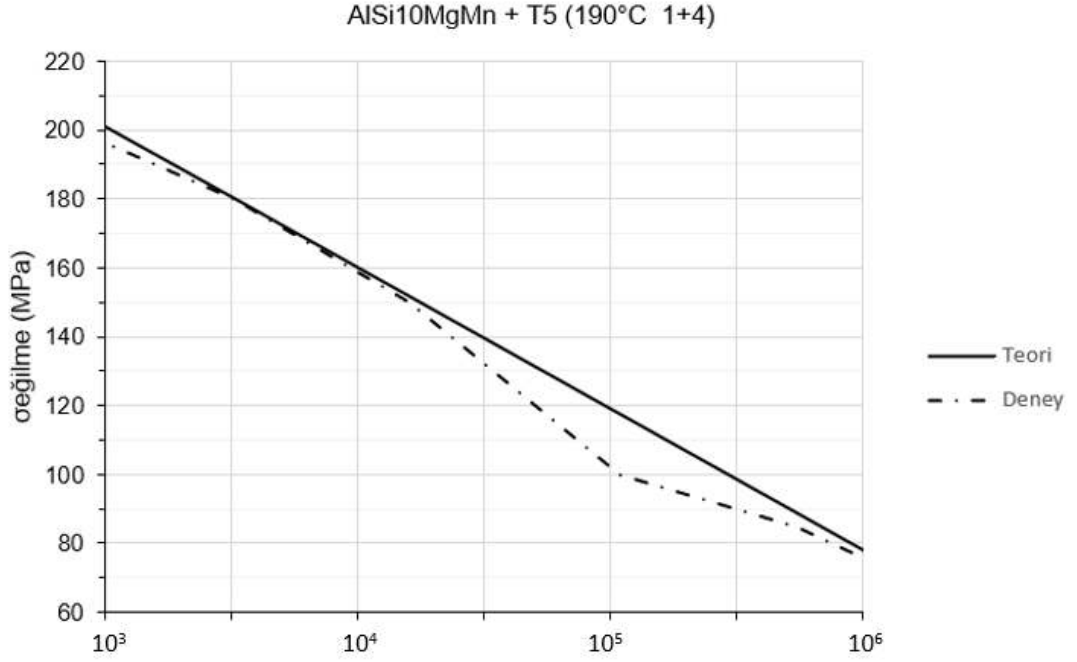
$\sigma_{\text{eğilme}}$ (MPa)	Log (Ömür) Deney	Log (Ömür) Teori
72	6,34	6,25
85	6,14	5,95
100	5,47	5,60
150	4,41	4,44
180	3,52	3,75
210	2,91	3,06



Şekil 4. 22. AlSi10MgMn + T5 (180°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri grafiğı

Tablo 4. 19. AlSi10MgMn + T5 (190°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri

σ_ğılme (MPa)	Log (Ömür) Deney	Log (Ömür) Teori
72	6,11	6,15
85	5,74	5,84
100	5,04	5,47
150	4,21	4,25
180	3,51	3,52
210	2,58	2,79



Şekil 4. 23. AlSi10MgMn + T5 (190°C) numunelerinin deneysel ve hesaplanmış logaritmik ömür değerleri grafiği

Yorulma testleri öncesi yapılmış olan çekme testleri sonuçlarına göre en yüksek çekme mukavemetine sahip numune 180°C’de ısıtıl işlem görmüş AlSi10MgMn olarak çıkmaktadır. Çekme mukavemeti karşılaştırmasına göre bu numune tipini 190°C ısıtıl işlem görmüş AlSi10MgMn, 170°C ısıtıl işleme maruz bırakılmış AlSi10MgMn alaşımı ve son olarak herhangi bir ısıtıl işleme maruz kalmamış AlSi10MgMn alaşımı takip etmektedir.

Elde edilmiş mekanik özellikler dahilinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda yorulma ömürleri de çekme testi sonucundaki sıralamaya paralel olacak şekilde gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Aynı şekilde matematiksel olarak hesaplanan denklemlerde elde edilen logaritmik ömür değerleri de yorulma testleri sonucunda elde edilen verilerle tutarlılık gösterdiği görülmektedir. Çalışma esnasında bazı numunelerde elde edilen verilerdeki sapmanın yüksek olma sebebi ise numune iç yapısındaki porozite yapısı olmasından kaynaklandığından yapılan hesaplamaların deneysel verilerle tutarlılık gösterdiği söylenebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, Wöhler eğrisini temel alarak alüminyum alaşımlar için oluşturulan denkleme göre gerilmeye bağlı yorulma ömürlerini elde etmeyi hedeflemiştir. Temel amaç, makine parçalarında meydana gelen deformasyon artışlarını izleyerek kalan yorulma ömürlerini belirlemek için basit bir yaklaşım geliştirmektir. Bu çalışmada, yorulma testlerinden elde edilen veriler kullanılarak gerilme-yorulma ömür ilişkisi analiz edilmiştir. Çalışılan eğri, gerilme seviyelerine bağlı olarak çevrim sayılarını gösteren bir grafikdir. Bu eğri üzerindeki verilerin analizi yapılarak, malzemenin yorulma ömrü ve gerilme seviyesine bağlı olarak dayanıklılığını belirlemek tez çalışmasının temel amacını oluşturmaktadır. Çalışmada gerilme büyüklüğüne bağlı ömür denklemleri çalışılmıştır. Bu denklemlerin doğrulanması amacıyla döner eğmeli yorulma test cihazı ile yorulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç dinamik yükle zorlanan makine elemanının bilinen bir gerilme değerindeki kalan ömür miktarını gözlemlemektir. Türetilen ömür denklemleri uygulanan gerilme büyüklüklerine göre farklı ısıtım şartlarında ısıtım işlem uygulanmış alüminyum alaşımı malzemeler için kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda yapılan hesaplamalar tutarlılık göstermiştir. Akma ve çekme dayanımı en yüksek değerlere sahip olan alaşımın ve optimal ısıtım uygulamasının en uzun yorulma ömrünü sağladığı gözlenmiş, buna karşılık, ısıtım işlem uygulanmamış alaşımın en düşük yorulma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Mikroyapı değerlendirmeleri, Mg_2Si çökeltilerinin oluşumu sonucunda, tüm ısıtım işlemli numunelerin, ısıtım işlem uygulanmamış numunelere kıyasla daha yüksek yorulma çevrimlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, yorulma çizgilerinin görsel olarak ısıtım işlemli numunelerde daha belirgin bir şekilde görüldüğü gözlenmiş ve bu da ısıtım işlemli numunelerin yorulma direncinin daha yüksek olduğunu işaret etmektedir. Sonuçlar, ısıtım işlem uygulamasının malzeme mikroyapısı ve yorulma ömrü üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ve alaşımın uygun ısıtım işlem koşulları altında en üstün performansını sergilediğini göstermektedir.

Otomotiv ve havacılık sektörleri gibi hareket iletiminin yoğun olduğu alanlarda ve makine tezgahlarında güç iletimi gibi uygulamalarda, makine parçaları sürekli dinamik gerilmeler altında çalışır. Bu sürekli gerilme altında olan parçalar, zamanla yorulma hasarı yaşayabilir. Bu tez çalışmasında, gerilmeye bağlı olarak malzemenin

ömür değerinin belirlenmesi, kırılma ve hasarların önceden tespit edilmesi ve önlenmesi temel hedeftir. İlerleyen çalışmalarda, deformasyon ölçümü temelli çalışan yorulma test makineleri de kullanılarak gerilme tabanlı yaklaşım ile yorulma analizlerinde bir arada kullanılmalıdır. Gerilme ölçümü ve kalan ömür değerleri arasında kurulacak doğru bir korelasyon, deneysel çalışmalarla desteklenerek, kaza, hasar, maddi kayıp ve diğer olumsuz durumların önlenmesine önemli katkı sağlayacaktır. Gerilme ölçümü, bir parçanın üzerindeki gerilme seviyelerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Deneysel çalışmalar, gerçek çalışma koşullarında parçaların gerilme-yorulma davranışını anlamak için önemlidir. Bu çalışmalarda, parçalar farklı gerilme düzeylerine maruz bırakılarak gerilme-yorulma testleri gerçekleştirilir. Bu testler, gerilme düzeyleri ve yorulma çevrimleri arasındaki ilişkiyi belirlemek ve gerilme-yorulma özelliklerini karakterize etmek için kullanılır. Deneysel çalışmaların sonuçları, gerilme ölçümüyle elde edilen verilerle karşılaştırılarak bir korelasyon kurulabilir. Bu korelasyon, belirli bir gerilme seviyesine maruz kalan bir parçanın kalan ömür değerini tahmin etmek için kullanılabilir. Bu şekilde, parçanın gerilme düzeyleri izlenebilir ve hasar riski önemli ölçüde azaltılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design, vol. 4, no. 9. 2011.
- [2] L. Lattanzi, A. Fabrizi, A. Fortini, M. Merlin, and G. Timelli, "Effects of microstructure and casting defects on the fatigue behavior of the high-pressure die-cast AlSi9Cu3(Fe) alloy," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 7, no. September, pp. 505–512, 2017, doi: 10.1016/j.prostr.2017.11.119.
- [3] H. Mayer, M. Papakyriacou, B. Zettl, and S. E. Stanzl-Tschegg, "Influence of porosity on the fatigue limit of die cast magnesium and aluminium alloys," *Int. J. Fatigue*, vol. 25, no. 3, pp. 245–256, 2003, doi: 10.1016/S0142-1123(02)00054-3.
- [4] Z. Hu, L. Wan, S. Lü, P. Zhu, and S. Wu, "Research on the microstructure, fatigue and corrosion behavior of permanent mold and die cast aluminum alloy," *Mater. Des.*, vol. 55, no. March 2014, pp. 353–360, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.10.012.
- [5] F. Liu, H. Zhao, R. Yang, and F. Sun, "Microstructure and Mechanical Properties of High Vacuum Die-Cast AlSiMgMn Alloys at as-Cast and T6-Treated Conditions," *Key Eng. Mater.*, vol. 368-372 PA, pp. 1788–1790, 2008, doi: 10.4028/0-87849-473-1.1788.
- [6] L. Wan, Z. Hu, S. Wu, and X. Liu, "Mechanical properties and fatigue behavior of vacuum-assist die cast AlMgSiMn alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 576, no. August 2013, pp. 252–258, 2013, doi: 10.1016/j.msea.2013.03.042.
- [7] F. Liu, H. Zhao, R. Yang, and F. Sun, "Crack propagation behavior of die-cast AlSiMgMn alloys with in-situ SEM observation and finite element simulation," *Mater. Today Commun.*, vol. 19, no. November 2018, pp. 114–123, 2019, doi: 10.1016/j.mtcomm.2019.01.009.
- [8] M. Leitner, C. Garb, H. Remes, and M. Stoschka, "Microporosity and statistical size effect on the fatigue strength of cast aluminium alloys EN AC-45500 and 46200," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 707, no. September, pp. 567–575, 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.09.023.
- [9] Q. Wan, H. D. Zhao, and J. L. Ge, "Effect of micro-porosities on fatigue behavior of aluminum die castings," *Zhongguo Youse Jinshu Xuebao/Chinese J. Nonferrous Met.*, vol. 25, no. 3, pp. 568–574, 2015.
- [10] M. Avalle, G. Belingardi, M. P. Cavatorta, and R. Doglione, "Casting defects and fatigue strength of a die cast aluminium alloy: A coMParison between standard specimens and production components," *Int. J. Fatigue*, vol. 24, no. 1, pp. 1–9, 2002, doi: 10.1016/S0142-1123(01)00112-8.
- [11] W. Li, H. Cui, W. Wen, X. Su, and C. Engler-Pinto, "Very High Cycle Fatigue of Cast Aluminum Alloys under Variable Humidity Levels," *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 8, no. 2, pp. 3–9, 2015, doi: 10.4271/2015-01-0556.
- [12] A. Nourian-Avval and A. Fatemi, "Fatigue Design with High Pressure Die Cast Aluminum Including the Effects of Defects, Section Size, Stress Gradient, and Mean Stress," *Mater. Today Commun.*, vol. 25, no. August, p. 101567, 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101567.
- [13] A. Nourian-Avval and A. Fatemi, "Fatigue performance and life prediction of cast aluminum under axial, torsion, and multiaxial loadings," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 111, no. November 2020, p. 102842, 2021, doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102842.

- [14] D. Tomažinčič, M. Borovinšek, Z. Ren, and J. Klemenc, "Improved prediction of low-cycle fatigue life for high-pressure die-cast aluminium alloy AlSi9Cu3 with significant porosity," *Int. J. Fatigue*, vol. 144, no. November 2020, 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106061.
- [15] J. M. Boileau and J. E. Allison, "The effect of solidification time and heat treatment on the fatigue properties of a cast 319 aluminum alloy," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 34 A, no. 9, pp. 1807–1820, 2003, doi: 10.1007/s11661-003-0147-4.
- [16] P. Osmond, V. D. Le, F. Morel, D. Bellett, and N. Saintier, "Effect of porosity on the fatigue strength of cast aluminium alloys: From the specimen to the structure," *Procedia Eng.*, vol. 213, no. 2017, pp. 630–643, 2018, doi: 10.1016/j.proeng.2018.02.059.
- [17] B. Eryürek, "Hasar analizi." pp. 1–171, 1993.
- [18] U. Zerbst, M. Madia, C. Klinger, D. Bettge, and Y. Murakami, "Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. I: Basic aspects," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 97, no. January, pp. 777–792, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.055.
- [19] K. S. Chan, "Roles of microstructure in fatigue crack initiation," *Int. J. Fatigue*, vol. 32, no. 9, pp. 1428–1447, 2010, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2009.10.005.
- [20] A. Tauscher, Herbert; (Güleç, Şefik; Aran, "Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanım, Malzeme Davranışı, Biçim Etkisi ve Hesaplama Yöntemleri," 1983.
- [21] G. E. SAATÇI and N. TAHRALI, "Birikimli Hasar Teorileri ve Yorulma Catlagina Gore Omur Degerlendirmeleri," *Havacılık ve Uzay Teknol. Derg.*, vol. 1, no. 2, pp. 33–39, 2003, [Online]. Available: <http://www.hho.edu.tr/hutendergi/2003Temmuz/07.pdf>.
- [22] H. J. Grover, "Fatigue of aircraft structures," *Int. Metall. Rev.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–350, 1966, doi: 10.1179/imtlr.1972.17.1.240.
- [23] G. E. Dieter, D. Bacon, S. M. Copley, C. a Wert, and G. L. Wilkes, *Adapted by*. 1988.
- [24] S. Mckelvey and a L. I. Fatemi, "Effect of forging surface on fatigue behaviour of steels: A literature review," 28th Forg. Ind. Tech. Conf., 2011.
- [25] M. Meyers; K. Chawla, *Mechanical behavior of materials*, vol. 9780521846, no. 3. 2009.
- [26] N.Tahrallı; E.Atık; C. Çivi, *Konstrüksiyon elemanlarında Güvenirlik ve Ömür Hesapları*, vol. 1, no. 254. 2017.
- [27] Wagener, R., Scurria, M., Kaufmann, H., & Melz, T. (2023). Influence on the fatigue behavior of additively manufactured aluminum structures. Fraunhofer Institute for Structural Durability and System Reliability
- [28] J. G. Kaufman and E. L. Rooy, *Aluminum Alloy Properties , Processes , and Applications*. 2004.
- [29] M. Conserva, "The High Pressure Die Casting Process :: Total Materia Article," 2007, [Online]. Available: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=360>.
- [30] J. R. Brown, "Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook," vol. 11, pp. 15–280, 1994.
- [31] İ. Özbay et al., "Aluminium High Pressure Die Casting Application on Rear Frame Rails," *Eur. Mech. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 62–67, 2019, doi: 10.26701/ems.422299.

- [32] E. ALTINOK, H. KAYSERİLİ, A. MERT, and S. A. ALTINEL, "Lightweight Door Ring Solution in Car Body Development," *Int. J. Adv. Automot. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 131–136, 2017, doi: 10.15659/ijaat.17.07.529.
- [33] T. A. Başer, "Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı," *Mühendis ve Makina*, vol. 53, no. 635, pp. 51–58, 2012.
- [34] M. Dünder and G. Güngör, "Otomotiv sektöründe alüminyum uygulamaları ve sürekli döküm tekniği ile üretilmiş alüminyum levha alaşımları," [Online]. Available: <http://www.assanaluminyum.com>.
- [35] C.-J. Chen, "Optimization of Mechanical Properties in A356 via Simulation and Permanent Mold Test-Bars," *Case West. Reserv. Univ.*, pp. 1–102, 2014.
- [36] A. Eker, "Al ve Alaşımları."
- [37] E. Okumuş, "Sürekli Levha Döküm Tekniğiyle Üretilmiş 1XXX - 3XXX VE 5XXX Alaşımlı Levhaların Mikro Yapı Karakterizasyonu," 2003.
- [38] E. D. PARMAK and B. KÜÇÜKELYAS, "ÇÖKELME SERTLEŞMESİ," pp. 1–7, 2017.
- [39] R. Franke, D. Dragulin, A. Zovi, and F. Casarotto, "Progress in ductile aluminium high pressure die casting alloys for the automotive industry," *Metall. Ital.*, vol. 99, no. 5, pp. 19–24, 2007.
- [40] Rheinhelden, "Primary Aluminium, Alloys for High Pressure Die Casting," 2015.
- [41] H. E. Boyer, "Fatigue testing," *SM Int.*, 1986, doi: 10.1002/mus.880131311.
- [42] B. Aktaş and A. Açıkgoz, "Mühendislik Laboratuvarı Dersi-Malzeme Laboratuvarı."
- [43] M. Burhan ve K. Çavdar, "Eksantrik Yay Yorulma Cihazının Tasarımı ve İmalatı" *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 15, Sayı 1, 2010.
- [44] P.V. Kulkarni, P.J.Sawant and V.V. Kulkarni, "Design and Development of Plane Bending Fatigue Testing Machine for Composite Material" *Materials Today: Proceedings*, Volume 5, Issue 5, Part 2, 2018, Pages 11563-11568, ISSN 2214-7853
- [45] A. Carvalho, M. Freitas, L. Reis, D. Montalvão and M. Fonte, "Rotary Fatigue Testing Machine to Determine the Fatigue Life of NiTi alloy Wires and Endodontic Files", *Procedia Engineering*, Volume 114, 2015, Pages 500-505, ISSN 1877-7058
- [46] C. Ghielmetti, R. Ghelichi, M. Guagliano, F. Ripamonti, S. Vezzù, "Development of a fatigue test machine for high frequency applications", *Procedia Engineering*, Volume 10, 2011, Pages 2892-2897, ISSN 1877-7058.
- [47] Balcioğlu, H. & Sakin, Raif & Dumanay, Akif & Gun, Halit. (2018). "Kompozit Levhalar için Ankastre-Tip Eğilmeli, Çok Numuneli Yorulma Test Makinesinin Geliştirilmesi", *Gümüşhane Üniversitesi FBE Dergisi*, 8. 1-17. 10.17714/gumusfenbil.304488.
- [48] Kim, S.-W.; Lee, S.-J.; Kim, D.-U.; Kim, M.-S. Experimental Investigation on Tensile Properties and Yield Strength Modeling of T5 Heat-Treated Counter Pressure Cast A356 Aluminum Alloys. *Metals* 2021, 11, 1192.
- [49] D. Gönen, A. Oral, M. Cemal Çakır.(2008)."Çift sıkıştırma oranlı yay yorulma test makinası tasarım ve imalatı", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*
- [50] Xiu-Yang Fang, Yong-Xiang Zhao, Huan-Wei Liu, "Study on fatigue failure mechanism at various temperatures of a high-speed railway wheel steel", *Materials Science and Engineering: A*, Volume 696, 2017, Pages 299-314, ISSN 0921-5093.

- [51] American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials (Standard No. ASTM E466-15). ASTM International.
- [52] Liu, J.A., Song, D., Zhang, L.R., Yang, X.Z., Zhu, X.Y., Sun, W.B., & Chen, F.Y. (2021). Microstructure and compressive properties of solution heat-treated magnesium-Mg₂Si in-situ composite foams after complex modification.
- [54] J. Schijve, *Fatigue structures and Materials* , vol. 2, 2003.

