



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



[YÜKSEK LİSANS TEZİ]

**[TERMOMEKANİK PROSESLER İLE ÜRETİLEN YASSI
ALÜMİNYUM ÜRÜNLERİN MUKAVEMET DİYAGRAMLARININ
OLUŞTURULMASI]**

[Sadık Kaan İPEK]

[Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı]

[Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı]

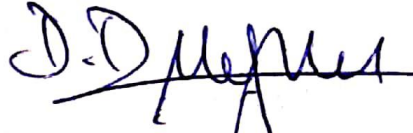
DANIŞMAN
[Doç. Dr.] Derya DIŞPINAR

[Kasım, 2018]

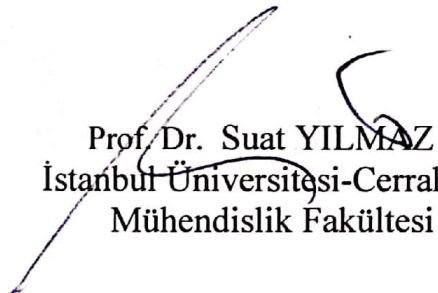
İSTANBUL

Bu çalışma 21.12.2018 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliğı Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliğı Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.


TEZ JÜRİSİ



Doç. Dr. Derya DİŐPINAR
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Suat YILMAZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Kimya-Metalurji Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

[Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin numaralı projesi ile desteklenmiştir. |

[Bu tez, numaralı projesi ile desteklenmiştir. |

ÖNSÖZ

Öğrenilmiş bir bilgi uygulandığı takdirde kalıcılık sağlamaktadır. Elde edilmiş bilgi ve uygulama tecrübe olarak hafızamızda daha büyük yer tutacak ve bu işin uygulanması sırasındaki deneyimlerimiz, bize bu işin tekrarlanışında yol gösterecektir. Uygulama birden fazla tekrarlandığı takdirde bu işin daha az iş gücü ve daha hızlı olarak nasıl yapılabileceği düşünülecek ve uygulama verimliliği için çalışmalar gerçekleştirilecektir. Nitekim verimlilik için ortaya koyduğumuz her bir yenilikçi ve hız artırıcı yaklaşım, süreçte iyileşmeler sağlarken, devrimsel yenilikler hakkında düşünmeden harcadığımız zaman dilimleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Gerçekleştirilecek bir yenilik sadece araştırma ile değil ilham, çıkarım ve deneyimler ile de uygulanabilecek mesleki yeterliliğe erişilmelidir. Bu yeterliliğe erişme yolunda kazanılmış bilgi ve tecrübelerin kolay elde edilmediği de bilinerek paylaşım yoluyla aktarım tüm nesiller arasında sağlıklı bir şekilde sağlanmalıdır.

Hayatın sizi nasıl yönlendirdiği değil, sizin hayatta neler görmek istediğinize göre yaşamınızın ve çevrenizin şekillendiği malumatını çocukluğumda bir kazanım haline getirmemi sağlayan ve bugüne kadar desteklerini sürekli olarak hissettiğim aileme (Sırma – Mustafa İpek, Hakan, Neslihan ve Volkan İpek) ve ailemden biri olarak hissettiğim Emel Çalışkan'a sonsuz teşekkür ederim.

Üniversiteye başladığım andan itibaren mesleğe olan bakış açımı şekillendiren, enerjisi ve yaklaşımıyla rol ve model olarak benimsediğim Sayın Doç Dr. Derya Dışpınar'a bana kattığı değerler bütünü sebebiyle teşekkürlerimi sunarım.

Sanayi içerisinde yer aldığım ilk yıllarımı beraber geçirdiğim, akademik bakış açısını kaybetmeden çalışmama fırsat sağlayan ve bu çalışmalarla da değerler yaratılabileceğini gösteren Sayın Ali Ulus'a ve çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen tüm ekip arkadaşlarıma kattıkları değerler için teşekkür ederim.

Kasım 2018

[Sadık Kaan İPEK]

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1 ALÜMİNYUM ALAŞIM DİZAYNI VE YAPISAL ÖZELLİKLERE ALAŞIMLARIN ETKİSİ.....	3
2.2. İKİZ MERDANELİ DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM YASSI MAMÜL ÜRETİM SÜRECİ	7
2.2.1. İkiz Merdaneli Döküm (İMD) Prosesi	8
2.2.2 Soğuk Hadde Prosesi.....	11
2.2.3 Isıl İşlem (Tavlama)	16
2.3. LEVHA ÜRÜNLERDE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ.....	22
2.3.1 Sertlik Testi	23
2.3.2 Çekme Testi.....	25
2.4. DENEY SERİLERİNDE VERİLERİ REGRESYON ANALİZİ İLE SAYISAL MODELLEME	27
2.4.1 Anova Tablosu Yardımı İle Modelin Değerlendirilmesi (Tek Yönlü Varyans Analizi)	28
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	30
4. BULGULAR.....	36
4.1 ÇEKME TESTİ DENEY SONUÇLARI.....	36
4.1.1 Isıl İşlem Sıcaklığı Ve Deformasyon Yüzdesine Bağlı Çekme Mukavemeti Değerlerinin Yorumlanması	36
4.1.2 Isıl İşlem Sıcaklığı Ve Deformasyon Yüzdesine Bağlı Akma Mukavemeti Değerlerinin Yorumlanması	45
4.1.3. Isıl İşlem Sıcaklığı Ve Deformasyon Yüzdesine Bağlı Uzama Yüzdesinin Yorumlanması.....	52

4.2 ERICHSEN DERİN ÇEKİLEBİLİRLİK TEST SONUÇLARI	59
4.3 SERTLİK (HB) TEST SONUÇLARI.....	63
4.4 MİKROYAPI ANALİZLERİ	69
4.5 ELEKTRİK İLETKENLİĞİ SONUÇLARI	74
4.6 REGRESYON ANALİZLERİ VE MODEL VERİLERİNİN İNCELENMESİ	77
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	85
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ	93

|



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.2.1: Alüminyum levha ürünlerin kullanım alanları ve yüzde kullanım miktarları [10].....	6
Şekil 2.2.2: İkiz Merdaneli Döküm ile alüminyum yassı mamül üretimine ait süreç şeması.	8
Şekil 2.2.3: İkiz merdaneli döküm hattı genel hat şeması [11]	9
Şekil 2.2.4: Katılaşmanın gerçekleştiği döküm merdanelerinin şematik gösterimi [12].....	10
Şekil 2.2.5: Merdane yüzeyi ve sıvı metal havuzu arasında oluşan katılaşma profili [13]	11
Şekil 2.2.6: Soğuk hadde merdanelerinin dizilimi ve yük bölgeleri [15].....	12
Şekil 2.2.7: Haddeleme işlemi sonrasında döküm profilinin oluşturduğu kalınlık dağılımı ve iç gerilimin düzgünlüğe etkisi [15].....	13
Şekil 2.2.8: Merdane aralığında malzemenin gösterdiği akma davranışı, merdane ve malzeme arasındaki hız farklılıkları [18]	14
Şekil 2.2.9: Hadde yönüne dik kesitte tanelerde oluşan deformasyon mekanizması [18].....	14
Şekil 2.2.10: Hadde yönüne bağlı olarak malzemenin kayma düzlemleri ve tanelerin deformasyon yönlenmeleri [19]	15
Şekil 2.2.11: Soğuk haddeleme sonrasında tanelerin yönlenmesi ve farklı açılı kesitlerden alınan tanelerin vektörel pozisyonlarının temsili hacim elemanları (RVE) görseli; (a) ve (b) deforme edilmemiş kesit, (c) deforme edilmiş malzemenin farklı açılardaki tane yapıları. [19]	16
Şekil 2.2.12: Isıl işlem sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak malzeme mukavemetindeki değişimler ve mukavemet değişim mekanizmaları [23]	18
Şekil 2.2.13: Dislokasyon düzlemlerinin örtüşmesi ve tane sınırı oluşum mekanizmasının şematik gösterimi (düşük açılı ayrılmış ve birleşmiş dislokasyon bölgeleri) [19].....	19
Şekil 2.2.14: Birim kristal açığına bağlı olarak yönlenmeden sapmanın tane sınırı enerjisine ve elastik modüle etkisi [20]	20
Şekil 2.2.15: Yeniden kristallenme sıcaklığı ve tane boyutunun deformasyona bağlı şematik gösterimi [23].....	21

Şekil 2.2.16: Alüminyum levha ürünlerin şekillendirme kabiliyetlerini etkileyen parametreler.....	22
Şekil 2.2.17: Batıcı uç tipleri ve sertlik değerlerinin şematik gösterimi	23
Şekil 2.2.18: Brinell sertlik ölçümü ve hesaplama yöntemi	24
Şekil 2.2.19: Vickers sertlik ölçümü ve hesaplama yöntemi.....	24
Şekil 2.2.20: Çekme test numunesi ve test uygulama sırasında çekme diyagramında oluşan bölge tanımlamaları [26].....	25
Şekil 3.1: SpectroLAB LA0LC00A marka optik emisyon cihazı ve alüminyum spektro numuneleri.....	31
Şekil 3.2: Rulo döküm esnasında numune alım bölgelerinin şematik gösterimi	31
Şekil 3.3: Prototip hadde ile ikiz merdaneli dökülmüş levhaların haddelenmesi.....	32
Şekil 3.4: Çekme numunesi basma presleri ve numune ölçülerinin şematik gösterimi.	32
Şekil 3.5: Nabertherm marka laboratuvar tipi ısıtma işlem fırını.....	33
Şekil 3.6: Zwick/Roell Z050 TH çekme ve erichsen test modüllü test cihazı.....	34
Şekil 3.7: Olympus optik mikroskop ve Nikon SMZ 745 stereo mikroskop.	35
Şekil 4.1: Alaşım serilerinin deformasyon yüzdesine bağlı çekme mukavemeti değişim grafiği	36
Şekil 4.2: 1050 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı çekme mukavemeti değişimi.....	37
Şekil 4.3: 3005 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı çekme mukavemeti değişimi.....	38
Şekil 4.4: 3105 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı çekme mukavemeti değişimi.....	38
Şekil 4.5: 8006 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı çekme mukavemeti değişimi.....	39
Şekil 4.6: Isıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak çekme mukavemeti değişimi	40
Şekil 4.7: 1050 seri alüminyum alaşımı çekme mukavemetinin ısıtma işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	41
Şekil 4.8: 3005 seri alüminyum alaşımı çekme mukavemetinin ısıtma işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	42

Şekil 4.9: 3105 seri alüminyum alaşımı çekme mukavemetinin ısıtılma sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	43
Şekil 4.10: 8006 seri alüminyum alaşımı çekme mukavemetinin ısıtılma sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	44
Şekil 4.11: Alaşım serilerinin deformasyon yüzdesine bağlı olarak akma mukavemeti değişimi.	45
Şekil 4.12: 1050 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı akma mukavemeti değişimi.....	46
Şekil 4.13: 3005 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı akma mukavemeti değişimi.....	46
Şekil 4.14: 3105 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı akma mukavemeti değişimi.....	47
Şekil 4.15: Isıtılma sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak akma mukavemeti değişimi	48
Şekil 4.16: 1050 serisi alüminyum ürünlerin ısıtılma sıcaklığı ve deformasyona bağlı akma mukavemeti sonuçları	49
Şekil 4.17: 3005 serisi alüminyum ürünlerin ısıtılma sıcaklığı ve deformasyona bağlı akma mukavemeti sonuçları	50
Şekil 4.18: 3105 serisi alüminyum ürünlerin ısıtılma sıcaklığı ve deformasyona bağlı akma mukavemeti sonuçları	50
Şekil 4.19: 8006 serisi alüminyum ürünlerin ısıtılma sıcaklığı ve deformasyona bağlı akma mukavemeti sonuçları	51
Şekil 4.20: Alaşım serilerinin deformasyon yüzdesine bağlı olarak uzama davranışının değişimi.	52
Şekil 4.21: 1050 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı yüzde uzama değişimi	53
Şekil 4.22: 3005 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı yüzde uzama değişimi	53
Şekil 4.23: 3105 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı yüzde uzama değişimi	54
Şekil 4.24: 8006 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı yüzde uzama değişimi	54
Şekil 4.25: Isıtılma sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak yüzde birim şekil değişimi (%)	55

Şekil 4.26: 3005 seri alüminyum alaşımı uzama yüzdesinin ısı işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	57
Şekil 4.27: 3105 seri alüminyum alaşımı uzama yüzdesinin ısı işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	58
Şekil 4.28: 8006 seri alüminyum alaşımı uzama yüzdesinin ısı işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.....	58
Şekil 4.29: Isıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak erichsen testi (Hmax).....	60
Şekil 4.30: 1050 seri alüminyum alaşımının yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı erichsen testi sonuçları	61
Şekil 4.31: 3005 seri alüminyum alaşımının yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı erichsen testi sonuçları	61
Şekil 4.32: 3105 seri alüminyum alaşımının yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı erichsen testi sonuçları	62
Şekil 4.33: 8006 seri alüminyum alaşımının yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı erichsen testi sonuçları	62
Şekil 4.34: Isıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak sertlik ölçüm sonuçları (HB)	64
Şekil 4.35: 1050 seri alüminyum alaşımının yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı sertlik (HB) testi sonuçları	65
Şekil 4.36: 3005 seri alüminyum alaşımının yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı sertlik (HB) testi sonuçları	66
Şekil 4.37: 3105 seri alüminyum alaşımının yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı sertlik (HB) testi sonuçları	67
Şekil 4.38: 8006 seri alüminyum alaşımının yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı sertlik (HB) testi sonuçları	68
Şekil 4.39: %65 deformasyona tabi tutulmuş 3005 serisi alüminyum alaşımının (a) 300 °C ve (b) 440 °C sıcaklıklardaki mikro yapı görüntüleri.....	69
Şekil 4.40: %65 deformasyona tabi tutulmuş 3005 serisi alüminyum alaşımının 480 °C sıcaklıkta ısı işlem sonrası mikro yapı görüntüsü	70
Şekil 4.41: %65 deformasyon uygulanmış ve (a) 300°C ve (b) 440 °C ısı işlem görmüş 3005 alüminyum levhanın erichsen derin çekilebilirlik test numunelerindeki yüzey görselleri.....	70
Şekil 4.42: %35 deformasyona sahip 1050 alaşımının (a) 220°C, (b) 240°C, (c) 350°C, (d) 420°C sıcaklıklarda ısı işlemleri sonrasında elde edilen mikroyapı görüntüleri.....	71

Şekil 4.43: 3105 alaşımlı serinin %85 deformasyon oranındaki 260°C ve 300°C sıcaklıklardaki mikroyapı görüntüleri	72
Şekil 4.44: 8006 alaşımlı serinin %65 deformasyon oranındaki (a) 360°C ve (b) 400°C sıcaklıklardaki mikroyapı görüntüleri	73
Şekil 4.45: 8006 alaşımlı serinin %65 deformasyon oranındaki (a) 360°C ve (b) 400°C sıcaklıklardaki erichsen test numunesi görüntüleri	73
Şekil 4.46: 1050 alaşım serili alüminyum ürünlerin farklı yüzde deformasyon oranına ve ısıtılma sıcaklığına bağlı elektrik iletkenlik değerleri.....	74
Şekil 4.47: 3105 alaşım serili alüminyum ürünlerin farklı yüzde deformasyon oranına ve ısıtılma sıcaklığına bağlı elektrik iletkenlik değerleri.....	75
Şekil 4.48: 3005 alaşım serili alüminyum ürünlerin farklı yüzde deformasyon oranına ve ısıtılma sıcaklığına bağlı elektrik iletkenlik değerleri.....	76
Şekil 4.49: 8006 alaşım serili alüminyum ürünlerin farklı yüzde deformasyon oranına ve ısıtılma sıcaklığına bağlı elektrik iletkenlik değerleri.....	77
Şekil 4.50: 1050 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı çekme mukavemetinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği.....	78
Şekil 4.51: 3005 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı çekme mukavemetinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği.....	79
Şekil 4.52: 3105 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı çekme mukavemetinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği.....	79
Şekil 4.53: 8006 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı çekme mukavemetinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği.....	80
Şekil 4.54: 1050 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı sertlik değerlerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği.....	81
Şekil 4.55: 3005 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı sertlik değerlerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği.....	81
Şekil 4.56: 3105 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı sertlik değerlerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği.....	81
Şekil 4.57: 8006 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı sertlik değerlerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği.....	82
Şekil 4.58: 1050 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği	82
Şekil 4.59: 3005 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği	83

- Şekil 4.60: 3105 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği83
- Şekil 4.61: 8006 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği83
- Şekil 4.62: 3005 alaşım %65 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği84



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1: “AA” alüminyum alaşım dizaynı ve temel alaşım elementleri.....	4
Tablo 2: Alaşım serilerine uygulanan deformasyon miktarı ve numune kalınlıkları	30
Tablo 3: Alaşım serilerinin deformasyon oranı değişkeni ile doğrusal regresyon denklemlerindeki eğim ve sabit katsayıları.	84



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat Derece
N	: Newton
%	: Yüzde
σ_x	: Malzeme Akma Kuvveti
σ_e	: Akma Mukavemeti
h	: Malzeme Kalınlığı
v	: Malzeme Hızı
α	: Deformasyon Açısı
μ	: Sürtünme Katsayısı
α	: Alfa
b	: Burgers Vektörü
φ	: Tane Sınırı Enerjisi
θ	: Düzlemden Açısal Sapma
Al	: Alüminyum
Fe	: Demir
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
Mg	: Magnezyum
Cu	: Bakır
Zn	: Çinko
Ti	: Titanyum
MS/m	: Milisiemens/metre

Kısaltmalar	Açıklama
İMD	: İkiz Merdaneli Döküm
OES	: Optik Emisyon Spektrometresi
MPa	: Mega Paskal (N/mm^2)
mm	: Milimetre
AA	: The Aluminum Association

SKÇ	: Stress Korozyonu Çatlağı
ANOVA	: Analysis of Variance
KTR	: Regresyon kareler toplamı
KTG	: Genel kareler toplamı
OKE	: Ortalama hataların kareler toplamı



ÖZET

[YÜKSEK LİSANS TEZİ]

[TERMOMEKANİK PROSESLER İLE ÜRETİLEN YASSI ALÜMİNYUM ÜRÜNLERİN MUKAVEMET DİYAGRAMLARININ OLUŞTURULMASI]

[Sadık Kaan İPEK]

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

[Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı]

Danışman : Doç. Dr. Derya DIŞPINAR

[Alüminyum yassı mamül üretim süreçleri sonrasında malzemelerin nihai mekanik özellikleri kullanım alanları açısından oldukça önemli bir değişkendir. Üretim süreçlerinin modellenmesi ile istenilen süreç parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilebilir. Bu tez çalışmasında, ikiz merdaneli döküm yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen 1050, 3005, 3105, 8006 alüminyum ticari alaşımlarına, döküm kalınlıklarından itibaren %35'den % 95'e kadar farklı deformasyon oranlarında haddeleme işlemi ve oda sıcaklığından 480 °C'ye kadar farklı sıcaklıklarda tavlama işlemi uygulanmıştır. Farklı hadde ve tav prosesleri uygulanan malzemelere çekme mukavemeti, sertlik ve elektrik iletkenliği testleri yapılmıştır. Şekil alma kabiliyetleri, Erichsen testi ile incelenmiştir. Deneylerin sonucunda malzemelerin üretim süreçlerine bağlı olarak mekanik mukavemet sınır değerleri oluşturulmuş ve regresyon modelleri yardımıyla incelenerek süreç optimizasyonu yapılmıştır.]

Ekim 2018, [111] sayfa.

Anahtar kelimeler: [İkiz Merdaneli Döküm, Alüminyum Dövme Alaşımları, Isıl İşlem Proses Dizaynı, Soğuk Haddeleme Proses Dizaynı, Mekanik Özellikler, Şekillendirilebilirlik, Regresyon Analizi]

SUMMARY

[M.Sc. THESIS]

**[CREATION OF STRENGTH DIAGRAMS OF ALUMINUM FLAT
PRODUCTS, DEPENDENT ON THE DIFFERENT
THERMOMECHANICAL PROCESSES]**

[Sadık Kaan İPEK]

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

[Department of Metallurgical and Materials Engineering]

Supervisor : [Assoc. Prof. Dr.] [Derya DIŞPINAR]

[The final mechanical properties of the products obtained after the production processes of aluminum flat products are a very important variable in terms of the final usage areas. Optimization of the desired process parameters can be realized by modeling the production processes. In this thesis study, it is aimed to investigate the effect of cold rolling and annealing process on the 1050, 3005, 3105, 8006 aluminum commercial alloys produced by twin roll casting. Cold rolling process were applied at different deformation rates between 25% and 95% from the casting thicknesses. Also annealing processes were applied between 220 and 480 degrees were obtained at 20 degree intervals. Tensile strength, hardness and electrical conductivity have been carried out on materials subjected to different cold rolling and annealing processes. Formabilities of materials were examined with the Erichsen test. As a result of the experiments, mechanical strength limit values were obtained depending on the different cold rolling and annealing processes of the materials and process optimization was carried out by examining them with the help of regression models.]

October 2018, [111] pages.

Keywords: [Twin Roll Casting, Wrought Aluminum Alloys, Annealing Process Design, Cold Rolling Process Design, Mechanical Properties, Formability Properties, Regression Analysis]

1. GİRİŞ

Alüminyum düşük ergime sıcaklığı, yüksek akışkanlık özellikleri, yüksek korozyon özelliği ve şekil değiştirme kabiliyetinin iyi olması sebebiyle farklı kullanım alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Tercih edilmesindeki bir diğer sebep ise düşük yoğunluğa sahip olması dolayısı ile diğer metalik malzemelere göre fiyat avantajını elinde bulundurması ve geri dönüşüm veriminin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Alüminyumun yapısal özellikleri kullanım ihtiyacına göre kimyasal kompozisyon ve proses parametrelerindeki farklılıklar ile değiştirilebilmektedir [1].

İkiz merdaneli döküm yöntemi, dar katılma aralığına sahip alüminyum alaşımların, yassı mamül olarak üretilmesinde kullanılan yöntemlerden biridir. Yassı mamül ürünleri ayrıca dikey soğutmalı döküm yöntemi ile de üretilebilmektedir. İki yöntem arasındaki temel proses değişkenleri malzemenin mekanik özelliklerinde farklılaşmalara sebebiyet vermektedir. Bu farklılaşmalar malzemelerin üretimindeki katılma rejimi, deformasyon sıcaklığı, toplam deformasyon miktarı, tane yönelmesi ve yeniden kristalleşme kinetiği gibi faktörler sebebiyle gerçekleşmektedir [2]. İMD yöntemi ile üretilen alüminyum ürünlerinin dar katılma aralıklarına sahip olması ve üretilen ticari alaşımların dar tolerans aralıklarında standartlaştırılması üretim parametrelerinin standartlaşmasının önünü açmaktadır. Yassı mamül olarak üretilen alüminyum ürünler farklı kullanım alanlarında yarı mamül olarak tedarik edilmekte ve genel olarak mekanik dayanım ve şekillendirme kabiliyetinin belirli aralıklarda olması beklenmektedir.

Alüminyum alaşımlarının içerisine yapısal değişiklikleri sağlaması amacı ile Fe, Si, Mn, Mg, Cu, Zn, Sn gibi başlıca alaşım elementleri katılmaktadır. Alaşım elementlerinin ilavesine bağlı olarak metalin katılma aralığı artmakta ve İMD yöntemi ile dökülmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle dövme alüminyum alaşımları olarak geçen 1xxx, 3xxx ve 8xxx alaşım serileri ticari olarak İMD yöntemi ile üretilen en yaygın alaşımlar olarak bilinmektedir. Alaşım oranı alüminyum oranına göre oldukça düşük olan bu serilerde malzemelerin karakterizasyonunda mikroyapı incelemesi tek başına yetersiz kalmakta ve daha çok nihai istenilen özellikleri temsil eden çekme mukavemeti, sertlik, erichsen derin çekme, elektrik iletkenliği ve OES ile ölçümlenen kimyasal analiz sonuçları ile malzeme özellikleri değerlendirilmektedir.

İMD yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlarının standartlaştırılması, proses sınır koşullarındaki değişkenliklerin tanımlanması ve bu aralıkların modellenmesini mümkün kılmaktadır. Deney serisinin ilgili değişkenleri açıklayabilecek veri aralığında seçilmesi ile uygulanacak değişkenlerin nihai malzeme özelliklerine etkisi modellenebilmektedir. Oluşturulan modeller hem İMD yöntemi ile yassı alüminyum üretimi gerçekleştiren tesislerce iç proseslerin optimizasyonunda kullanılabilir hem de son kullanıcıların kendi proses dizaynlarını oluşturarak daha spesifik aralıkta çalışma olanaklarını sağlayarak, alüminyum levhalarda malzeme özellikleri seçim ve tasarımı konusunda yardımcı olabilmektedir.

Bu çalışmada ikiz merdaneli döküm yöntemi ile üretilip soğuk haddeme yöntemi ile haddelenen, 1050, 3005, 3105 ve 8006 ticari alaşımlı alüminyum yassı mamül ürünlerinin termo-mekanik proses uygulamalarına bağlı mekanik özellikleri incelenmiştir. Proses aralığı, alüminyumun yeniden kristallenme öncesi ve sonrası değerlerin oluşturulması ve modellenmesi için; Döküm kalınlıklarından itibaren alüminyum ürünler %35 ile % 95 aralığında benzer deformasyon oranlarında haddelenmiş ve her deformasyon oranında yeniden kristallenme öncesi ve sonrasının açıklanması için uygun sıcaklıklar olan 220 °C ve 480 °C aralığında 20 °C farklarla ısıtım işlemi uygulanmıştır. Isıtım süresi yeniden kristallenme kinetiğini etkilememesi için sabit tutulmuş ve tüm proseslerde 4 saat olarak uygulanmıştır. Malzemelerin optik emisyon spektrometresi ile alaşım değerleri incelenmiş, farklı ısıtım ve haddeme uygulanan malzemelerin mekanik özellik karakteristiği (çekme ve akma mukavemetleri, yüzde uzama değerleri, eriksen derin çekilebilirlik değerleri ve sertlik değerleri) incelenerek istatistiksel olarak değişkenlere bağlı regresyon modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan regresyon modelleri ile istenilen mekanik özellik değerleri için hangi ürünlerin nasıl proses edilmesi gerektiğine dair optimizasyon aracı oluşturulmuştur. |

2. GENEL KISIMLAR

2.1 ALÜMİNYUM ALAŞIM DİZAYNI VE YAPISAL ÖZELLİKLERE ALAŞIMLARIN ETKİSİ

Alüminyum YMK kafes yapısına sahip bir metalik yapı olması ve kafes yapısının getirdiği karakteristik özellikler sebebiyle saf hali ile kullanıldığında mekanik özellikleri, performans istenen noktalar için yeterli görülmemektedir. Ticari safiyetteki alüminyumun (%Al > 99,00) elektriksel iletkenliği alaşım elementi eklenmiş hallerine istinaden yüksek olması iletkenlik beklenen sektörlerde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca yüksek şekillendirme kabiliyeti istenen ve derin çekme işlemi uygulanan soğuk deformasyon uygulamalarında yine ticari saflıktaki alüminyum ürünler tercih edilebilmektedir.

Alüminyum endüstriyel uygulamalarda yeterli mukavemet, şekil alma kabiliyeti, tokluk özelliklerinin sağlanması için alaşım elementleri ilave edilerek kullanılmaktadır. Alaşım elementlerinin ilavesi ile mevcut çekme mukavemeti 45 MPa ile 700 MPa arasında değişkenlik gösterebilmektedir [3]. Alüminyum içerisinde Mg, Mn, Si, Cu, Zn ve Fe elementleri ile alaşımlandırılmakta, bu alaşım elementleri oranlarına göre yapı içerisinde disperse olmuş, çözünmüş faz bileşenleri alüminyumun yapısına katılarak kimyasal ve fiziksel özelliklerini geliştirmekte veya faz bileşenleri birbirleri arasında bağlanarak istenmeyen inklüzyonlar oluşturup yapıda hatalara sebep olmaktadır. Belirtilen alaşımların dışında; Ti, Sr, Pb, B, Zr, Cr, Ni, Bi gibi elementler ise özel uygulamalar ve modifiye edici elemanlar olarak eklenmektedir. Alaşım elementlerinin yanı sıra malzemenin üretimi sırasındaki proses koşulları, malzeme özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olarak ikiye ayrılmıştır. Dövme alüminyum alaşımları soğuk deformasyon ile şekillendirmeye uygun alaşımlar olarak düşünülebilir. Tanımlanan alaşımların isimlendirmeleri “The Aluminum Association” tarafından 4 haneli numaralandırma sistemi ile kodlanmıştır. Kodlamalar ve açıklamaları Tablo 1’ de görülebilir.

Tablo 2.1.1: “AA” alüminyum alaşım dizaynı ve temel alaşım elementleri

Alaşım Serisi	Temel Alaşım Elementi
1xxx	Minimum %99,0 Al içermelidir.
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg + Si
7xxx	Zn
8xxx	Fe+Si

Alüminyum ve alaşımlarının alaşım isimlendirmeleri ısıtılabilir ve ısıtılabilir işlem göremeyen olmak üzere iki farklı kategoride gruplandırılmıştır. Bu iki kategori ise deformasyon ile sertleştirilebilir ve yaşlandırma yöntemi ile sertleştirme mekanizmalarına bağlı olarak ayrılmıştır. Bu serilere göre 1xxx, 3xxx, 5xxx, 8xxx gurupları deformasyon ile sertleştirmeye uygun ve ısıtılabilir işlem göremeyen alaşımlar olarak tanımlanırken, 2xxx, 6xxx, 7xxx alaşım serileri ise yaşlandırmayla sertleştirilebilir, yani ısıtılabilir işlem görebilir alaşımlar olarak tanımlanabilmektedir. Deformasyon sertleşmesi uygulanan serilerde kısmi gerilim giderme tavlamaları yapılmaktadır. Nihai mekanik özelliklerin kontrol edilebilmesi için gerilim giderme tavlama prosesi önemli bir adımını oluşturmaktadır.

Alüminyum içerisinde bulunan alaşım elementleri birbirleri arasında bileşikler oluşturma eğilimine yatkındır. Kalıp geometrilerine ve dolayısı ile soğuma profillerine bağlı olarak yapı içerisinde bulunan alaşım elementleri faz diyagramlarında belirtilen çözünürlük katsayılarına göre alüminyum ile bileşik oluşturur ve artık bileşenler tane sınırlarında çökelti oluşturma veya ikincil faz bölgeleri oluştururlar. Alüminyumun temel alaşım elementlerine göre ısıtılabilir işlemle gerilim giderme tavlama yapıldığı, deformasyon ile sertleşme mekanizmasına sahip alaşım serileri ve avantajları genel olarak şu şekilde tanımlanabilir;

1xxx, Saf Alüminyum. Bu gruptaki bileşimler, deformasyon ile sertleştirildiğinde dahi nispeten düşük mukavemete sahiptir; bununla birlikte, son derece yüksek süneklik ve şekillendirilebilirliğe sahiptirler ve böylece kolayca işlenebilir veya üretim sırasında kullanılabilirler. 1xxx serisi alüminyumlar, yüksek elektrik iletkenlikleri sebebiyle, akım taşıyıcı ortamlarda tercih edilmektedir. Korozyon direnci yüksek olması sebebiyle dış atmosfer

ile temas eden cephe uygulamalarında, yüzey oksidi içerisinde bulunan empüritelere oranı az olması kaynaklı yansıtma özelliğinin yüksek olması sebebiyle dekoratif uygulamalarda tercih edilmektedir [4]. Ayrıca kaynak kabiliyeti yüksektir ve puntalama gibi mekanik işlemlerle kolayca birleştirilebilmektedir.

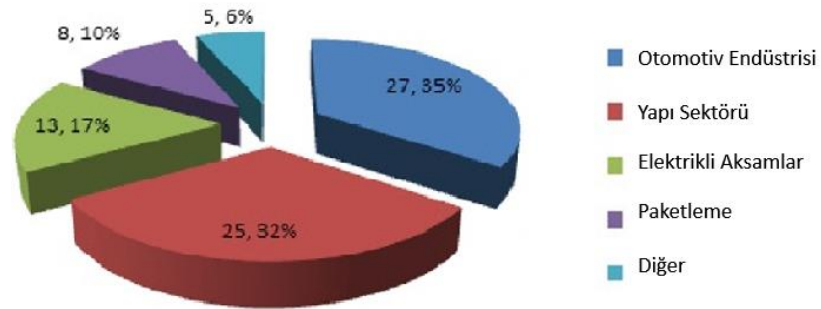
3xxx, Mangan. Manganez, sertleştiğinde, nispeten yüksek şekillendirilebilirliğe sahiptir. Neredeyse tüm ortamlarda korozyona karşı direnci oldukça yüksektir [5]. Mangan alüminyum içerisinde mukavemet artışını etkileyen en önemli alaşım elementlerinden biridir. 3xxx serisinin alaşımları kolayca kaynaklanabilir ve lehimleme ve lehimleme uygulamaları için uygundur. Ticari alüminyum-mangan alaşımları,% 1.2' ye kadar manganez içerir, ancak manganın, diğer serilerin alaşımlarını güçlendirmek için yaygın bir alaşım bileşeni olarak kullanılmaktadır. Mangan bileşimi belirtilen oranlarda kullanıldığında katılma profiline göre tane sınırlarına ilerlemesi sebebiyle yüzey kusurlarına sebep olmaktadır [6]. Alüminyumda ısıl işlem operasyonları sonrasında yeniden kristallenmiş taneleri portakal yüzey olarak belirtilen hataya sebep olmakta ve yüzey görselinin ve tribolojik yapısının önemli olduğu kullanım alanlarında sorun yaratmaktadır. Bu durum proses koşullarının değişkenliği ile kontrol edilebilir seviyelere gelmektedir.

5xxx, Magnezyum. Alüminyumun magnezyum ilaveli alaşımları, ısıl işlem görmeyen alaşımlar arasında, mukavemet açısından en yüksek değerlere ulaşan alaşımdır. Bu alaşımlar, aynı zamanda, kırılma esnasında çok fazla enerji sönümlenmektedir ve bu nedenle üstün tokluğun hayati öneme sahip olduğu kritik uygulamalarda kullanılmaktadır. 5xxx serisinin alaşımları, ticari uygulamalarda magnezyumun düşük ergime sıcaklığı olması ve oksitlenme durumunun atmosfer kontrollü olarak sağlanması sebebiyle kolayca kaynaklanabilmektedir [7]. Genel olarak, 5xxx alaşımları, magnezyumun alüminyum oksit yapısındaki katı halde çözünme davranışı gerçekleştirmesi ve çözünürlük oranının yüksek olması sebebiyle, atmosferik ve deniz ortamındaki korozyon dayanımları ile ünlüdürler [8]. Alüminyum yüzeyinde oluşan sürekli pasif oksit tabakası magnezyum bileşimi arttıkça nispeten kalınlaşmaktadır [9]. Bununla birlikte,% 3'ün üzerinde Mg içeren alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamalarında önerilmemektedir, çünkü SKÇ 'na karşı dirençleri düşüktür. Bu tip uygulamalar için, daha az magnezyum içeren 5052, 5454 ve 5754 gibi alaşımlar önerilir. Magnezyumun yüksek sıcaklık oksidasyonu düşük ergime ve buharlaşma sıcaklıkları sebebiyle yüksektir. Oksijene olan ilgisi oldukça yüksektir. Bu nedenle üretim proseslerinde magnezyum kaybı yüksek oranda

yaşanmaktadır. Bu durumun engellenmesi için üretim proseslerinde çalışmalar devam etmektedir.

8xxx, Demir ve Silisyum. Bu alaşım serisi için AA alaşım dizaynında belirli bir element grubu tanımlanmamıştır. Ancak 8xxx serisi alaşımlar folyo ambalaj sektöründe sıkça kullanılmakta ve genel olarak yüksek demir ve silis içeren alaşımlar tercih edilmektedir. Alaşım içerisinde bulunan demir ve silis yapı içerisindeki çözünürlükleri düşük olması sebebiyle tane sınırlarına disperse olmaktadır. Gerçekleşen dispersiyon mekanizması levha halinde üretilen ürünlerde oldukça düşük kalınlıklarda dahi mukavemeti sağlamaktadır. Levha üretim standartlarında 200 µm kalınlık altındaki ürünler normal koşullarda folyo olarak tanımlanmaktadır. Folyo ürünler 7 µm ile 200 µm aralığında farklı sektörlerde kullanılabilir.

Alüminyum yassı mamül ürünlerin 2014 Avrupa raporuna istinaden kullanım oranları Şekil 2.2.1’ de verilmiştir. Görüldüğü üzere kullanım alanları farklı temel sektörleri barındırmaktadır. Bu nedenle yassı mamullerden beklenen malzeme özellikleri oldukça değişkenlik göstermekte ve bu durum proses süreçlerindeki üretim kısıtlarını arttırmaktadır. Birçok sektör malzeme seçim ve tasarım kitaplarında belirtilen ve fiziksel koşulları sağlayacak ürünler seçmesine karşın, alüminyum yassı mamül ürünlerinde alaşım ve mekanik özellik değerleri uygun tutulduğu takdirde dizayn parametrelerini etkilemeyecek şekilde malzeme özellikleri değiştirilebilir ve geri dönüşüme daha yatkın olan alaşımlı ürünler uygun proses parametreleri ile istenilen malzeme özelliklerini sağlayabilmektedir.



Şekil 2.2.1: Alüminyum levha ürünlerin kullanım alanları ve yüzde kullanım miktarları [10].

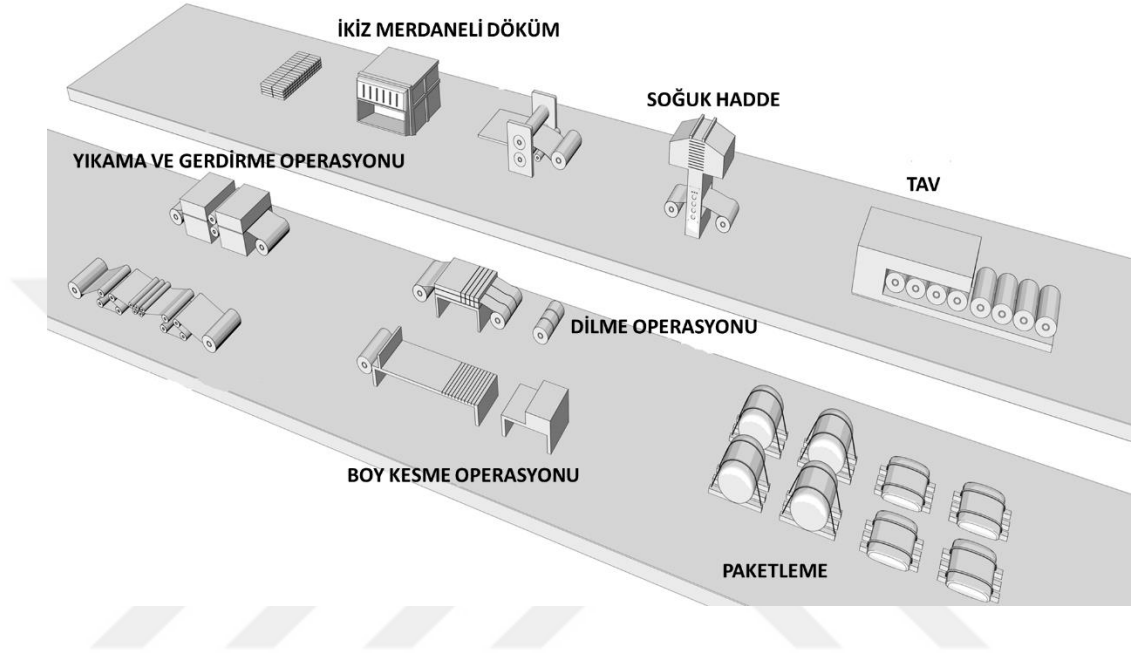
2.2. İKİZ MERDANELİ DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM YASSI MAMÜL ÜRETİM SÜRECİ

Alüminyum yassı mamül üretim süreçleri temel olarak iki farklı üretim süreci karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan birincisi dikey soğutma yöntemi ile üretim (Direct Chill Casting) diğeri ise ikiz merdaneli döküm yöntemidir (Twin-Roll Casting). Dikey soğutma yöntemi ile üretim metodunda alüminyum büyük bloklar halinde ingot olarak dökülmekte ve bu geometrilerde ısıtım işlem görmektedir. Erime noktasının hemen altında görülen bu ısıtım işlem, malzemede mekanik özelliklerin belirlenmesinden ziyade içyapı homojenizasyonu ve bir sonraki kademe olan sıcak haddeleme operasyonunda enerjiden tasarruf edilmesi amacıyla yapılmaktadır. Döküm ve homojenizasyon ısıtım işleminin ardından ingot soğuk haddeleme için uygun kalınlıklara gelene kadar 500 °C sıcaklıklarında sıcak haddeleme uygulanır. Yüksek sıcaklıklarda deformasyon işlemi sadece enerji verimliliği değil malzemenin şekillendirilebilirlik özellikleri açısından da önemli faydaları bulunmaktadır. Yüksek kalınlık ve sıcaklıkta haddelenen ingotlarda deformasyona bağlı olarak tane yönlenmesi daha homojen gerçekleşir. Tane yönlenmesine istinaden oluşan eş eksenli yapı anizotropik özellikleri iyileştirmekte ve farklı yönlerdeki uzama farklılıklarının önüne geçebilmektedir [10].

İMD yöntemi ile sürekli döküm yöntemi ise katılaşma aralığı dar olan alüminyum ürünlerde tercih edilmektedir. Bu yöntemin avantajı ise yüksek enerji maliyetlerinin önüne geçerek soğuk haddelemeye uygun kalınlıklarda levha ürünlerinin üretilmesidir. Döküm kalınlıkları ince tutulması sebebiyle homojenizasyon tavı ve 760 mm ingotun 6 mm kalınlığa kadar haddelenmesi sırasındaki enerji giderleri düşürülmektedir. Ayrıca alüminyum ingot halinde dökülmemesinden dolayı kenar bölgelerden hurda atılmamakta ve proses verimliliği arttırılmaktadır. İMD yöntemindeki ani katılaşma mekanizması segregasyonu merkez hattında daha yoğun olarak toplamaktadır. Katılaşma kontrolü sağlandığında intermetalik bileşenlerin segregasyonu kontrol edilebilir seviyelere gelebilmektedir.

Yassı mamül üretimi sırasındaki proses aşamalarında ikiz merdanel döküm yönteminin akabinde istenilen kalınlıkların elde edilebilmesi ve mekanik özelliklerin sağlanması için soğuk haddeleme, istenilen nihai mekanik özelliklerin gerilim giderme ısıtım işlemi ile sağlanması için tav fırınları, malzeme yüzeyinde kalan kontaminasyonların giderilmesi için yıkama gerdirme

operasyonu ve istenilen ölçüde ürünlerin temin edilebilmesi için dilme ve boy kesme işlemleri uygulanmaktadır. İMD yöntemi ile yassı mamül üretimi ve proses süreci Şekil 2.2.2' de görülebilir.

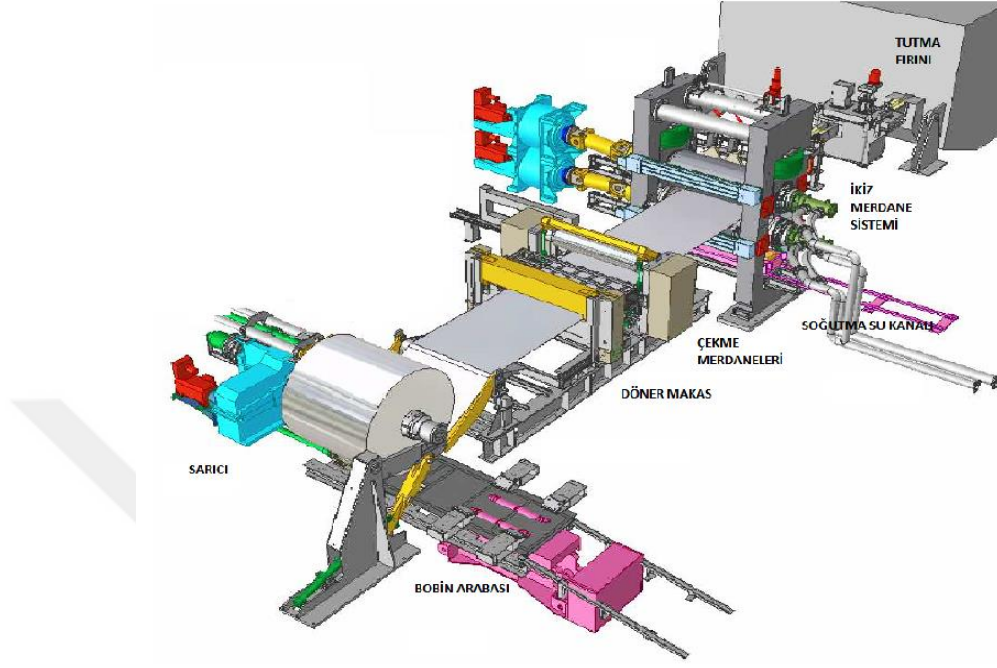


Şekil 2.2.2: İkiz Merdaneli Döküm ile alüminyum yassı mamül üretimine ait süreç şeması.

2.2.1. İkiz Merdaneli Döküm (İMD) Prosesi

İMD prosesinin uygulandığı tesislerde alüminyum birincil ve ikincil hammaddelerin ergitilmesinde doğalgazlı reverber tipi fırınlar tercih edilmektedir. Uygun hammaddeler ergitme fırınında ergitilir ve burada gaz giderme ve fluks dediğimiz curuflaştırıcı bileşenler ile rafinasyon işlemine tabi tutulurlar. Curuflar genellikle klorür ve florürlü tuzlardan oluşmaktadır. Ergitme işlemi gerçekleştirilen alüminyumun bu bölgede sıcaklıkları 720 – 800 °C aralığındadır. Yüksek ergitme sıcaklığı ve sıvı metal havuzunun geniş olması nedeniyle oluşan geniş yüzey alanı, doğal gazın yanması sonucunda yüksek sıcaklık oksidasyonuna elverişli bir ortam yaratmaktadır. Ergitme fırınında alaşım dengelendiği taktirde ürün ara yolluklar vasıtası ile tutma fırınına aktarılmakta ve bu bölgede daha kontrollü bir aralık olan 710 – 730 °C sıcaklıklarında tutulur. Bu bölgeye alınan sıvı metal herhangi bir türbülansa uğratılmaz. Proses süreci boyunca yolluk bölgesinden, katılaşma öncesi son bekleme yeri olan

headbox bölgesine kadarki metal seviyesinin kontrol edilmesi için akış kontrolünü sağlayan tıkaçlar ile tutma fırınındaki metal kontrollü olarak yolluğa aktarılır.



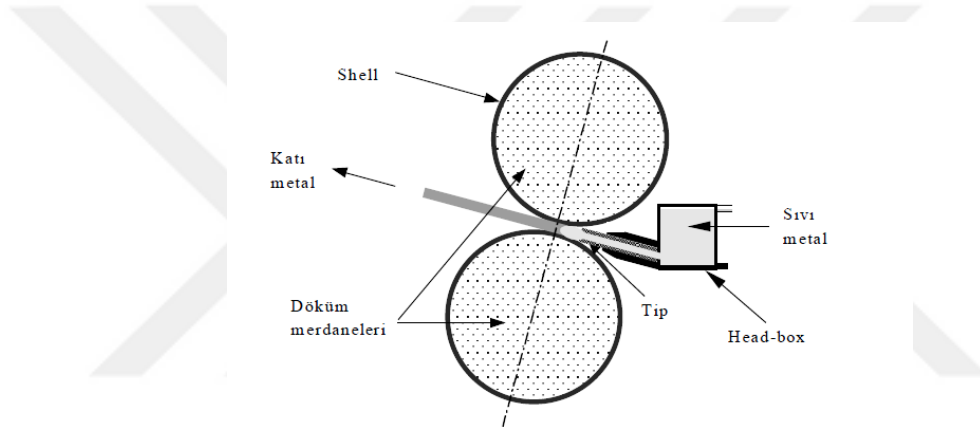
Şekil 2.2.3: İkiz merdaneli döküm hattı genel hat şeması [11]

Yolluklardan headbox bölgesine gelen sıvı metal, hidrostatik basıncın etkisi ile ısı yalıtımı oldukça iyi olan monolit plakalar içerisinde akarak iki merdanelerin ara bölgesine alınır ve merdane yüzeyinde katılma süreci başlamış olur. Merdaneler sürekli olarak katılmanın sağlanması için iki parçalı çekirdek ve dış kabuk bölgeden oluşan çelik malzemenin yapılmaktadır. Çekirdek bölge içerisinde kanallar vasıtasıyla soğutma suyu geçirilerek kabuk üzerinde katılmanın sürekliliği sağlanır. Bu bölgedeki sıcaklık, termal iletkenlik, merdanelere ulaşan sıvı metal debisi, merdane aralığı, iki merdane arasında sıvı metali ileten monolit plakanın aksel konumu, birim zamanda oluşan katı metal hacmi, malzemenin katılma profilini doğrudan etkilemekte ve malzemenin nihai mekanik özelliklerinde belirleyici özellikler olmaktadır.

Levha ürünlerin merdane eni boyunca soğuma profiline bağlı olarak levhanın hava ile temasının daha yüksek olduğu kenar bölgeler ve daha sıcak olan orta bölge arasında alüminyumun mikroyapısında farklılıklar oluşmaktadır. Proses süresince levha ürün kalitesini etkileyen en önemli parametre soğutma rejiminin merdane eni boyunca homojen olarak

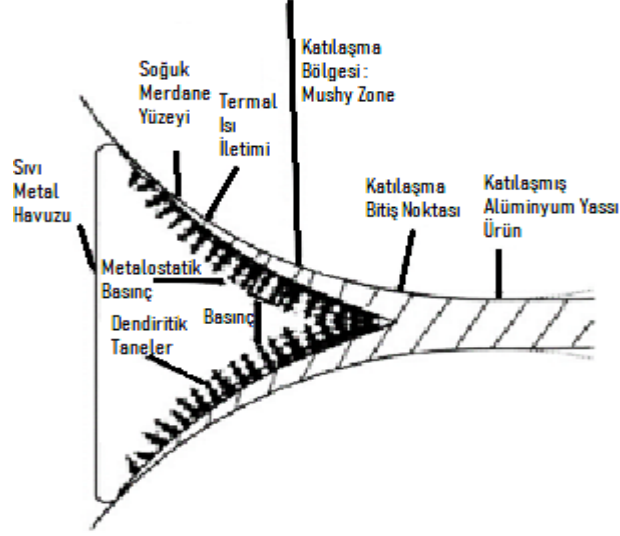
dağılmasıdır. Eğer ki merdane içerisinde çekirdek bölgesindeki su kanallarından biri tıkanırsa takdirde bu bölgede katılaşma homojen olarak gerçekleşmeyecek, ve sıcaklığın yükselmesiyle alüminyum sıvı metali bu bölgeden akış göstermeye çalışarak kalınlığın artmasına sebep olacaktır [12].

İMD yönteminde yatay döküm tercih edilmektedir. Yatay dökümde ise açısız olarak tam yatay veya 15 derecelik açılarla merdaneler konumlandırılabilir. Döküm açısı katılaşma profilini doğrudan etkileyecek ve ilk temas noktası değişmesinden ötürü levhanın döküm yönüne göre alt ve üst noktalarında katılaşma profili kaynaklı mikroyapı farklılıkları oluşturacaktır. Dökümün gerçekleştiği merdane bölgesi Şekil 2.2.4’ de görülebilir.



Şekil 2.2.4: Katılaşmanın gerçekleştiği döküm merdanelerinin şematik gösterimi [12]

Döküm merdanelerinin temas etmesiyle katılaşma merdane yüzeylerinden başlayarak merkez bölgeye gelecek şekilde bir soğuma profili oluşturmaktadır. Oluşan bu soğuma profiline istinaden alüminyum içerisinde daha geç katılaşan intermetalik bileşenler faz sınırlarında taşınım gerçekleştirerek merkez bölgeye doğru sürüklenecek ve burada yoğunlaşarak segregasyon denilen hataya sebep olacaktır. Malzeme iç yapısında oluşan homojen olmayan faz farklılıkları yüksek deformasyon oranlarında gerilim noktası oluşturacaktır. Oluşan bu artık gerilmeler nihai mekanik özelliklerde özellikle uzama karakteristiğinde değişkenliklere sebebiyet verecektir. Merdane yüzeylerinde oluşan katılaşma mekanizması ve katılaşma mekanizmasına bağlı oluşan fiziksel etkiler Şekil 2.5’ de görülebilir.



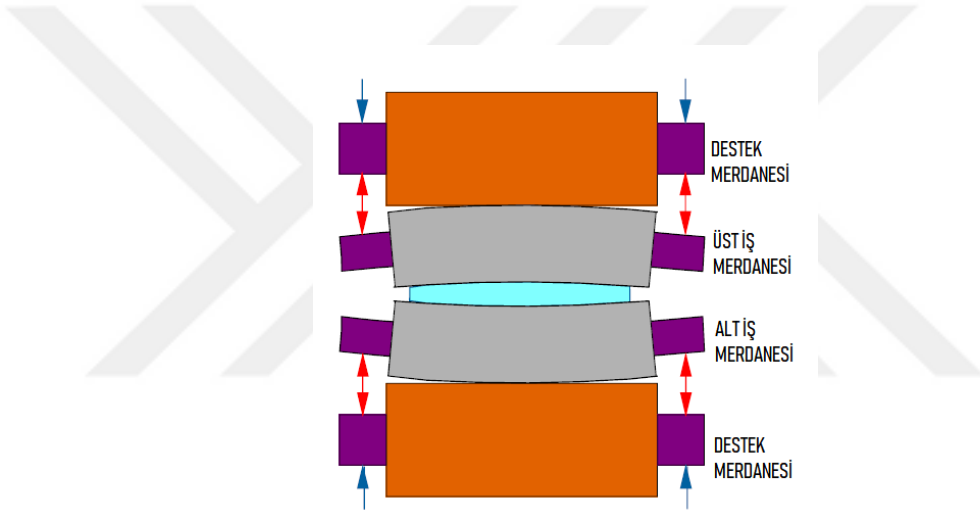
Şekil 2.2.5: Merdane yüzeyi ve sıvı metal havuzu arasında oluşan katılma profili [13]

Katılmanın devamında basıncın etkisi ile iki bölge yarı katı formda birbirleri ile buluşmaktadır. Faz dönüşümü ilk olarak alüminyumun yüzeyde bir pasif oksit filimi yaratması ile gerçekleşmektedir. Merdane/sıvı metal ara yüzeyinde oluşan bu ani reaksiyon α -Al dendritlerinin büyümeye çalışmasıyla devam etmektedir. Yapı içerisinde disperse veya kısmi çözünme gösteren alaşım elementleri sıvının faz dönüşüm sıcaklıklarını düşürdüğü için bu fazlar orta bölgeye doğru segregasyon olmaktadır. Nihai levha ürünlerinin mikro yapı analizleri gerçekleştirildiğinde; katılma profiline bağlı olarak merkez bölgede diğer alaşım elementlerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca katılma hızına bağlı olarak levhanın dış bölgesi ile iç bölgesi arasındaki oluşacak sıcaklık farkı ve katılma sırasındaki hacimsel farktan ötürü oluşan mekanik etki, sıcaklık farkına bağlı fazların bu bölgeye ani disperse olması gibi nedenlerle merkez hattı segregasyonu olarak tanımlanan bu yöntemde en çok karşılaşılan segregasyon tipi oluşmaktadır [14].

2.2.2 Soğuk Hadde Prosesi

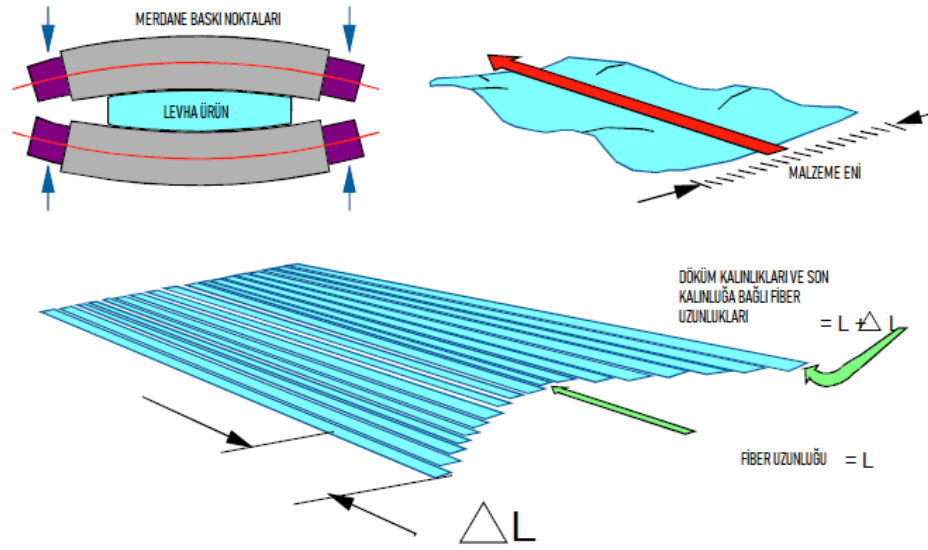
Haddeleme işlemi bir metal malzemenin eksenleri etrafında dönen bir silindir arasından geçirerek plastik şekil verme işlemidir. Birim alana düşen baskı kuvveti malzemenin plastik şekil değişimi için gerekli yük değerinin üzerinde ise malzeme homojen veya heterojen akma göstererek vektörel yük uygulamasına göre uzar ve baskı yönüne dik bir şekilde kalınlığında azalma meydana gelir. Haddeleme işlemi sırasında metal içerisinde depolanan gerilim

artmaktadır. Malzeme deforme edildikçe iç bölgelerde bulunan taneler birbirleri üzerinde kayma hareketi gösterecek ve yeni gerilim noktaları oluşturacaktır. Soğuk haddeleme prosesinde merdane dizilimi değişkenlik gösterebilmektedir. Alüminyum levha üretimi için gerekli olan baskı kuvvetleri 4'lü merdane sistemi ile sağlanabilmektedir. Bu merdane sistemleri iş ve destek merdaneleri olmak üzere ikiye ayrılır. İş merdaneleri malzeme ile doğrudan temas halinde olan merdaneler iken, destek merdaneleri ise iş merdanelerinde oluşacak baskının sağlanması, merdane titreşiminin engellenmesi için yük dağılımının homojenleştirilmesi ve merdane üzerine gelen sert bileşenleri kendi üzerine alarak iş merdanesinin zarar görmesini azaltmaktadır. İş ve destek merdanelerin dizilimi Şekil 2.2.6' da görülebilir.



Şekil 2.2.6: Soğuk hadde merdanelerinin dizilimi ve yük bölgeleri [15]

Baskılar merdanelerin kenar bölgelerinden uygulanmaktadır. Yük dengesi ise orta bölgedeki destek merdaneleri ile sağlanmaktadır. İMD yöntemi ile döküm işlemi gerçekleştirilirken malzeme kalınlığında oluşan ufak dalgalanmalar malzeme deforme edilmesi ile boyca uzama miktarları değişmekte ve malzeme üzerinde iç gerilim oluşturmaktadırlar. Oluşan bu iç gerilimler malzemede düzgünlük denilen hatalara sebebiyet verebilmektedir [16].

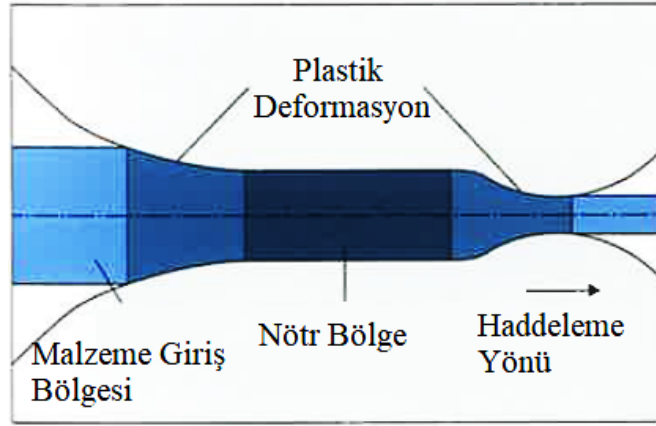


Şekil 2.2.7: Haddeme işleminin sonrasında döküm profilinin oluşturduğu kalınlık dağılımı ve iç gerilimin düzgünlüğe etkisi [15]

Malzeme üzerinde oluşan bu kalınlık farklılıkları iş merdanesi ile teması sırasında daha fazla sürtünme kuvveti oluşturacağı için iş merdanesi üzerinde oluşan bu sürtünme bölgesel termal genişmeleri arttıracak ve bu bölgede daha fazla termal bombe oluşumuna neden olacaktır. Oluşan bu termal bombeler malzemede daha yüksek deformasyon kuvveti oluşturması sebebiyle soğuk haddeme proseslerindeki en önemli bir diğer operasyon yağlama ile soğutma işlemidir [17].

Yağlama işlemi iş ve destek merdaneleri üzerine yaklaşık 350 farklı noktadan yapılmaktadır. Yağlama işleminin otomasyon kontrolü ise malzeme üzerindeki düzgünlük profilindeki farklılıklara göre algılanmakta ve otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Malzeme profilindeki ölçüm piezo elektrik malzemeler ile döşenmiş bir merdanenin üzerinden geçen malzemenin oluşturduğu yüklerin ölçülmesi ile incelenmektedir. Bu merdaneden alınan geribildirimlere istinaden yağlama sistemi malzeme kuvvetinin optimum değerden yüksek veya düşük geldiği noktalarda bölgesel olarak açılmakta ve iş merdanesinde bölgesel soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir.

Merdane aralığında oluşan bu termal genişme ve malzemenin haddelenmesi sırasında merdane temas bölgesinde oluşan deformasyon mekanizması Şekil 2.2.8'de görülebilmektedir.

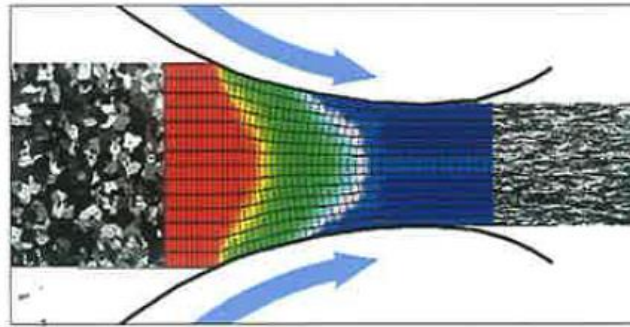


Şekil 2.2.8: Merdane aralığında malzemenin gösterdiği akma davranışı, merdane ve malzeme arasındaki hız farklılıkları [18]

Alüminyumun çelik merdaneler arasında deformasyonu sırasında 3 farklı bölge ile deformasyon işlemi tanımlanmaktadır. Malzeme giriş bölgesinde yağlama rejimi, malzeme giriş açısı, merdane ve malzeme akış hızları deformasyon mekanizmasını doğrudan etkilemektedir. Nötr bölge olarak tanımlanan nokta sürekli olarak deformasyonun gerçekleştiği ve malzemenin yüke karşı gösterdiği direncin maksimum olduğu noktadır. 45° lik kayma düzlemlerinde malzemenin deformasyon davranışı en yüksek seviyededir. Oluşan yük mekanizması 1 numaralı denklem ile açıklanmaktadır [17].

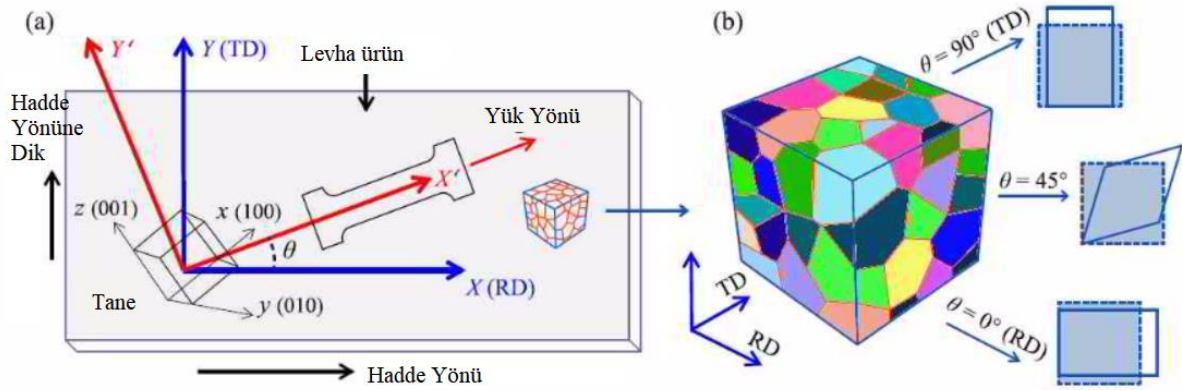
$$d\sigma_x/dx \pm \frac{2\mu \cdot \sigma_x}{h} - \frac{4 \cdot \sigma_x}{\sqrt{3} \cdot h} (\tan \alpha \pm \mu) = 0 \quad (1)$$

Denklemden verilen σ_x malzemenin akma kuvvetini tanımlamakta, h malzeme kalınlığını, α deformasyon açısını ve μ ise sürtünme kuvvetini ifade etmektedir.



Şekil 2.2.9: Hadde yönüne dik kesitte tanelerde oluşan deformasyon mekanizması [18]

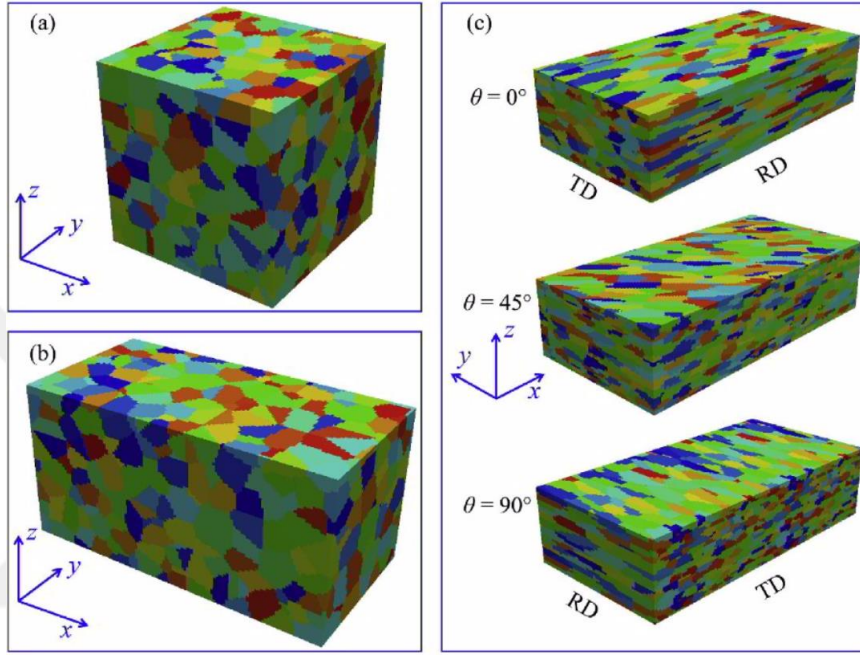
Şekil 2,2.9’da görüldüğü üzere soğuk haddeleme işlemi sırasında levha ürünün hadde yönüne dik kesitte incelenmesi sonucu dislokasyon hareketlerinin ve malzemeye uygulanan gerilim, uygulanan gerilim sonrasındaki tanelerin incelik uzama mekanizması görülebilir. Bu alanda malzemeler içerisinde dislokasyon yoğunluğu artmakta ve artan bu dislokasyon yoğunluğu malzeme içerisinde depolanmış enerjinin artmasına sebep olmaktadır. Malzeme içerisinde depolanmış enerji kalorimetre yardımıyla ölçülebilmektedir. Kalorimetre tarafından malzeme sıcaklığına bağlı alınan ısı akışındaki değişimler ölçülebilmektedir. Malzemeler içerisinde gerçekleşen dislokasyon kaybı ve yeniden kristallenmenin oluşumu sebebiyledir. Oluşan bu yeni taneler haddeleme işlemi sırasında da dinamik olarak gerçekleşebilmektedir.



Şekil 2.2.10: Hadde yönüne bağlı olarak malzemenin kayma düzlemleri ve tanelerin deformasyon yönlenmeleri [19]

Alüminyum soğuk haddelenme sırasında kayma düzlemi olan {111} düzlemi boyunca hareket etme eğilimindedir. Buna ilave olarak haddeleme ve döküm yönleri tek yönlü olarak gerçekleştirilmesi ve haddeleme sırasında poisson oranı sebebiyle oluşacak; levhanın kenar bölgelerden genişlemesi yerine açıcı ve sarıcı gergileriyle gergi altında tutularak sadece boyca uzaması sağlanması sebebiyle tane yönlenmesi levha ürünün şekillendirilebilmesi açısından oldukça fazla önem kazanmaktadır. Hadde yönüne bağlı olarak gerçekleşen tane yönlenmesi malzemenin mekanik özelliklerinde değişimlere neden olmaktadır. Malzemeler haddeleme yönüne bağlı açılal bölgelerden alınan numuneler tanelerin deformasyon oranını etkileyeceğinden tam olarak net bir fikir edinilmesi açısından hadde yönüne dik, paralel ve 45° açılarda numune alınarak tüm yönlerde nasıl özellikler gösterdiği incelenmelidir. Tanelerin farklı açılı bu bölgelerde gösterdiği davranış anizotropik davranış olarak tanımlanmaktadır. Oluşan bu anizotropik davranış sadece malzemenin düzlemsel mekanik özelliklerini değil

alansal kuvvetlerin uygulanmasıyla açısal farklılıkların oluşması preslenmiş metalde iç gerilimin homojen olmamasına ve nihai ürünlerde parça hatalarına sebebiyet vermektedir. Bu sorunların yaşandığı en önemli örnekler kola kutuları, tüp ambalaj ürünleri gibi derin çekilmiş alüminyum parçalardır. Deformasyon açılarına bağlı malzemedeki alınan numune görselleri Şekil 2.2.10’da, tanelerin deformasyon yönüne bağlı konumları ise Şekil 2.2.11’de görülebilir.



Şekil 2.2.11: Soğuk haddeleme sonrasında tanelerin yönlenmesi ve farklı açılı kesitlerden alınan tanelerin vektörel pozisyonlarının temsili hacim elemanları (RVE) görseli; (a) ve (b) deforme edilmemiş kesit, (c) deforme edilmiş malzemenin farklı açılardaki tane yapıları. [19]

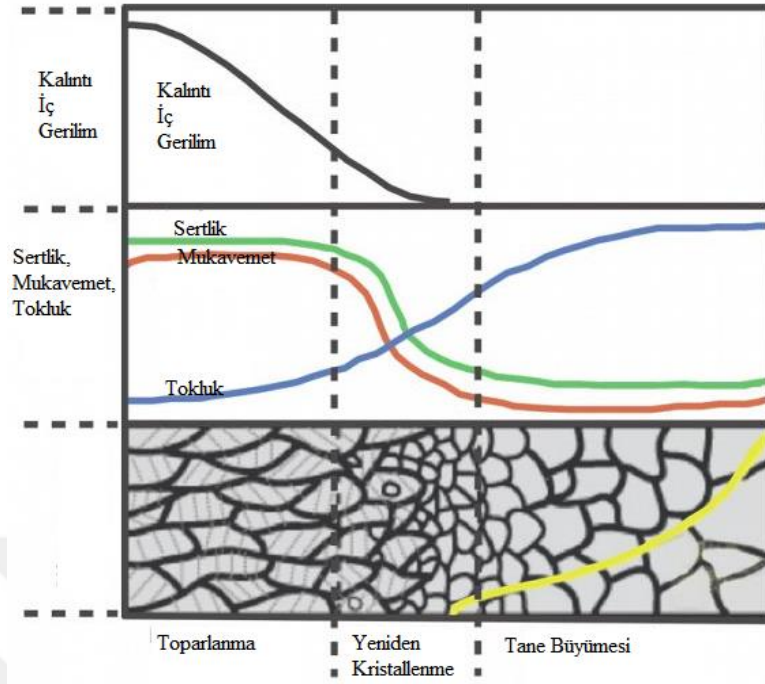
2.2.3 Isıl İşlem (Tavlama)

Isıl işlem görmeyen alüminyum alaşımlarında, ısıl işlem genel olarak gerilim giderme amacı ile uygulanmaktadır. Gerilim giderme dediğimiz bu konu daha öncesinde dislokasyonların toparlanması ve yeniden kristallenmenin başlaması olarak tanımlamıştık.

Isıl işlem alüminyum levha ürünlerinde uygulanması genel olarak indirektif soğutma gerçekleştiren fırınlar tarafından yapılmaktadır. Isıtma P veya U tipi radyan tüpler içerisinde gerçekleşir ve ısınan tüpler fırın iç atmosferini ısıtarak malzemeye sıcak havanın teması ile ısıtma rejimi sağlanmaktadır. İndirektif ısıtma malzemenin her bölgesinde benzer mekanik özelliklerin sağlanması açısından kritiktir. Isıl işlem sıcaklığı ve süresi ürünlerin istenilen mekanik özelliklerde elde edilmesi açısından en önemli proses parametreleridir. Ayrıca ısıl işlem atmosferi malzemelerde gerçekleşecek yüksek sıcaklık oksidasyonunu engellemeye

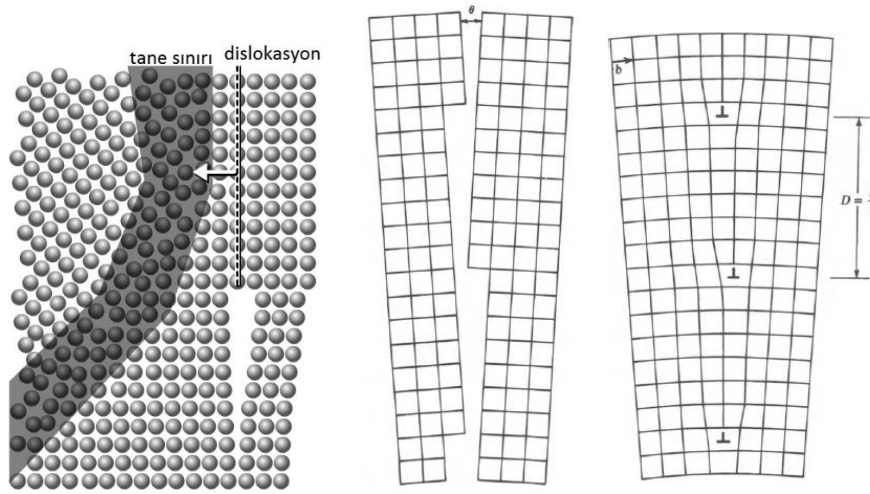
yönelik olmalıdır. Bazı ticari alaşımlar yüksek sıcaklık oksidasyonu göstermezken özellikle magnezyum oranı yüksek olan alaşımlar yüksek sıcaklık oksidasyonuna maruz kalmaktadır. İMD yöntemi ile üretilen alüminyum ürünler bobin olarak sarılması dolayısı ile oluşturdukları hacimsel yapının her bölgesinin benzer şekilde ısı transferine maruz kalarak ısıtılması gerekmektedir.

Isıl işlem sırasında uygulanan sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak toparlanma, yeniden kristallenme ve tane büyümesi mekanizmaları meydana gelmektedir. Oluşan bu mekanizmaların kontrolü daha öncesinde gerçekleştirilen proses çalışmaları ile tanımlanmaktadır. Isıl işlem uygulanması ile malzemedeki kalıntı iç gerilimler azalmakta, toparlanma gerçekleşmektedir. Toparlanma kademesinde sertlik ve mukavemette ciddi bir düşüş meydana gelmezken, tokluk ve uzama değerlerinde kısmi artışlar gözlenmektedir. Oluşan bu durum dislokasyonların daha düşük enerjili gerilim bölgelerinde nötrlendiğini göstermektedir. Yeteri kadar enerji deforme edilmiş yapıya verildiği takdirde malzemede yeniden kristallenme gerçekleşir. Bu bölgede sertlik ve mukavemette düşüş gözlemlenmektedir. Isıl işleme bağlı olarak içyapıdaki tanelerin değişimi Şekil 2.2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.2.12: Isıl işlem sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak malzeme mukavemetindeki değişimler ve mukavemet değişim mekanizmaları [23]

Katı hal difüzyonuna bağlı olarak gerçekleşen tanelerin gerilim gidermesi sonrasında oluşan toparlanma, yeniden kristallenme ve tane büyümesi mekanizmaları dinamik ve statik olarak gerçekleşebilmektedir. Dinamik yeniden kristallenme malzemelerde yüksek sıcaklık uygulamalarındaki sürünme davranışlarında ve sıcak işlem uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır. Soğuk haddeleme dediğimiz operasyon her ne kadar soğuk olarak anılsa da proses sıcaklıkları 180 – 250 °C aralığında gerçekleşmektedir. Bu bölgede malzemenin ergime noktasının $0,3T_e < T_p$ olması sebebiyle kısmi dinamik yeniden kristallenme yassı alüminyum ürünlerinde görülebilmektedir. Yeniden kristallenme ve tane büyümesi mekanizmaları malzemelerin yüksek sıcaklıklarda işlem görmesi sonucu oluşmaktadır. Tane büyümesi sonrasında malzeme mukavemeti oldukça düşmekte ancak iç gerilim tamamen azalması sebebi ile elektrik iletkenliği artmaktadır.



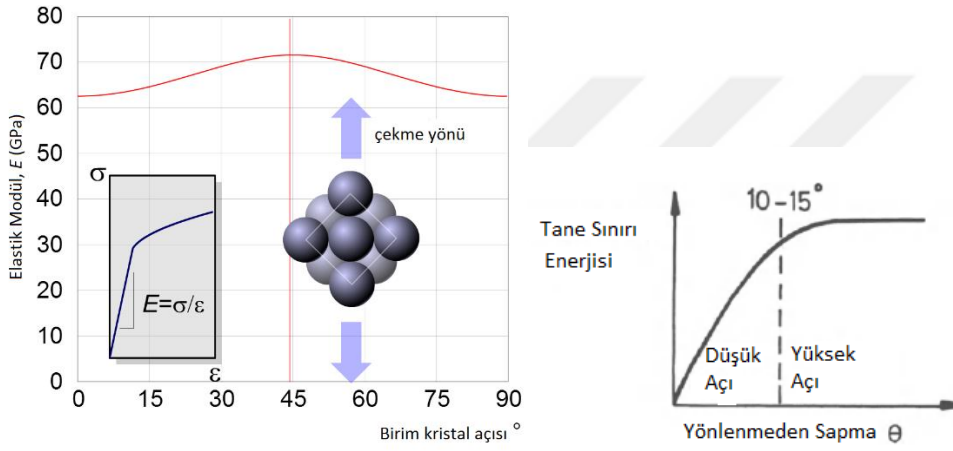
Şekil 2.2.13: Dislokasyon düzlemlerinin örtüşmesi ve tane sınırı oluşum mekanizmasının şematik gösterimi (düşük açılı ayrılmış ve birleşmiş dislokasyon bölgeleri) [19]

Katı halde tanelerin yönlenmesi ile tane sınırı oluşup oluşmayacağını anlamak için Burgers vektörü ve bu vektörel hareketin oluşturacağı açılardan faydalanılmaktadır. Burgers vektörü taneciklerin oluşturduğu düzlemsel dizilimdeki oluşan farklılıklar hakkında bizlere yön bilgisi vermektedir. Verilen bu yön bilgisine istinaden her bir tane birbirilerinden ne kadar farklı noktalarda olduğu tanımlanabilir. Vektörel yönlenmeye bağlı olarak taneler arasında boşluk ve gerilim bölgeleri oluşmaktadır. Aynı yönde bulunmayan tanelerin bölgesel boşlukları dislokasyon bölgeleri olarak tanımlanmaktadır. Dislokasyon malzemede oluşan deformasyona bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Dislokasyon noktalarındaki bulunan tanelerin burgers vektörü ve tane açısına bağlı olarak malzemeler tane sınırı oluşturma eğilimindedirler. Düzlemsel yönlenmeden sapma $10-15^\circ$ açılarının altındaysa tane artan kinetik faktöre bağlı olarak iç gerilim olarak kalma eğiliminde, eğer bu açılardan büyük olduğu takdirde yeni bir tane sınırı oluşturma eğilimindedir. Oluşan bu yeni taneler statik yeniden kristallenme olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 2.2.13’de burgers vektörü ve düzlemsellikten sapma açısının oluşturduğu dislokasyon yoğunluğu ve bu yoğunluğun oluşturduğu taneler görülebilir.

$$D = \frac{b}{\sin\theta} \sim \frac{b}{\theta} \quad (2)$$

Dislokasyonlar arasındaki vektörel boşluğu temsilen Burgers vektörü (b) kullanılmaktadır ve dislokasyon yoğunluğu (D) olarak ifade edilmektedir. θ yönlenmeden sapma açısını ifade etmektedir. Yönlenmeden sapma açısı oldukça düşük olduğunda

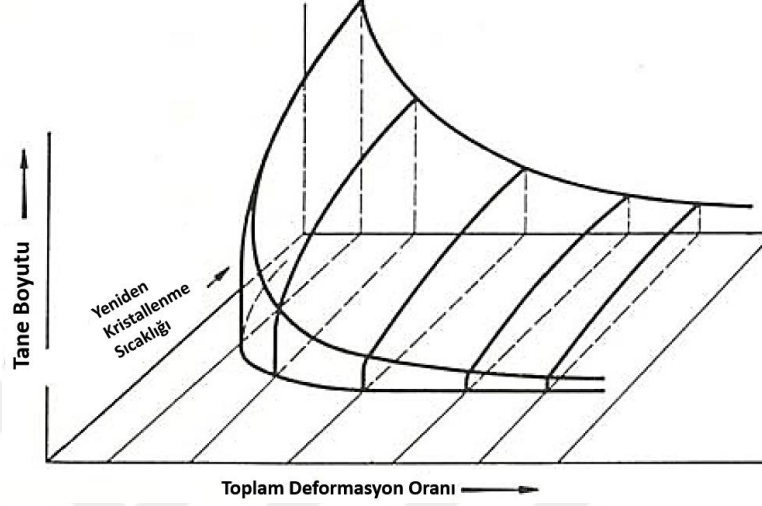
dislokasyon boşluğu oldukça büyük olacaktır. Bu durum tane sınırı enerjisi (ϕ) tane sınırındaki dislokasyon yoğunluğuna neredeyse eşit olmaktadır ($1/D$). Tanede oluşan bu yönlendirme eğilimi aynı zamanda malzemede oluşacak mekanik özelliklerde de vektörel değişikliklere sebebiyet vermektedir. 45° bölgelerinde kayma düzlemleri bulunmaktadır. Açısal gerilme farklılıkları mikro ölçekte etkili olduğu gibi makro boyutta yuvarlak kesitli bir metal plakının derin çekilmesi sonrasında da etkili olduğu bunun malzemeye anizotropik özellik kazandırdığı söylenebilir. Birim kafes üzerinde açısal kuvvetlerin yönlendirilmeden saptmaya olan etkisi Şekil 2.2.14' de görülebilir.



Şekil 2.2.14: Birim kristal açısına bağlı olarak yönlendirilmeden saptmanın tane sınırı enerjisine ve elastik modüle etkisi [20]

Yeniden kristallenme sırasında bu bölgelerde enerji akışı gerçekleşmekte ve ters gerilime sahip dislokasyonlar birbirlerini nötrlerken, dislokasyon birikme bölgelerinde yoğunlaşan boşluklar yönlendirilmiş yeni tane oluşumları oluşturmaktadır. Gerekli ısı ve kinetik faktörlerin yeterli olması durumunda tane büyümesi mekanizması gözlemlenebilir. Tane büyümesi sürekli ve süreksiz, normal ve aşırı tane büyümesi olacak şekilde dört farklı ifadeyle açıklanabilir. Süreksiz tane büyümesi yapı içerisinde artık gerilim noktalarında oluşur. Bu tarz bir tane büyümesi gözlemleniyorsa, iç gerilimin belirli bölgelerde (örneğin alaşım elementlerinin yoğun olduğu tane sınırlarında) yoğunlaştığı söylenebilir. Malzemelerin nihai özellikleri, malzeme karakterizasyonunu gerçekleştirirken kinetik faktörler oldukça önemlidir. Yeterli ısı sağlansa dahi yeniden kristallenme ve tane büyümesi için gerekli süre prosesin diğer bir değişkenini oluşturmaktadır. Deformasyon oranı arttıkça iç gerilim artacağından, yeniden kristallenmenin başlaması için gerekli sıcaklık düşecek ve süre kısılacaktır. Deformasyon

oranına bağı, tane boyutu ve yeniden kristallenme sıcaklığına ait grafik Şekil 2. 13'de görülebilir.



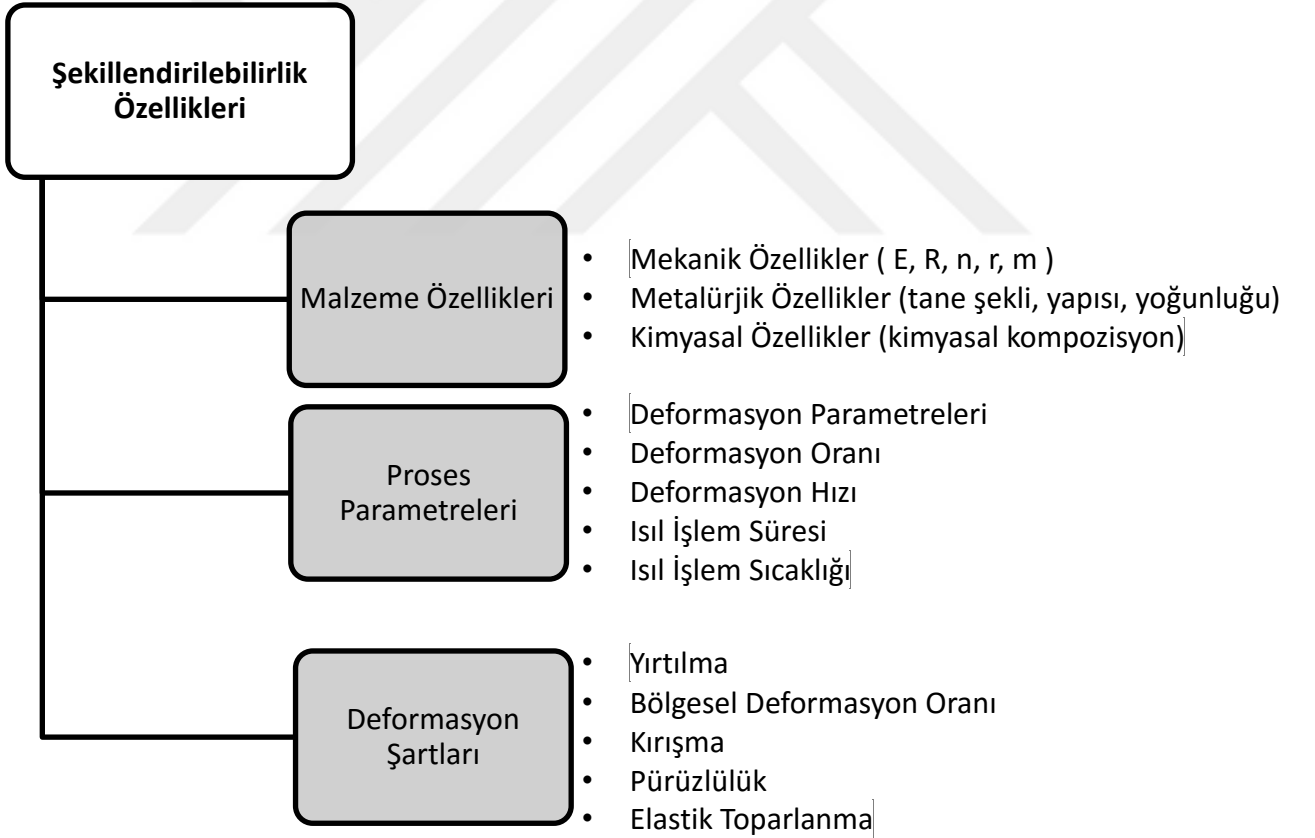
Şekil 2.2.15: Yeniden kristallenme sıcaklığı ve tane boyutunun deformasyona bağı şematik gösterimi [23]

Birincil yeniden kristalleşme tamamlandığında mikro yapı halen kararsızlığını sürdürmektedir. Yeniden kristalleşen taneler tavlama sıcaklığında uzun süre tutulduğu takdirde yayınma yolu ile zamanla büyümektedirler. Tane büyümesi tane sınırlarının yer değiştirmesi ile gerçekleşmektedir. Ayrıca tane sınırlarının hareketi süreklilik göstermez. Yapı içerisinde bulunan ikincil fazla tane sınırı hareketini zorlaştırmaktadır [24]. Yeniden kristallenmede deformasyon miktarı, hızı, ısı işlem sıcaklığı, süresi faktörleri ve ayrıca çözünen ikincil bileşenlerin mikro yapısal kontrolü ile yeniden kristallenme kontrol edilebilir [25].

Alüminyum ürünlerin bobin olarak tavlama dolayısı ile geometrik faktöre bağı olarak ısının her bölgede homojen olarak yayılabilmesi için 4-8 saat aralığında indirektif ısıtma rejimleri uygulanmaktadır. Bu noktada sıcaklık etken faktör olup süre ise gerekli kinetik koşulların sağlanması için gerekli olan parametredir. Bobinin her bölgesi yeterli sıcaklığa ulaşmadığında levha üzerinde bölgesel mekanik değişimler gözlemlenmektedir. Homojen ısı dağılımının kontrol edilmesi için bobinler termo çift yardımıyla kontrol edilmekte ve proses aralığı sürekli olarak takip edilmektedir.

2.3. LEVHA ÜRÜNLERDE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

Levha formuna sahip ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, nihai kullanım alanlarındaki hesapları ve malzeme seçim kriterlerini göz önünde bulundurarak gerçekleştirilmelidir. Malzemenin mekanik özellikleri, malzeme özellikleri ve imalat yöntemine göre değişiklikler göstermektedir. Genel olarak malzemenin nihai kullanımdaki performansı malzeme özellikleri, üretim proseslerinin parametreleri ve deformasyon şartları ile belirlenmektedir. Malzeme performansı levha formundaki ürünlerde şekillendirilebilirlik ve mukavemet ile yorumlanmaktadır. Şekillendirme öncesi ve sonrası malzemenin performansını ölçecek testler uygulanarak malzeme hakkında fikir elde edilir ve yorumlar yapılır.



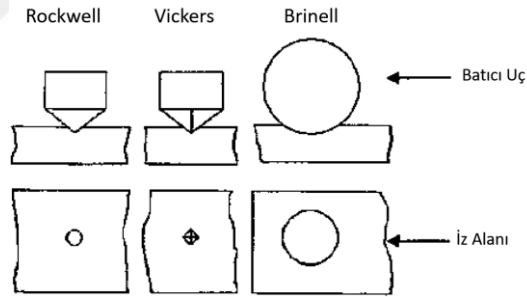
Şekil 2.2.16: Alüminyum levha ürünlerin şekillendirme kabiliyetlerini etkileyen parametreler

Levha olarak üretilen ürünlerde malzemenin performansının incelenmesi ve nihai formu almadan önceki durumu hakkında yorumların yapılması için uygulanan en yaygın test metotları

sertlik testi, çekme testi, eriksen derin çekilebilirlik testi, T büküm testleri ve kulaklanma testi olarak karşımıza çıkmaktadır. Uygulanan tüm testler malzeme özellikleri ve proses şartlarına göre değişmekte ve birer çıktı olarak kullanılmaktadır. Malzemelerde oluşan beklentilere göre yüzey sertliği incelenmekte, farklı kalınlıklarda üretilen levha ürünlerin mukavemet değerleri çekme testi ile kontrol edilmektedir. Şekillendirme kabiliyetinin incelenmesi için eriksen ve T büküm testleri uygulanmaktadır [24].

2.3.1 Sertlik Testi

Tahribatlı bir test olmasına karşın sertlik malzeme üzerinde yapılan en genel incelemelerden biridir. Genellikle konik veya küresel standart bir ucun malzemeye batırılmasına karşı malzemenin gösterdiği direnci ölçer. Uygun olarak seçilen uç, uygulanan yük altında malzemeye batırıldığında bir iz oluşturmaktadır. Malzemenin sertliği bu izin büyüklüğü ile ters orantılıdır. Levha ürünlerin sertlik ölçümlerinde yük olarak statik yükler kullanılmaktadır. Statik yükün uygulandığı ucun ve uygulanan yük aralıklarına göre makro sertlik ölçümleri üçe ayrılır.



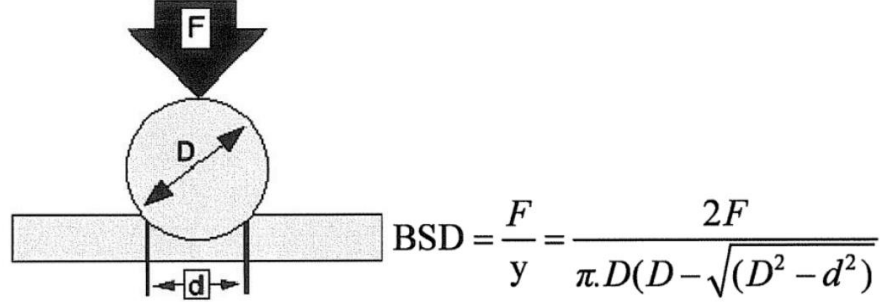
Şekil 2.2.17: Batıcı uç tipleri ve sertlik değerlerinin şematik gösterimi

Alüminyum mukavemet aralığı açısından Brinell yöntemi ile sertlik ölçümüne uygundur. Bu nedenle AA ve EN standartlarına göre verilen mukavemet aralıklarında Brinell ölçüm sonuçları tanımlanmıştır. Malzemede mukavemetin tanımlanması için daha basit bir yöntem olan sertlik ölçüm metodu ile malzemede kaplama veya yüzey sertleştirme yok ise mukavemet ile arasında bağıntı 2 yardımıyla geçiş yapılabilmektedir.

$$\sigma_{\text{ç}} (\text{kg/mm}^2) = 0,35 \times \text{BSD} (\text{kg/mm}^2)$$

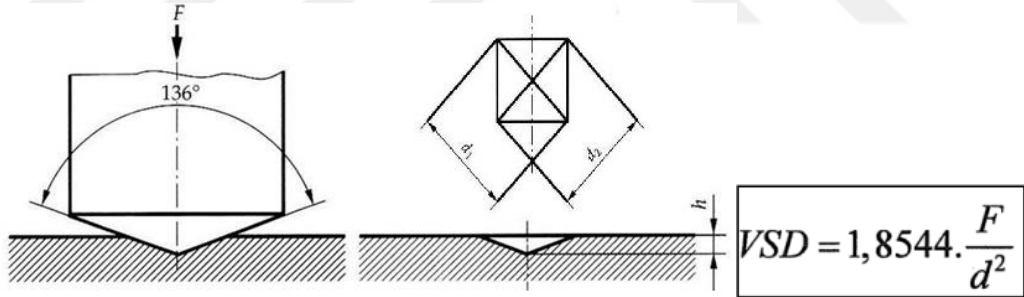
(2)

Brinell yöntemi 10 mm çapındaki küresel bir çelik ucun belirli bir F yükünde malzeme üzerinde bıraktığı izin çapının (d) ölçülmesiyle hesaplanmaktadır. Uygulanan kuvvetin malzeme üzerinde bıraktığı alan üzerinden brinell değeri hesaplanabilmektedir [24].



Şekil 2.2.18: Brinell sertlik ölçümü ve hesaplama yöntemi

Bu bağıntıda 10 mm çapındaki bilyaya yaklaşık olarak 10-15 saniye arasında yük uygulanır ve uygulanan yük sertliği ölçecek malzemenin cinsine ve bilya çapına göre seçilmektedir. $d/D = 0,20 - 0,70$ oranı sağlandığı durumda yük değeri doğru olarak kabul edilir.



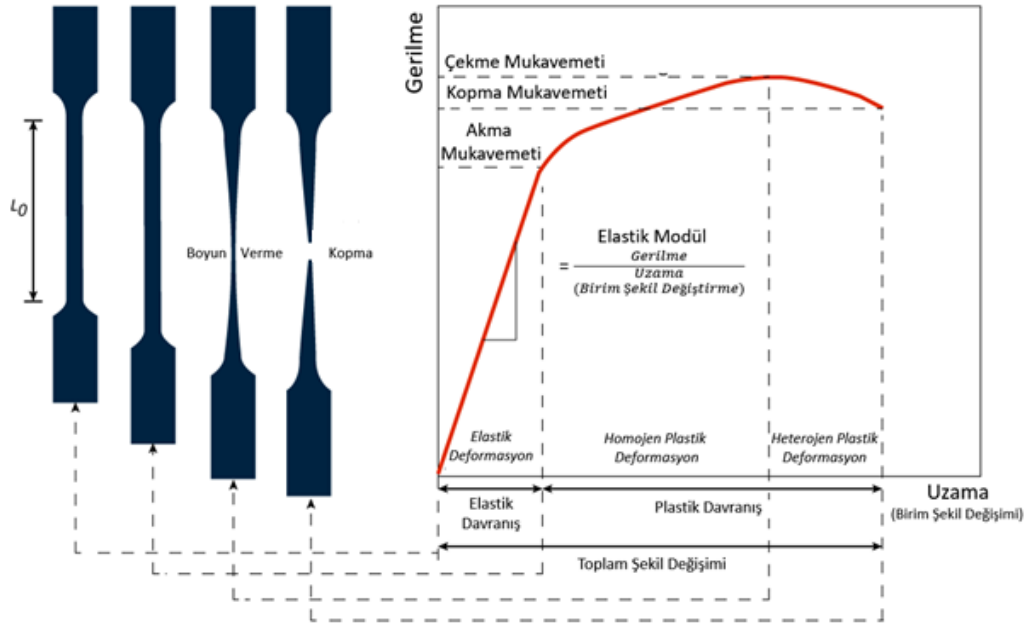
Şekil 2.2.19: Vickers sertlik ölçümü ve hesaplama yöntemi

Vickers sertlik ölçümünde 136° tepe açısına sahip elmas kare piramit uçlar kullanılmaktadır. Malzemeye bastırılan ucun köşegenleri ölçülerek hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu formülde yerine konularak sertlik değeri bulunmektedir. Vickers sertliği yüke bağlı değildir. Ölçüm hassasiyetinin artırılması için sistemde kamera bileşeninden faydalanılır. Yük 1-120 kgf arasında değişebilir. Vickers sertlik deneyi çok yumuşak ve sert tabakalar için uygundur. Deneyde düşük yük olduğu için genellikle ince parçalarda ve yüzey işlem görmüş malzemelerde tercih edilir [24].

2.3.2 Çekme Testi

Çekme testi sabit bir kesitte uygulanan ters yönlü yüke bağlı olarak malzemenin kesit alanının ters yönlü kuvvete bağlı gösterdiği direnci ifade eden diyagramlar ile incelenmektedir. Bu diyagramların elde edilmesinde uygulanan deney parçaları karşılaştırma yapılabilmesi için uluslararası standartlarca sabit ölçülerde belirtilmiş ve yükün uygulanması, uygulanacak deformasyon hızı, malzeme kalınlıkları yine standartlarca sabitlenmiştir [25].

Kesit alanı, deformasyon hızı, malzeme yüzey özellikleri, çekme testi sıcaklığı, uygulanan kuvvetin stabilitesi çekme testi sonucunu etkilemesi sebebiyle özel sınır şartları tanımlanmıştır. Bu şartlara istinaden gerçekleştirilen testler kabul kriterleri çerçevesinde onaylanmaktadır. Çekme test numunesinin şematik gösterimi ve uygulama sırasında oluşan malzeme davranışları Şekil 2.2.20'de verilmiştir [25].



Şekil 2.2.20: Çekme test numunesi ve test uygulama sırasında çekme diyagramında oluşan bölge tanımlamaları [26]

Gerilme (σ): Birim alana etkiyen yük anlamına gelir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Uzama (Birim Şekil Değişirme) : Malzemeye uygulanan kuvvet sonrasında başlangıç boyutu (l_0) ile deneyin herhangi bir anındaki P yüküne maruz kalan alanın birim şekil değişirme farkının o andaki uzama birimine (l) bölümü ile elde edilmektedir.

$$e = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

Gerçek Uzama (Şekil Değişirme) (ε): Deney sırasında ölçü sürekli olarak değişmektedir. Ölçü sırasında kontrollü olarak birim uzama alındığı taktirde gerçek şekil değişirme elde edilmektedir.

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (5)$$

ε logaritmik şekil değişirmedir. $l > l_0$ olması sebebiyle değer pozitif çıkacaktır.

$$\frac{l}{l_0} = 1 + e \quad (6)$$

Olarak yazılıp denklem 5'e taşınırsa,

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (7)$$

olarak elde edilmektedir.

Elastisite Modülü (E): Malzemeye kuvvet uygulanması sonrasında malzeme, yüke karşı bağ kuvvetlerince bir dayanım gösterecektir. Bu bölgede malzemede herhangi bir şekil değişimi olmayıp elastik davranış gösterecektir. Yük ve birim şekil değişirme arasında lineer bir eğri görülen bu bölge malzemeler için karakteristik bir eğimdir ve "Hooke Kanunu" ile tanımlanmaktadır [25].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (8)$$

Akma Mukavemeti (σ_a): Uygulanan dik yönlü çekme kuvvetine karşılık gerilmenin yaklaşık olarak sabit kalmasına rağmen plastik şekil değiştirmenin yüksek oranla arttığı bölgede malzeme homojen plastik şekil değişirme bölgesine girmektedir. Bu bölgenin başlangıcı akma

mukavemeti olarak tanımlanmaktadır. Malzemelerin belirgin akma göstermemesi durumunda genelde %0,2 bölgesindeki plastik uzamaya karşılık gelen gerilme değeri akma mukavemeti olarak tanımlanır [25].. Akma mukavemeti:

$$\sigma = \frac{P_a}{A_0} \quad (9)$$

Rezilyans: Malzemenin yalnız elastik şekil değiştirmesi için harcanan enerji en son kopma gerçekleştiğinde geri salınacaktır. Geri salınan bu enerjiye rezilyans denir. Elastik bölgenin akma mukavemeti bölgesine kadar olan bölgesindeki alan toplamı bize rezilyansı vermektedir [25].

$$\frac{\sigma_0 \cdot \epsilon_{el}}{2} \quad (10)$$

$$\text{Rezilyans Modülü} = \frac{\sigma_0^2}{2E} \quad (11)$$

2.4. DENEY SERİLERİNDE VERİLERİ REGRESYON ANALİZİ İLE SAYISAL MODELLEME

Sayısal düşünce ile araştırma prensiplerinin temel hedeflerinden biri karmaşık sistemlerin bileşenleri arasındaki ilişkiyi tahmin etmektir. İlişkinin etkin ve doğru bir şekilde belirlenebilirse sistemin çıktıları da etkin bir şekilde öngörülebilecektir. Sayısal olarak modelleme işlemi gerçekleştirilmeden önce verilerin uyumlu olup olmadığı ve herhangi bir sayısal modele uygulanabilirliği incelenmelidir. Değişkenler arasındaki ilişki istatistiksel olarak bir uyum öngörüyorsa sayısal modelleme tercih edilebilmektedir [27].

Eğer Y değişkeni X'in aldığı değerlere bağlı olarak değişen değerler alıyorsa ve bu ilişkinin doğrusal, parabolik, üstel değerlere bağlı olarak değiştiği düşünülüyorsa bu iki değişkenin arasındaki ilişki bir fonksiyon bağıntısı ile tanımlanabilir. Ancak Y bağımlı değişkenini değiştiren tek etmen X'in kendisi değil aynı zamanda bu değerden sapmaları ifade eden hata fonksiyonları da olacaktır. Bu durumda ilişkiyi ifade edecek doğru denkleminde ayrıca hata terimleri bulunmalıdır [27].

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (12)$$

Bu modelde yer alan sembollerin anlamları aşağıdaki gibidir:

Y=Bağımlı Değişken; X= Bağımsız (açıklayıcı) Değişken,

β_0 =(Modelle önerilen doğrunun Y eksenini kestiği noktanın orjine uzaklığı)

β_1 =(Modelle önerilen doğrunun eğimi)

ε =(Rastlantısal hata). Hataların dağılım normaldir ve bu dağılımın ortalaması sıfır ve değişkenliğide σ^2 gibi bir sabittir [27].

2.4.1 Anova Tablosu Yardımı İle Modelin Değerlendirilmesi (Tek Yönlü Varyans Analizi)

ANOVA açılımı “Analysis of Variance” olarak iki veya daha fazla grup arasında belirli bir değişkene dayalı olarak farklılık olup olmadığını incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Temel olarak varyans analizi, gruplar arasındaki değişkenliği, grupların içindeki değerler arasındaki değişkenliğe oranlar. Analizin amacı gruplar arasındaki farklılaşmanın, değerler arasındaki farklılaşmadan büyük olup olmadığını tespit etmektir [27].

Önerilen modelin eldeki veriyle ne kadar uygun olduğu ANOVA tablosundaki bilgilerin kullanımıyla saptanılabilir [27]. Tablodaki değerlere göre regresyon analizinden alınan veriler aşağıdaki gibi incelenebilir:

- a. Y'deki değişkenliğin açıklayıcı modeldeki rolü X değişkeni midir ? Bu sorunun yanıtı $H_0:\beta_1=0$ hipotezinin $H_1:\beta_1\neq 0$ hipotezine karşı test edilmesi ile verilebilir. Eğer $H_0:\beta_1=0$ hipotezi reddedilirse model anlamlı demektir. Eğer reddedilmez ise modelin hiçbir anlamı yok yargısına varılmaktadır. Anlamsız bir modelle başka analizlerin yapılmasının anlamlı olmayacağı bellidir. $H_0:\beta_1=0$ hipotezinin $H_1:\beta_1\neq 0$ hipotezine karşı testinde kullanılacak test istatistiği F_R (ve/veya Bu istatistikle ilgili olarak hesaplanan p-değeri) dir. Eğer $F_R \geq F_\alpha$ veya $p\text{-değeri} < \alpha$ ise $H_0:\beta_1=0$ hipotezi reddedilir.
- b. Eğer $H_0:\beta_1=0$ hipotezi reddedilirse, modelin Y'deki toplam değişkenliğin ne kadarını (%olarak) açıkladığının hesaplanması ve bu yüzdeninde %100'e yakın olması istenir. Bu konuda gerekli bilgi Belirleyicilik katsayısı tarafından verilir.

- c. $R^2 = \% \left(\frac{KTR}{KTG} \right) * 100$ verilen değere belirleyicilik katsayısı denir. Buna alternatif olarak düzeltilmiş belirleyicilik katsayısı denilen ve modelin doğruluğunu belirleyen R^2_{adj} değeri vardır. $R^2_{adj} = \% \left(1 - \frac{(n-1)OKE}{KTG} \right) * 100$. Genelde $R^2_{adj} \leq R^2$ olarak belirtilir ancak R^2_{adj} modelin tanımlanması için daha güvenilir bir ölçüttür. Her ikisinin de %100'e yakın olması istenir. İki farklı anlamlı modelden R^2_{adj} değeri daha büyük olan diğerine göre tercih edilir. |



3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, ikiz merdaneli döküm yöntemi ile üretiliş 1050, 3005, 3105, 8006 alaşımlı alüminyum dövme alaşımları hazırlanmış ve kullanılmıştır. Ergitme işlemleri sırasında 99,5 alüminyum bileşimine sahip külçeler kullanılarak içerisine alaşım ilaveleri alaşım tabletleri ile yapılmıştır. Ergitme fırını ortalama 720 - 750 °C sıcaklık aralığındadır. Ergitme işlemi tamamlanan alüminyuma 20 dk. süresince içerisine klorür ve florür bazlı tuzlar ile karışık olacak şekilde azot beslenerek gaz giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Alaşım bileşimleri tutma fırınından döküm ağzına giden yolluk bölgesinden alınmış ve alınan numuneler SpectroLAB LA0LC00A marka optik emisyon cihazı ile ölçümlendirilmiştir. Ölçüm doğruluğunun sağlanması için numuneler her alaşım için dökülen 15 tonluk bobinlerin üretimi süresince 8 kez tekrarlanmıştır. Spektro numuneleri küresel alınarak malzemenin yüzeyindeki arkin oluşturduğu kıvılcıklar ve fotonların spektrum üzerindeki izdüşümlerine göre hesaplanmaktadır. Kullanılan spektrometre ve numune görselleri Şekil 3.1’ de görülebilir. Optik emisyon spektrometresi ile alınan test sonuçları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1: Üretilen malzemelerin optik emisyon spektrometre sonuçlarının ortalamaları.

Alaşım Serisi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
1050	0,085	0,249	0,004	0,017	0,004	99,571
3005	0,116	0,447	0,073	1,073	0,234	97,924
3105	0,12	0,39	0,021	0,377	0,255	98,757
8006	0,158	1,856	0,002	0,684	0,003	97,274

Alaşım serilerinin dökme rulo kalınlıkları 6,25 olarak ölçümlenmiştir. Ortalama olarak 6,25 mm kalınlığa uygulanan deformasyon oranları ve numunelerin nihai kalınlıkları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Alaşım serilerine uygulanan deformasyon miktarı ve numune kalınlıkları

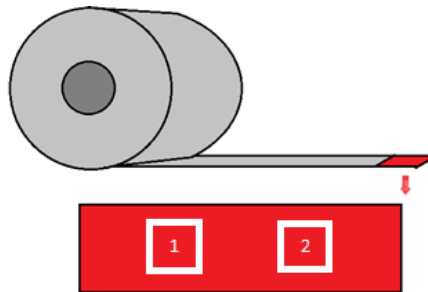
% Deformasyon	35	50	60	65	75	85	90	95
Numune Kalınlığı	4	3	2,5	2,15	1,5	0,9	0,6	0,3



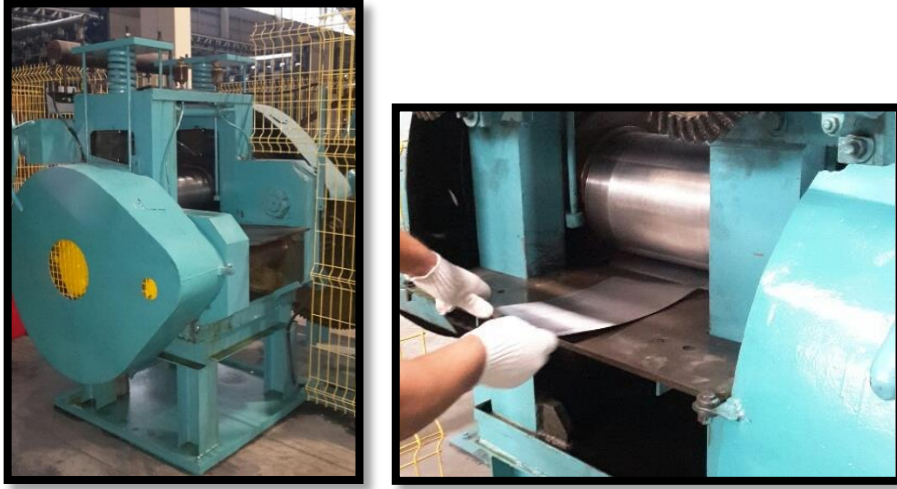
Şekil 3.1: SpectroLAB LA0LC00A marka optik emisyon cihazı ve alüminyum spektro numuneleri

Alaşımın tamamı aynı döküm hattında dökülmüştür. Döküm işlemi sırasında katılma aralıklarındaki farklılıklar dolayısı ile üretim parametreleri 6,2 mm döküm kalınlıklarında olacak şekilde sabitlenmiştir. Döküm kalınlıkları benzer tutularak haddeleme işlemi sonrasında oluşacak toplam deformasyon oranı sabit tutulmuştur. Hacimsel farktan oluşacak ekstra deformasyon miktarı ve tavlama sonrasındaki yeniden kristallenme noktasında farklılıklar yaşanmaması sağlanmıştır.

Döküm işleminin ardından haddeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Dökme rulodan kalınlığın 6,25 olduğu bölgeden alınmıştır. Levha halinde alınan numuneler aynı genişliktedir ve en boyunca çeyrek bölgelerden 2 adet numune alınarak düzlemsel olarak katılma profili benzer bölgeler olması sağlanmıştır. Numune alım bölgeleri Şekil 3.2’ de görülebilir.

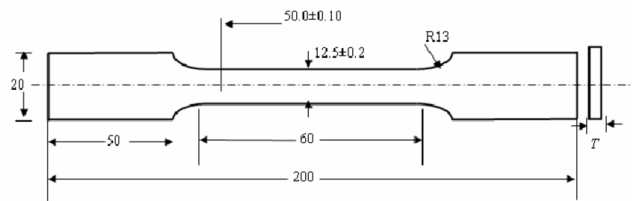


Şekil 3.2: Rulo döküm esnasında numune alım bölgelerinin şematik gösterimi



Şekil 3.3: Prototip hadde ile ikiz merdaneli dökülmüş levhaların haddelenmesi

Alınan numuneler Şekil 3.3’de görüldüğü üzere prototip haddeleme makinasında haddelenmiştir. Haddeleme işlemleri esnasında deformasyon oranı sabit tutulmuştur. Deformasyonlar sırasıyla %35, 50, 60, 65, 75, 85, 90 ve 95 olarak uygulanmıştır. Farklı oranlarda deforme edilmiş levha ürünler “TS-EN 485-1 Alüminyum ve alaşımları Saç, Levha, Şerit ve Plaka Teknik Muayene” standardında belirtildiği şekilde çekme testi numuneleri hazırlanmıştır. Numune kenar bölgelerinin çekme mukavemetine etkisini minimum seviyeye indirmek için çekme numuneleri hidrolik presler vasıtası ile farklı kalınlıklar için hazırlanmış numune kalıplarından alınmıştır. Çekme numune ölçüleri ve test çubuğu basma presleri Şekil 3.4’de görülebilir.



Şekil 3.4: Çekme numunesi basma presleri ve numune ölçülerinin şematik gösterimi.

Isıl işlem süresi her bir seride 4 saat olarak sabit tutulmuştur. Sıcaklıklar ise yeniden kristallenme sıcaklığının öncesi ve sonrasının incelenmesi için 220 °C ile 480 °C aralığında 20°C aralıklarla uygulanmıştır. Isıl işlem Nabertherm marka laboratuvar tipi ısıl işlem fırınında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5: Nabertherm marka laboratuvar tipi ısıl işlem fırını.

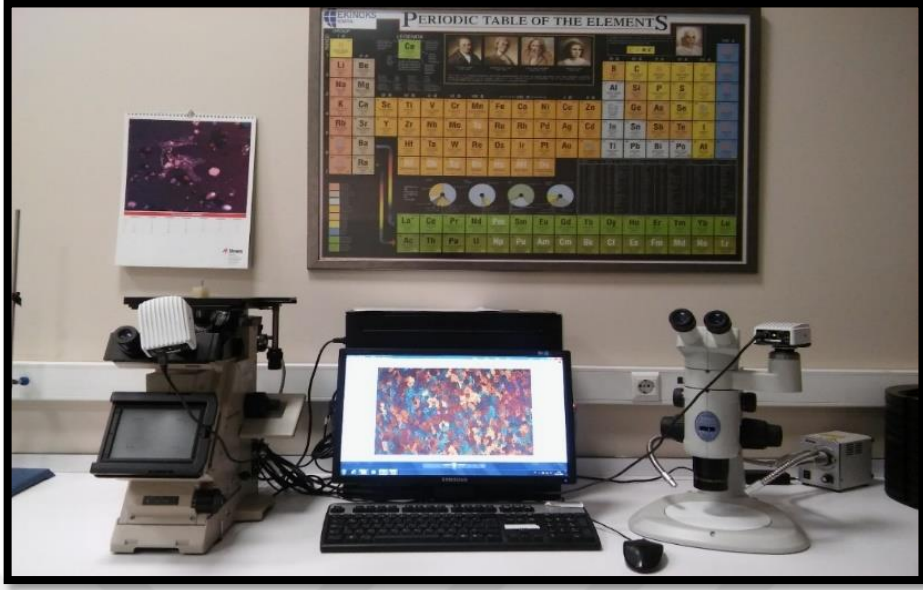
Soğuk deformasyon uygulanmış ve ısıl işlem görmüş tüm malzemelere çekme, sertlik, erichsen testleri uygulanmıştır. Çekme testleri 5 ton yük uygulayan ve test sırasında ekstansometreler ile anlık kesit ölçümü gerçekleştiren Zwick/Roell Z050 TH marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Erichsen Testleri Zwick Z020 model erichsen test cihazında gerçekleştirilmiştir. Erichsen numuneleri 10x10 cm olacak şekilde ayarlanmış ve levha merkezlenerek test işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6: Zwick/Roell Z050 TH çekme, erichsen test modüllü ve elektrik iletkenliği test cihazı.

SigmaScope SMP10 cihazı kullanılarak yapı içerisindeki tane büyüklüğüne bağlı olarak elektrik iletkenliğindeki değişimler incelenmiştir. Elektrik iletkenliği verileri MS/m birimi cinsinden alınmıştır. Her bir deformasyon oranı için cihaz bakır master numunesi ile kalibre edilmiştir.

Elde edilen çekme mukavemeti, akma mukavemeti, yüzde şekil değişimi, sertlik ve erichsen verileri uygulanan deney serisine bağlı olarak Minitab 18 istatistiksel analiz programında incelemelere tabi tutulmuştur. İncelemeler sırasında kübik regresyon modelinin uygun olduğu görüşmüş ve regresyon model verileri alınarak ilgili malzemeler için datalar Microsoft Excel ortamında program haline getirilmiştir.



Şekil 3.7: Olympus optik mikroskop ve Nikon SMZ 745 stereo mikroskop.

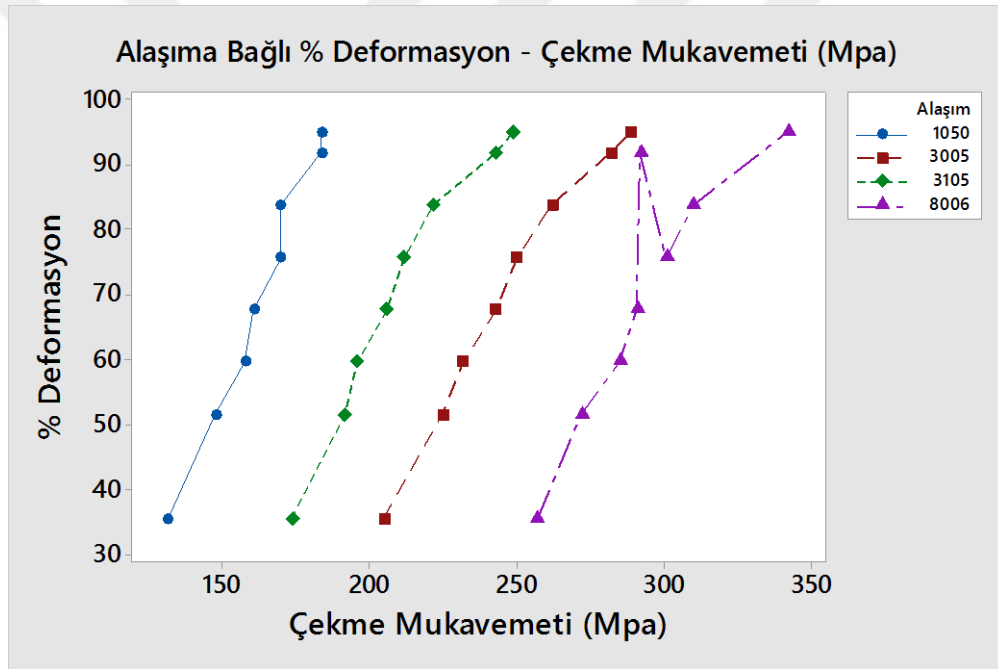
Mekanik testleri gerçekleştirilen numunelerin kulak kısımlarından mikroyapı incelemesi için numuneler alınmıştır. Alınan numunelere klasik metalografi işlemleri uygulanmasının ardından Olympus marka optik mikroskop altında farklı büyütmelerde mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca erichsen numunelerinde oluşan çatlak bölgesinin incelenmesi için sabit büyütmede stereo mikroskop görüntüleri alınmıştır. Stereo mikroskop olarak Nikon SMZ 745 kullanılmıştır. |

4. BULGULAR

4.1 ÇEKME TESTİ DENEY SONUÇLARI

4.1.1 Isıl İşlem Sıcaklığı Ve Deformasyon Yüzdesine Bağlı Çekme Mukavemeti Değerlerinin Yorumlanması

Dene sürecinde süre sabit tutulmuş sıcaklık, yüzde deformasyon parametrelerine bağlı olarak test sonuçları her bir alaşım için incelenmiştir. Isıl işlem gerçekleştirilmeden önce %35 ile 95 arasında deforme edilmiş 1050, 3005, 3105 ve 8006 alaşım serili alüminyum levhaların çekme mukavemeti davranışları Şekil 4.1’de verilmiştir.

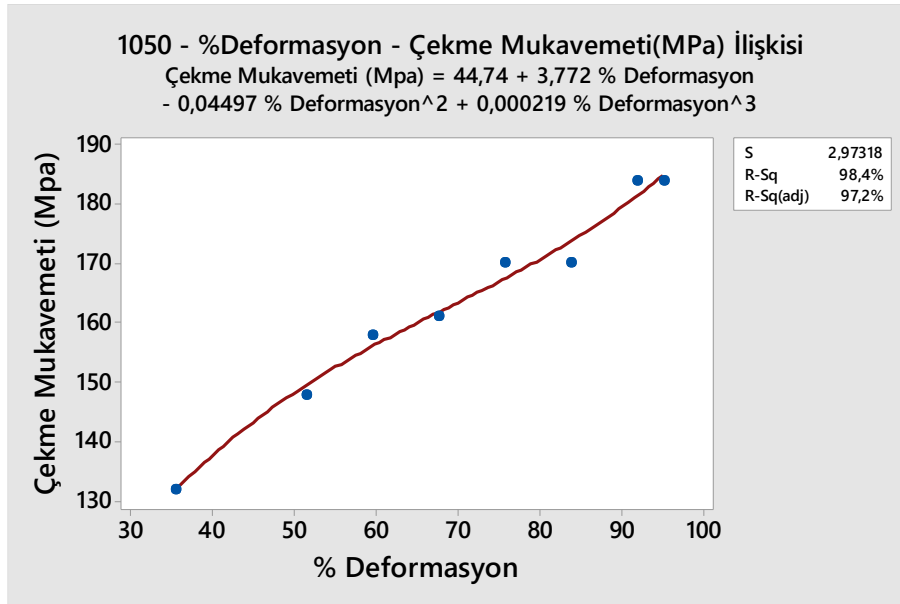


Şekil 4.1: Alaşım serilerinin deformasyon yüzdesine bağlı çekme mukavemeti değişim grafiği

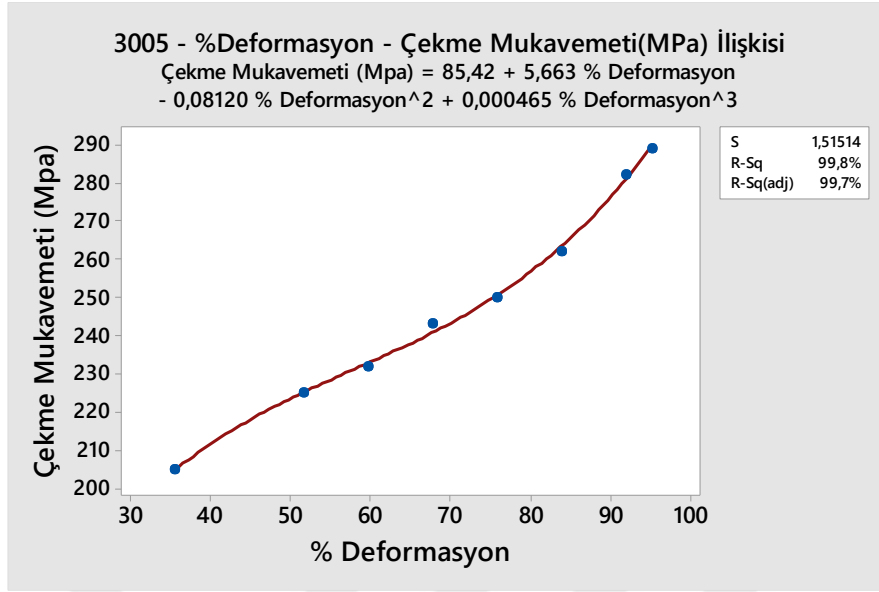
Alaşım serileri kendi aralarında değerlendirildiğinde çekme mukavemeti içerisindeki alaşım elementi miktarına göre değiştiği görülmektedir. Alüminyum oranı en yüksek ve alaşımca fakir olan 1050 serisi en düşük mukavemet değerlerini gösterirken, alaşımca en zengin ve alüminyum oranı en düşük 8006 serisinde çekme mukavemeti en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir. Deformasyon miktarı arttıkça 3005, 3105 ve 8006 serili alaşımların mukavemet artışındaki

eğim gittikçe artmaktadır. Bu durum deformasyon sertleşmesinde metaller arası bileşenlerin yapıdaki iç gerilimi arttırmaya yönelik davranışının etkili olduğu görülmektedir.

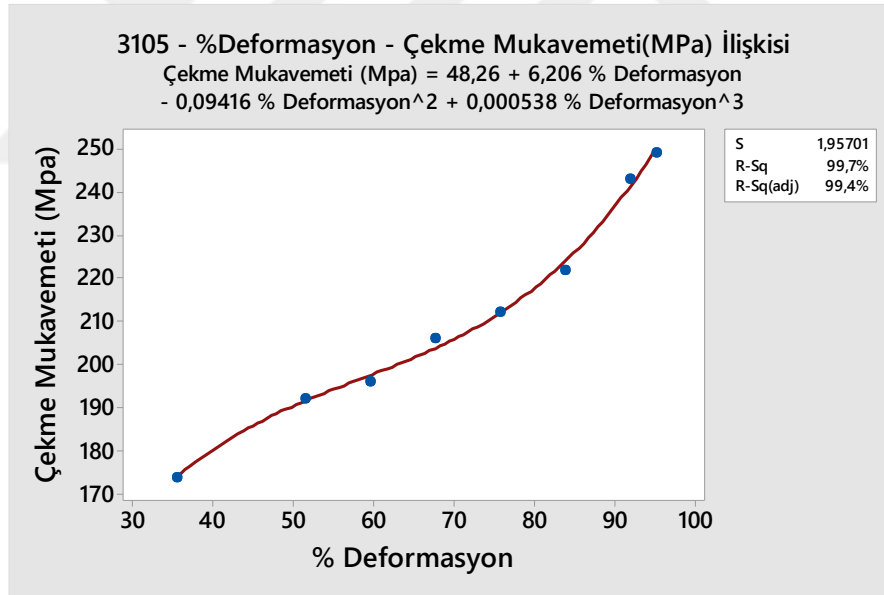
Deformasyon miktarına bağlı olarak çekme mukavemetindeki değişimi gösteren polinomial regresyon denklemleri ve modelin geçerliliğini ifade eden standart sapma, R-Sq ve R-Sq(adj) değerleri aşağıdaki şekillerde tanımlanmıştır. Verilen regresyon denklemleri parametrik olarak farklı deformasyon oranlarında malzemenin davranışını ve mekanik özellik artışını simgelemektedir. Üretilen ürünlerde son tav işleminden ziyade ara sıcaklıklarda tavlama işlemi (pre-annealed) gerçekleştirilecekse ara tav işlemi homojenleştirme tavı olacak şekilde uygulanabilir ve homojen tav sonrası tamamen yeniden kristallenen yapı için uygulanacak deformasyon oranına göre yine aşağıdaki polinomial regresyon denklemleri kullanılabilir. Elde edilen regresyon denklemleri ikiz merdaneli döküm yöntemi ile üretilen alüminyum levha ürünler için geçerlidir. Çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzama değerleri tek eksenli deformasyon işlemine bağlı olarak incelenmesi sebebiyle hadde yönüne dik yönde gerçekleştirilen sıcak haddelenmiş direk soğutmalı döküm ürünleri içinde benzer yöntemle optimize edilebilmektedir. Elde edilen çekme mukavemetinin deformasyona bağlı değişimlerinin regresyon analizleri Şekil 4.2 – 4.5’deki grafiklerde tanımlanmıştır.



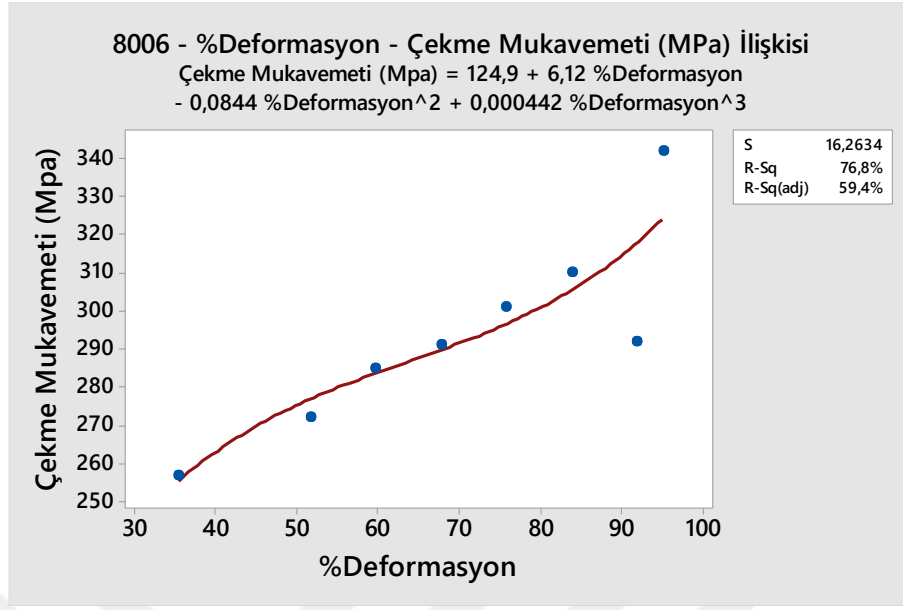
Şekil 4.2: 1050 serili alüminyum alaşımının deformasyon oranına bağlı çekme mukavemeti değişimi



Şekil 4.3: 3005 serili alüminyum alaşımının deformasyon oranına bağlı çekme mukavemeti değişimi

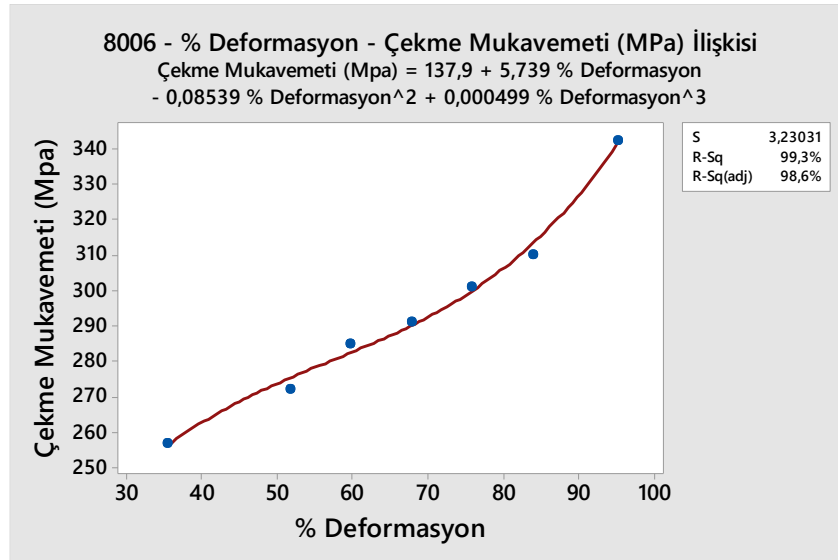


Şekil 4.4: 3105 serili alüminyum alaşımının deformasyon oranına bağlı çekme mukavemeti değişimi



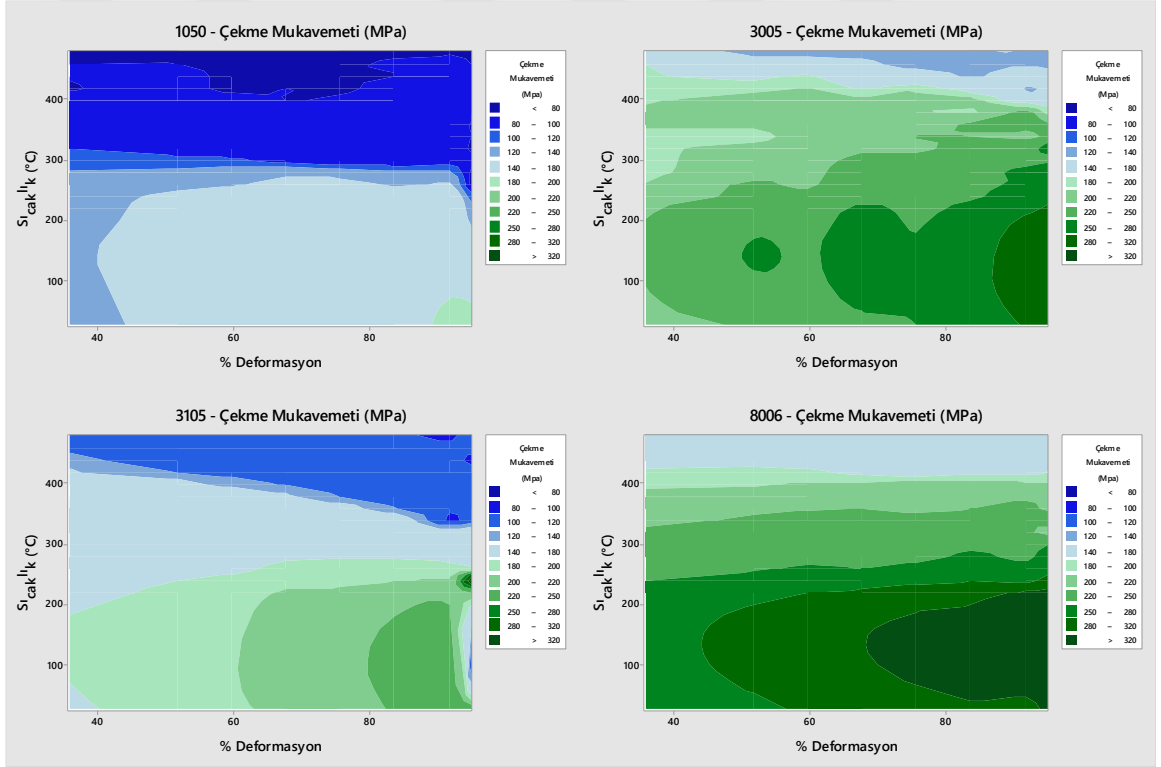
Şekil 4.5: 8006 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı çekme mukavemeti değişimi

8006 alaşım serisinde oluşturulan regresyon modelindeki R-sq değerindeki sapma ve modelin uyumluluğunun düştüğü görülmüştür. %90 deformasyon oranında elde edilen veri modelden çıkartıldığında modelin daha sağlıklı olarak elde edildiği görülmüştür. Ve %98,6 R-sq (adj) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.6: 8006 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı çekme mukavemeti değişimi düzeltilmiş hali.

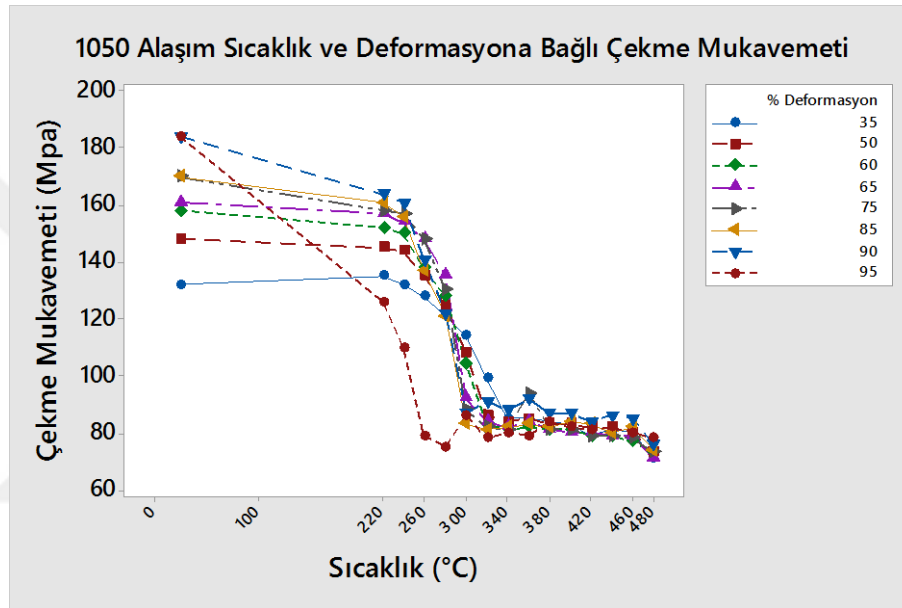
Haddemeleme sonrasında elde edilen numunelerin hepsine uygulanan ısıl işlemler sonrasında çekme testi verileri alınmıştır. Alınan çekme testi verileri ile ısıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı çekme mukavemeti (MPa) değerleri haritalandırılmıştır. Haritalandırılan çekme mukavemeti değişim grafiği Şekil 4.1.6'da görülebilir. Çekme mukavemeti değerlerine göre deformasyon yüzdesi arttıkça yeniden kristallenme sıcaklıkları düşmektedir. Bu durum yeniden kristallenmenin dislokasyon yoğunluğu arttıkça kolaylaştığını göstermektedir. Alaşımlar arasında kıyaslama yapıldığında çekme mukavemeti değeri alaşım içerisindeki katkı miktarı arttıkça artmaktadır. 1050 serisi alüminyum levha ticari saflığı en yüksek alaşıma sahiptir ve Şekil 4.1.6'da görülen değerler arasında en düşük çekme direncine sahip alaşım olarak görülebilir.



Şekil 4.7: Isıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak çekme mukavemeti değişimi

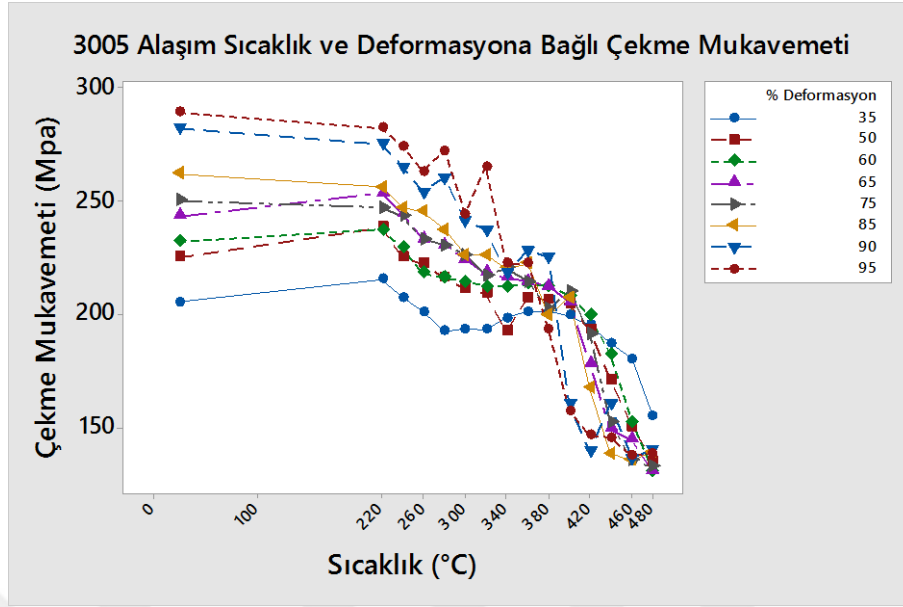
Ayrıca 8006 serili alüminyum sac levhaların ise tüm deformasyon oranlarında diğer serilere göre daha yüksek çekme mukavemeti gösterdiği görülmüştür. İkincil fazlar yapıda gerilim noktaları oluşturması sebebiyle çekme direncinde artışlara sebebiyet vermektedir. Deformasyon oranı %35'den, %95'e gittikçe yeniden kristallenme sıcaklığında düşüş yaşandığı Şekil 4.7'de 1050, 3005, 3105 alaşımlarında keskin geçiş hatları ile olduğu, 8006 serili

alüminyum alaşımlarda ise geçiş hatları şeklinde olduğu görülmektedir. Yapı içerisinde bulunan mangan ve demir düşük miktarlarda katıldığında deformasyon sertleşmesi ve malzeme mukavemetinin artmasında etkin rol üstlenmektedir. Demir ve silis fazları yapı içerisinde disperse davranış göstermeleri sebebiyle ısı işlem sıcaklığına bağlı olarak çekme mukavemeti değerlerinde kademeli düşüşler göstermekte ve genel mukavemet değerlerini yukarıya çıkarmaktadır. Şekil 4.8 – 4.11’deki verilen dağılım grafikleri dönüşüm bölgelerini daha detaylı olarak göstermektedir.



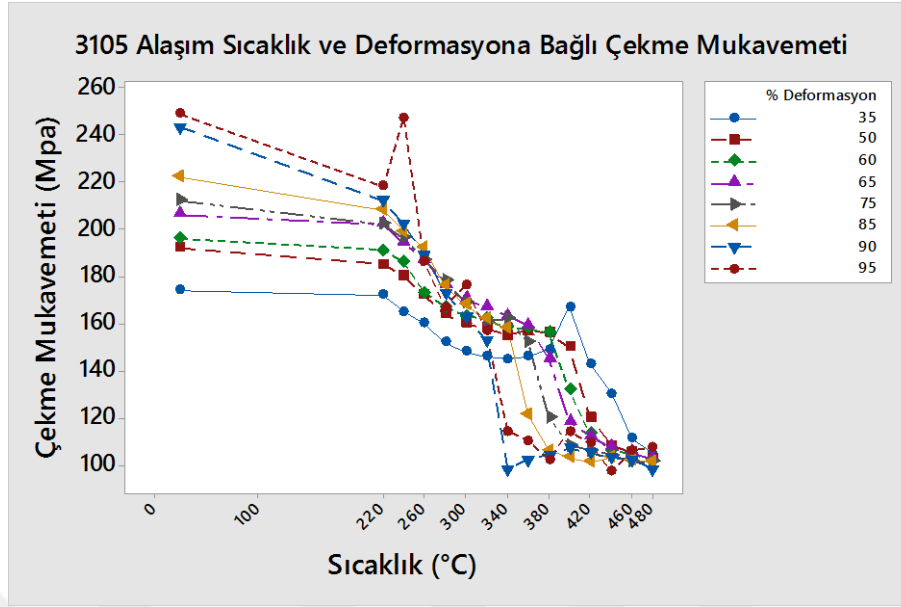
Şekil 4.8: 1050 seri alüminyum alaşımı çekme mukavemetinin ısı işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.

1050 alaşımlı alüminyum levha ürünlerde 260 °C sıcaklıkta ani bir geçişin olduğu gözlemlenebilir. Bu sıcaklıkta çekme mukavemeti değerlerinde ani bir düşüş yaşanarak 80 MPa değerlerine düşüş gözlemlenmiştir. Deformasyon oranı %95 seviyelerine ulaştığında yeniden kristallenme sıcaklığı 220 – 240 °C aralığında gerçekleşmektedir. Yapı içerisinde intermetalik bileşenlerin oldukça az olması sebebiyle oluşan homojen yapı deformasyon gerçekleşse dahi yapının benzer sıcaklık aralığında yeniden kristallenmesine sebep olduğu görülmüştür. Diğer alaşım serilerinden farklı olarak gerçekleştirilen tüm deformasyon oranları benzer aralıkta yeniden kristallendiği görülmüştür.



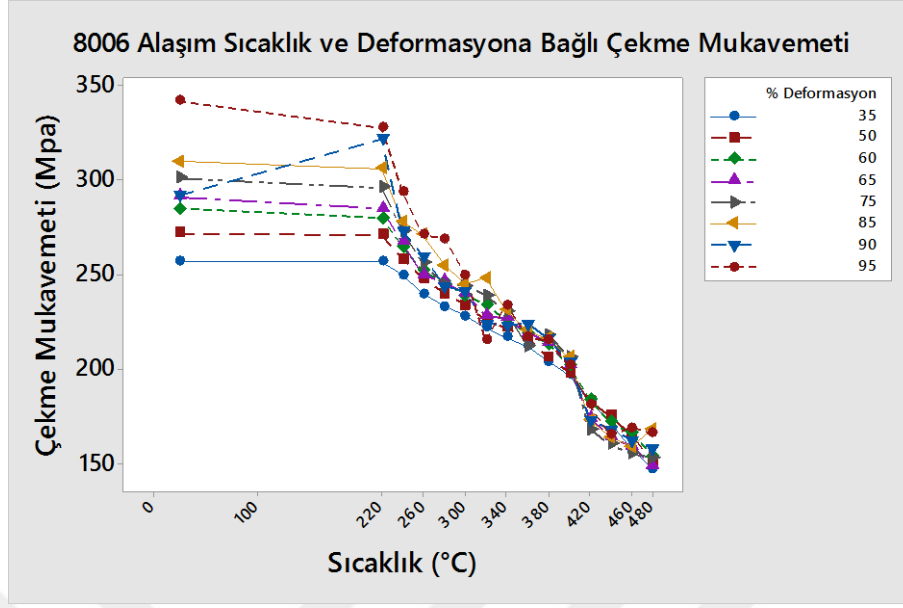
Şekil 4.9: 3005 seri alüminyum alaşımı çekme mukavemetinin ısı işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.

3005 alaşım serili alüminyum plakalar incelendiğinde mukavemet aralıklarının 1050 serisine göre daha geniş olduğu görülmektedir. En az deforme edilen %35 deformasyon değeri mukavemet olarak en düşük değerleri gösterirken ısı işlem sıcaklığından en az etkilendiği görülmektedir. Burada iç yapının yeteri kadar deformasyona uğramaması yeniden kristallenme sıcaklığının yükselmesi sonucunu doğurmaktadır. %95 deforme edilen malzemenin yeniden kristallenme sıcaklığı 420 °C mertebelerindeyken %35 deforme edilen malzemenin yeniden kristallenme sıcaklığı 480 °C civarında olduğu görülmektedir. Buradaki ısı işlem sıcaklıklarındaki farklılık yapının yeniden kristallenmesi için gerekli kinetik faktörün sağlanmadığını göstermektedir. Kesit alanı arttıkça benzer sürede malzemelerin homojenize olması isteniyorsa kullanılan sıcaklık 60 °C artırılmalıdır. Deformasyon oranı arttıkça elde benzer ısı işlem sıcaklıklarında elde edilen çekme mukavemeti değerleri artış göstermiş ve yeniden kristallenme noktaları düşmüştür. Bu alaşımda ayrıca toparlanma davranışı 300 °C sıcaklığında gerçekleştiği söylenebilir.



Şekil 4.10: 3105 seri alüminyum alaşımı çekme mukavemetinin ısı işleme sıcaklığına bağlı değişim grafiği.

3105 alaşımlı serinin çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde mukavemet değerleri 3005 alaşıma göre daha düşük olduğu görülmektedir. 3105 alaşımla benzer eğime sahiptir. Deformasyon oranına bağlı olarak gerçekleşen mukavemet değerleri ise birbirine daha yakındır. Liu ve arkadaşları [28], elektrik direnci ölçümü ile gerçekleştirdikleri yeniden kristallenme sıcaklığı incelemesinde 400 °C sıcaklığında toparlanma ve 500 °C yeniden kristallenmenin olduğunu incelemiştir. Yapılan deney sonuçlarında ikiz merdaneli döküm yöntemi ile üretilen 3105 alüminyum levhaların 300 °C sıcaklıkta toparlandığı ve 380 °C sıcaklıkta yeniden kristallenme olduğu mekanik test sonuçlarından anlaşılmaktadır. İç yapı değişimlerinin daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi ani katılaşmanın verdiği iç gerilimler sebebiyle olduğu düşünülmektedir. Deformasyona bağlı toplanma kademesi sonrasında yeniden kristallenme sıcaklığı deformasyon miktarı arttıkça geciktiği görülmektedir. Ayrıca Liu ve arkadaşları [28], 482 – 599 °C seviyesinde kaba şekillenmiş taneler gözlemlemiştir. Isıl işlem sıcaklığı artırılması durumunda yapı homojen olmamakla birlikte iç bölgelerde yeniden kristallenme gerçekleşmezken, dış bölgelerde kaba taneli mikroyapı gözlemlenmektedir. Bu sebeple ısı işleme sıcaklığının istenen değerler elde edilmesi sırasında toparlanma kademesine daha yakın bölgede tutularak malzemenin mekanik özelliklerindeki davranış iyileştirilebildiği elde edilen grafiklerden görülebilir.

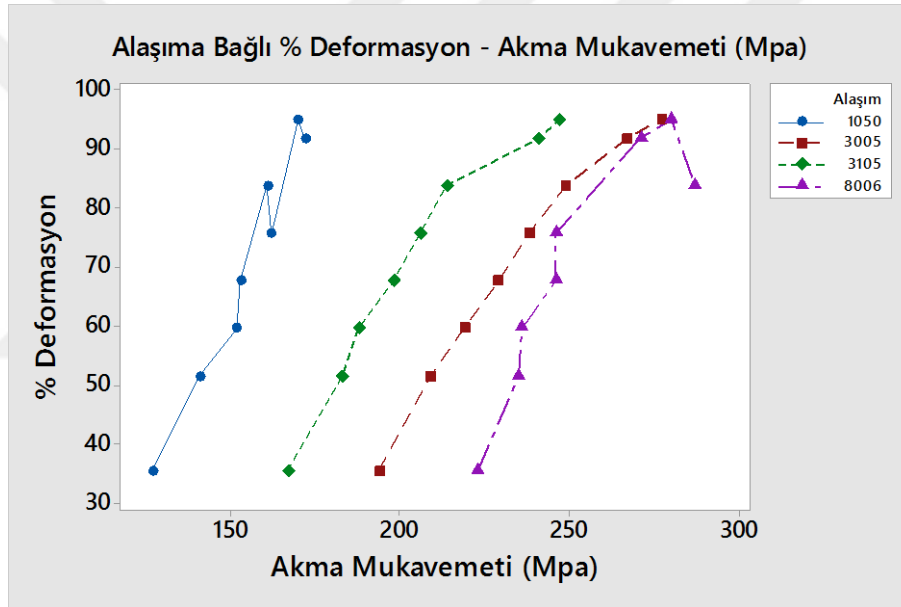


Şekil 4.11: 8006 seri alüminyum alaşımı çekme mukavemetinin ısı işleme sıcaklığına bağlı değişim grafiği.

8006 serili alüminyum alaşımının sıcaklığa ve deformasyona bağlı çekme mukavemeti değişimi incelendiğinde 220 °C sıcaklıkta gerçekleşen ısı işleme mekanik özelliklerde toparlanmaya etki etmediği tüm deformasyon oranlarında görülmüştür. Toparlanma davranışı diğer alaşım serilerine göre daha kademeli olarak gerçekleştiği görülmektedir. 380 °C’ de yeniden kristallenme hızı artmıştır. 8006 alaşımın gösterdiği diğer bir özellik ise tüm deformasyon oranlarında benzer çekme mukavemeti aralıklarına sahip olmasıdır. Deformasyon miktarından etkilenmemesinin sebebi ise yapı içerisinde disperse olmuş Fe ve Si bileşimlerinin ısı işleme sırasında yapının yeniden kristallenme mekanizmasına etki etmediği görülmüştür. M.Slamova [29], 2001 yılında 8006 alaşımlı ince kesitli alüminyum ürünlere yaptığı yeniden kristallenme çalışmasında tamamen yeniden kristallenmenin 350 – 380 °C’ de gerçekleştiğini, toparlanma davranışının ise 270 – 300 °C’de olduğunu söylemiştir. Şekil 4.1.10’da verilen farklı deformasyon oranlarına göre ısı işleme görmüş 8006 alaşımın çekme mukavemeti eğrileri incelendiğinde 270 – 300 °C sıcaklıkta keskin geçişler gözlemlenmemektedir. Ancak 380 °C ve sonrasında yeniden kristallenmenin başladığı ve 460 °C’de ise yeniden kristallenmenin tamamlandığı görülmektedir. 8006 alaşımı için deformasyon oranı yeniden kristallenme sıcaklığını bariz bir şekilde etkilemediği görülmüştür.

4.1.2 Isıl İşlem Sıcaklığı Ve Deformasyon Yüzdesine Bağlı Akma Mukavemeti Değerlerinin Yorumlanması

Akma mukavemetlerindeki değişimler incelendiğinde çekme mukavemetleri ile farklılıkları yorumlanması gerekirse, 1050 alaşım serisine sahip malzemelerin diğer alaşım serilerine oranla deformasyon görmesi sonrasında akma mukavemetlerinin artışı diğer alaşım serilerine oranla daha az gerçekleştiği görülmektedir. %35 ile %95 deformasyon oranları arasında 1050 alaşım 70 – 80 MPa fark gösterirken diğer alaşım serilerinde bu aralık 110 – 120 MPa olduğu görülmektedir. Şekil 4.12- 4.20 aralığında malzemelerin deformasyon oranına ve ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak akma mukavemeti davranışlarının değişimleri görülebilir.

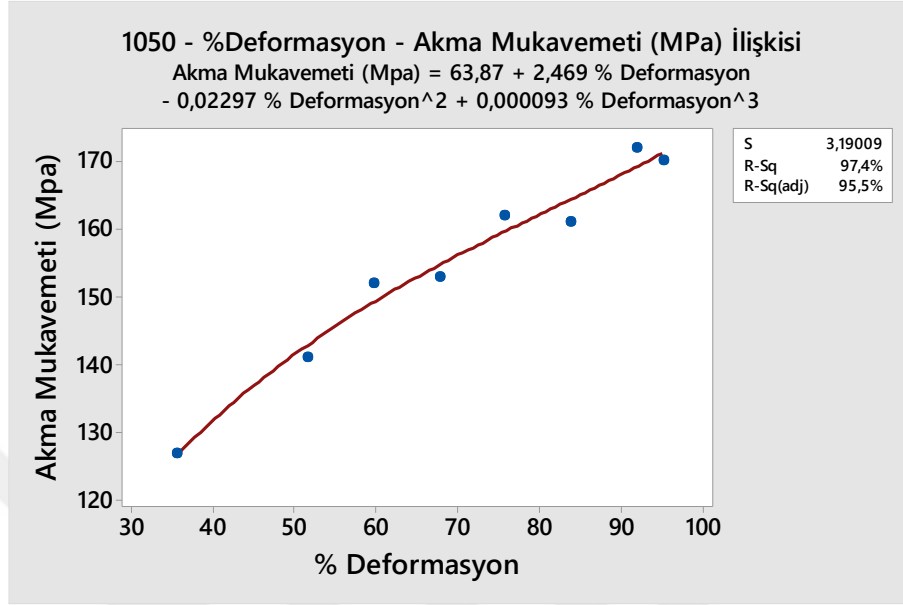


Şekil 4.12: Alaşım serilerinin deformasyon yüzdesine bağlı olarak akma mukavemeti değişimi.

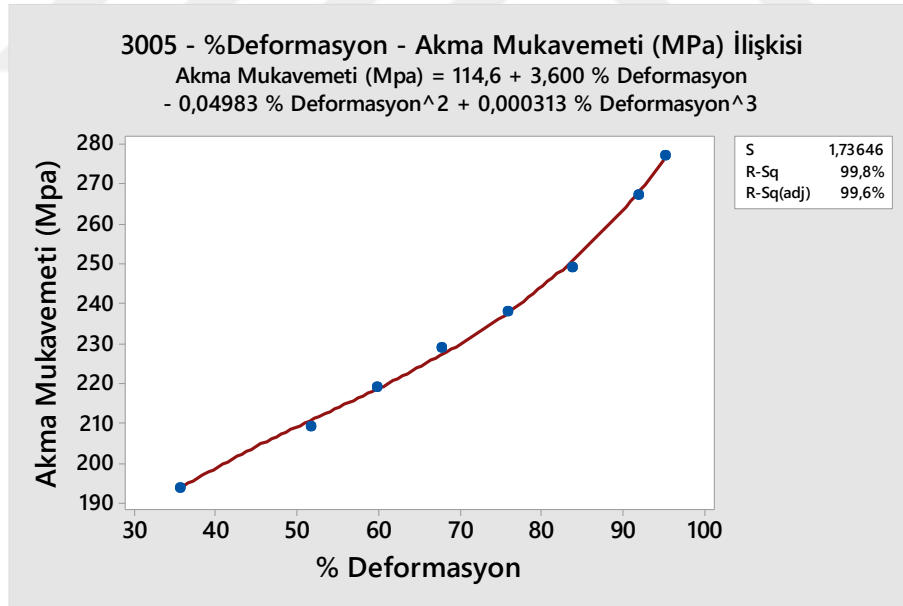
Şekil 4.12 incelendiğinde yapı içerisinde bulunan alaşım elementleri çekme mukavemetinde farklılık oluşturduğu gibi malzemenin rijitliğini ifade eden akma mukavemetinde de etkisini göstermektedir. 8006 serili alüminyum ürünler incelendiğinde eğimde azalmalar görülmektedir.

Deformasyon oranına bağlı olarak gerçekleştirilen polinomial regresyon modellerine aşağıda yer verilmiştir. Verilen denklemler kullanılarak, ikiz merdaneli döküm yöntemi ile

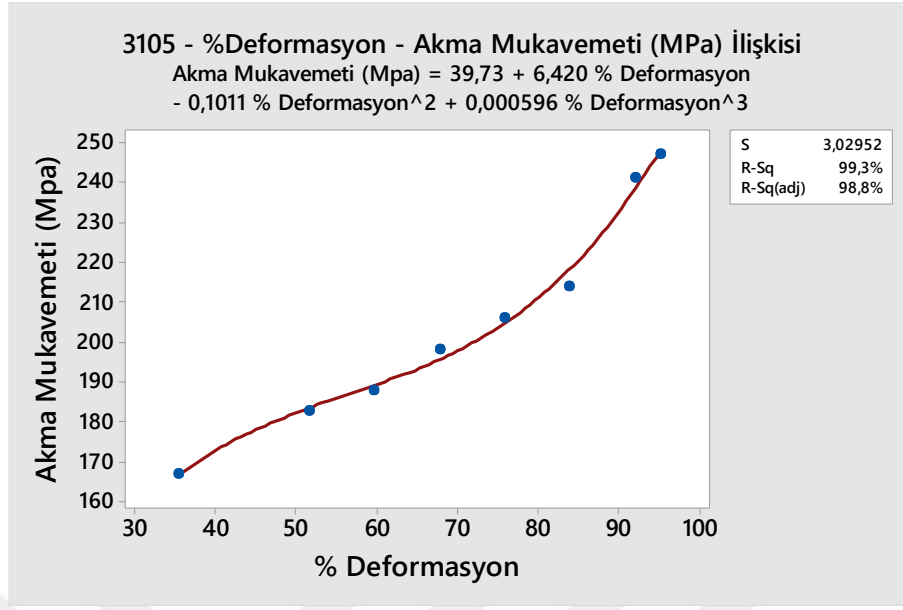
üretileen levhalarda, istenilen akma mukavemeti veya gerekli akma mukavemeti için istenilen deformasyon oranları %97 ve üzeri doğruluk oranlarında hesaplanabilecektir.



Şekil 4.13: 1050 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı akma mukavemeti değişimi

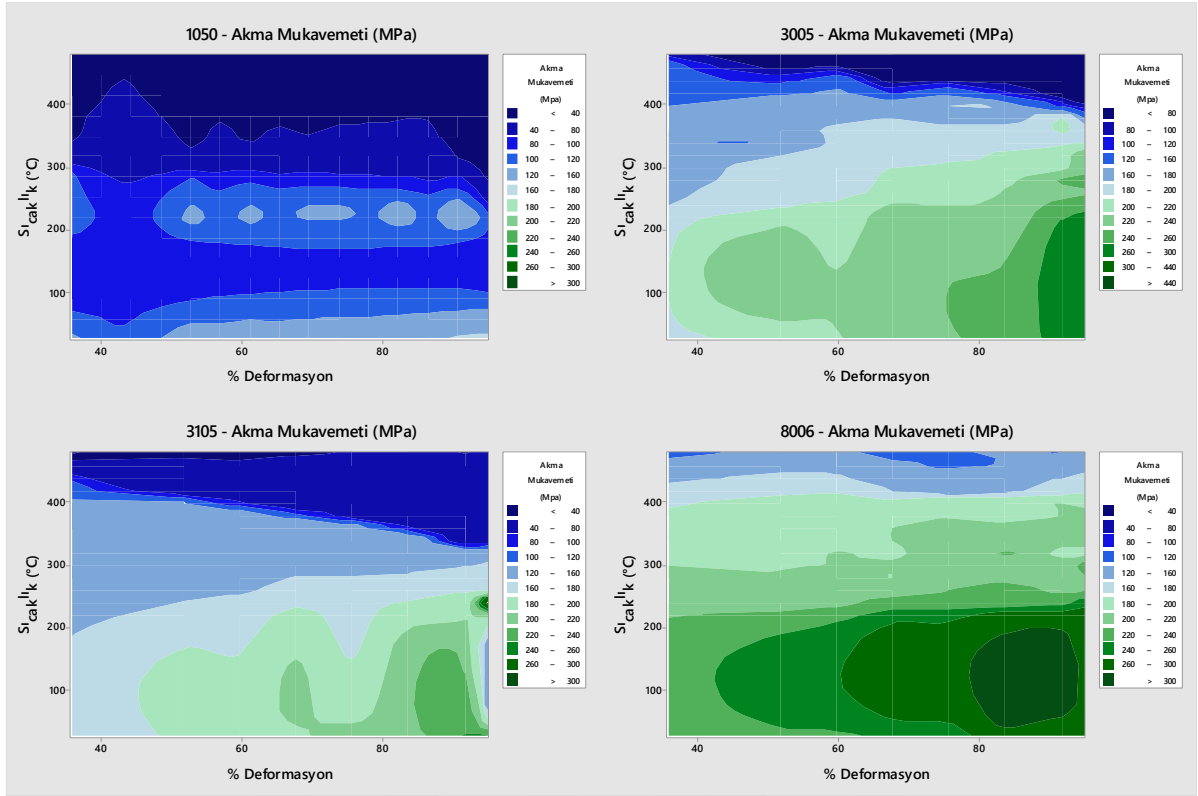


Şekil 4.14: 3005 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı akma mukavemeti değişimi



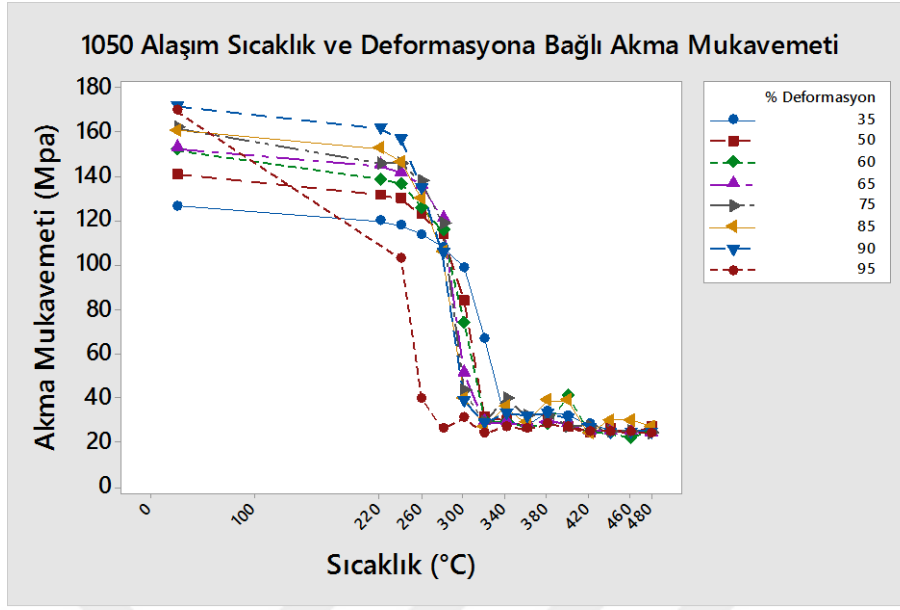
Şekil 4.15: 3105 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı akma mukavemeti değişimi

Akma mukavemeti değerleri incelendiğinde yine alaşım elementi miktarı arttıkça akma sınırlarında yükselişler görülmektedir. Alaşım elementi ilaveleri arttıkça yükselen akma mukavemeti ısıtma işlemi uygulanması akabinde tüm yapıda yeniden kristallenme bölgeleri görülebilmektedir. 1050 alaşımında yapı 280 °C sıcaklıktan itibaren akma dayanımında düşüşler hızlandığı görülmektedir. Çekme ve akma dayanımları yeniden kristallenme sonrasında benzer davranış sergilemektedir. Özellikle 3105 serili alaşımında 120 – 160 MPa aralığının deformasyon oranı arttıkça daha daraldığı görülmektedir.



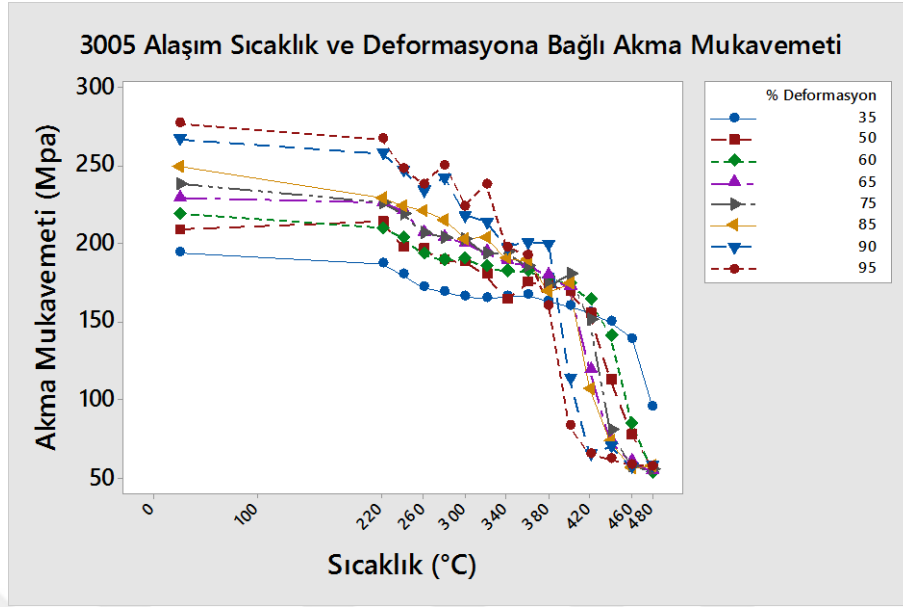
Şekil 4.16: Isıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak akma mukavemeti değişimi

Yeniden kristallenmenin gerçekleşmesi daha fazla deforme edilmiş malzemelerde daha dar bir aralıkta gerçekleştiği 3105 alaşımın akma mukavemeti davranışından görülebilir. Benzer durum 3005 ve 8006 alaşımları içinde geçerlidir. Akma mukavemeti grafikleri incelendiğinde en yüksek akma dayanımları yine iç gerilimi en yüksek olan %95 deforme edilmiş ve ısıl işlem görmemiş deney serisinde görülmüştür.

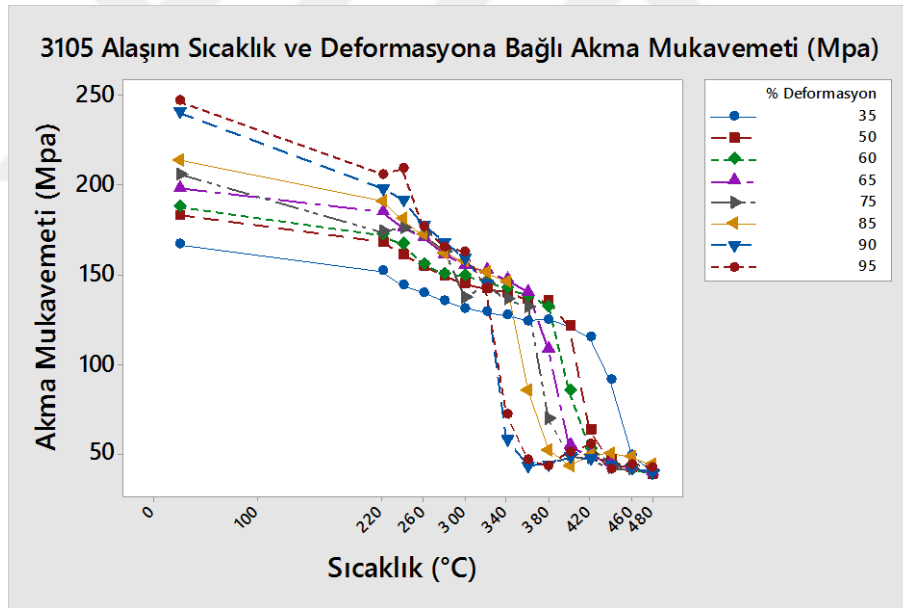


Şekil 4.17: 1050 serisi alüminyum ürünlerin ısıtılma sıcaklığı ve deformasyona bağlı akma mukavemeti sonuçları

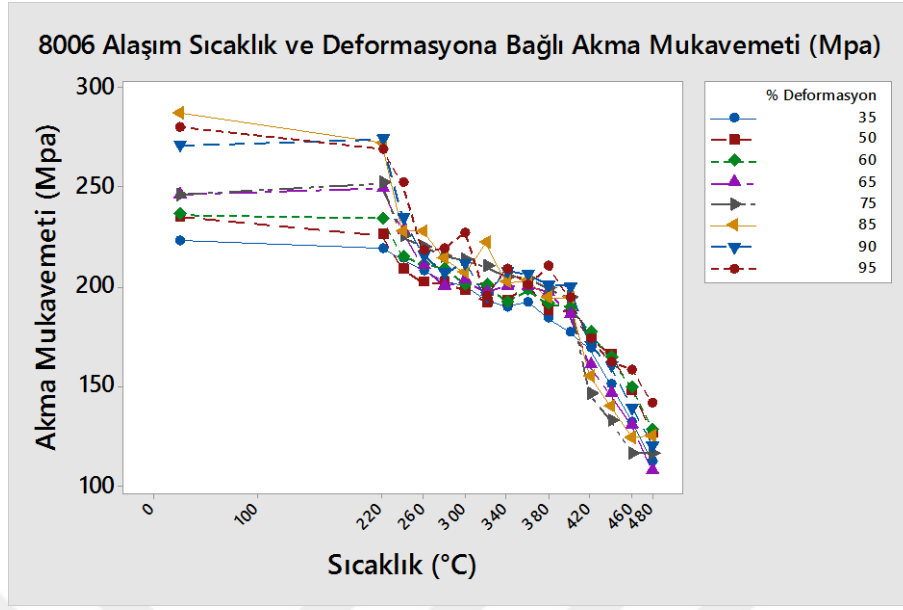
1050 alaşım serili alüminyum ürünlerin farklı deformasyon oranlarına bağlı olarak akma mukavemetindeki değişim grafiği incelendiğinde; %95 deformasyon sonrasında yeniden kristallenme sıcaklığının 280 °C sıcaklıktan 220 °C sıcaklıklara düştüğü görülmektedir. Deformasyon oranı %90 seviyelerinde ve daha altındayken yeniden kristallenme sıcaklığı 280 °C sıcaklığında gerçekleşmektedir. M. Mhedhbi ve arkadaşlarının çalışmasında [30], 1050 alaşımında %66 deformasyon uygulanması sonrasındaki mikro yapı incelemelerinde 300°C sonrasında tane büyümesi gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada yeniden kristallenme sonucu elde edilen mekanik mukavemet değerleri 40 MPa akma değerlerini ve %36 uzama değerlerini gösterse de bu değerlerin elde edildiği sıcaklık çalışmamızdakiler ile uyuşmamaktadır. Nitekim Qiao ve arkadaşlarının yaptığı diğer çalışmada [31], bu aralık 200 ve 375°C olarak belirtilmiştir. Yapılan çalışmalara istaneden akma ve çekme mukavemetlerinin 1050 alaşım için benzer sıcaklıklarda düştüğü görülmektedir. Bu ani düşüş yeniden kristallenme mekanizması ile açıklanabilir. Diğer alaşım serilerinde bu düşüş ikinci bir kademedeyken 1050 alaşımında toparlanma sıcaklığı 3005, 3105 ve 8006 alaşımlara kıyasla düşüktür. Toparlanma kademesi elde edilen grafikler ışığında yorumlanamamaktadır.



Şekil 4.18: 3005 serisi alüminyum ürünlerin ısıtım sıcaklığı ve deformasyona bağlı akma mukavemeti sonuçları



Şekil 4.19: 3105 serisi alüminyum ürünlerin ısıtım sıcaklığı ve deformasyona bağlı akma mukavemeti sonuçları

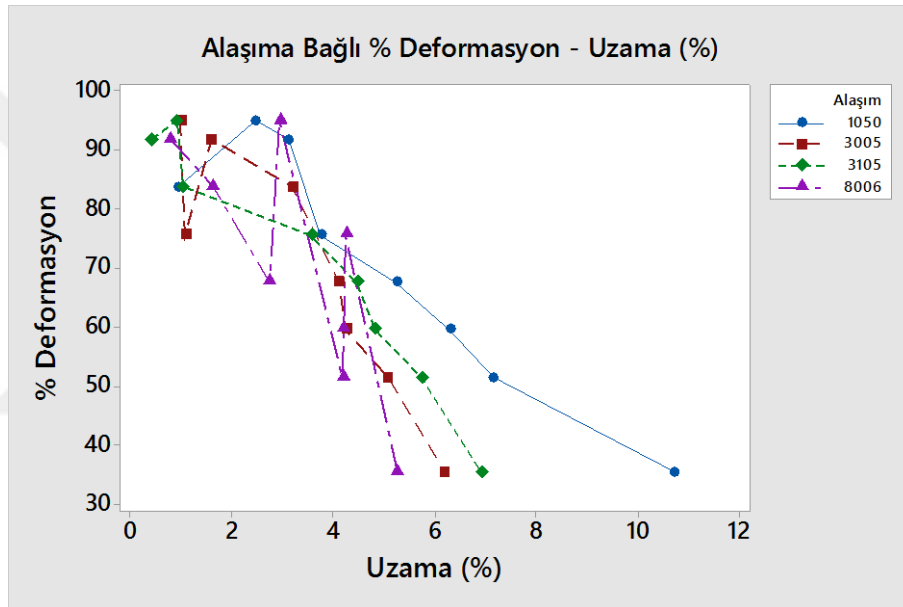


Şekil 4.20: 8006 serisi alüminyum ürünlerin ısıtım sıcaklığı ve deformasyona bağlı akma mukavemeti sonuçları

Şekil 4.18-20 aralığındaki grafiklerde verilen 3005, 3105 ve 8006 alüminyum alaşımlarının akma mukavemeti değerleri incelendiğinde çekme mukavemet eğrileri ile değerlerin paralellik gösterdiği görülebilir. Burada ısıtım sıcaklığı ile birlikte akma ve çekme mukavemeti arasındaki bölgenin elastik deformasyondaki değişkenliği artmakta ve asıl etki homojen plastik şekil değişimi bölgesinde gerçekleşmektedir. Akma mukavemeti malzemenin plastik şekil değiştirmeye başlama noktası olması itibari ile malzemelerin akma mukavemeti davranışları ve plastik birim şekil değişimi grafikleri kullanılarak malzeme seçim tasarımında hangi yüke maruz kalacağına bağlı dayanım kuvvetleri incelenebilir. Akma mukavemeti değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri farklı sıcaklıklarda şekil verme işlemi için veri oluşturmaktadır.

4.1.3. Isıl İşlem Sıcaklığı Ve Deformasyon Yüzdesine Bağlı Uzama Yüzdesinin Yorumlanması

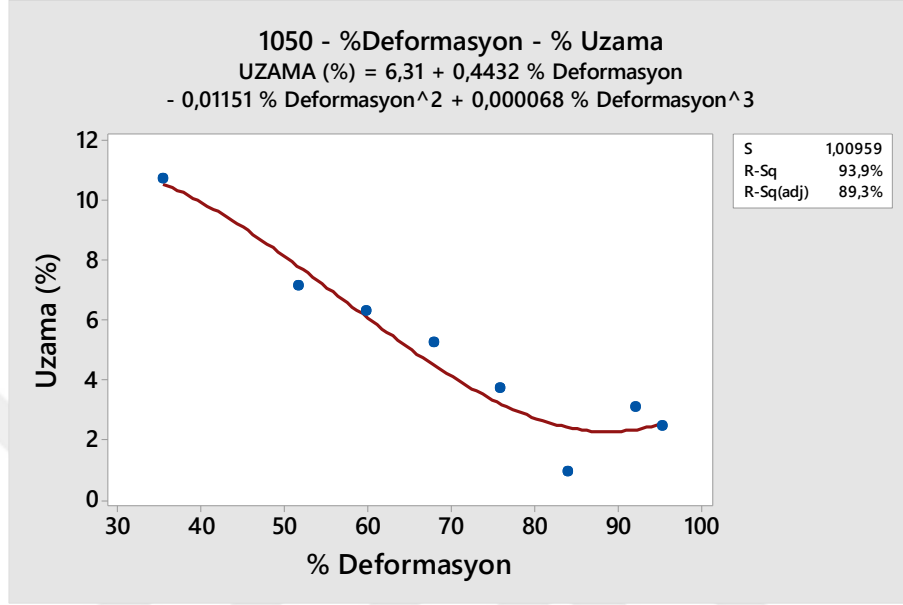
Uzama grafiğine dikkat edildiğinde çekme ve akma dayanımı ile tam tersi bir eğri elde edildiği görülmektedir. Tüm alaşım serilerinde % deformasyon değeri 85 ve üzerine çıktığında uzama davranışlarının birbirine yakın seviyelerde olduğu görülmektedir. Özellikle %95 deformasyon seviyesinde uzama davranışları benzerlik göstermekte ve %2 ve altında değerler olduğu görülmektedir. Deformasyon yüzdesi azaldıkça alaşım serileri arasındaki uzama farkı ortaya çıkmaktadır.



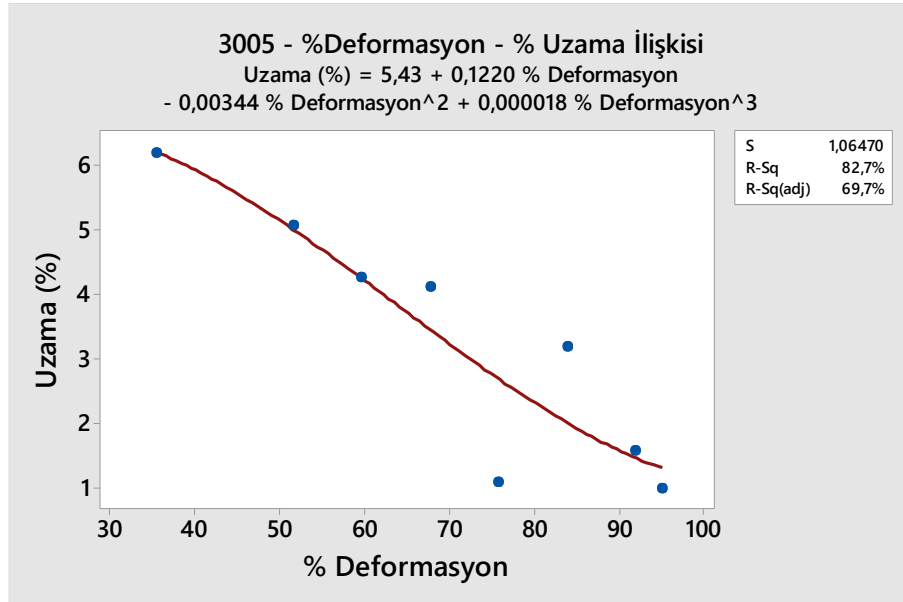
Şekil 4.21: Alaşım serilerinin deformasyon yüzdesine bağlı olarak uzama davranışının değişimi.

3005, 3105, 8006 alaşım serileri deformasyon yüzdesine bağlı olarak benzer davranış göstermesine karşın sıralama alaşım içerisindeki alüminyum yüzdesine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Alüminyum yüzde bileşimi en fazla olan 1050 alaşımın uzama performansı %35 deformasyon seviyelerinde %11 olduğu görülmüştür. Diğer alaşım serileri %5 – 7 aralığında sıralanmıştır. %65 deforme edilmiş numunelerin uzama davranışı %65 ve üzerindeki değerlere göre artış sağlandığı gözlemlenmektedir. Uzama değerleri malzeme mekanikini tek başına ifade etmesi mümkün değildir. Bu değerlerin aynı zamanda erichsen testi ve yüzey çatlak analizleri ile doğrulanması ve bu uzama oranlarında hangi bölgede çatlak başlangıcı ve ilerlemesi gerçekleşeceği incelenmelidir. Nihai kullanım alanlarında uzama, erichsen testi ve

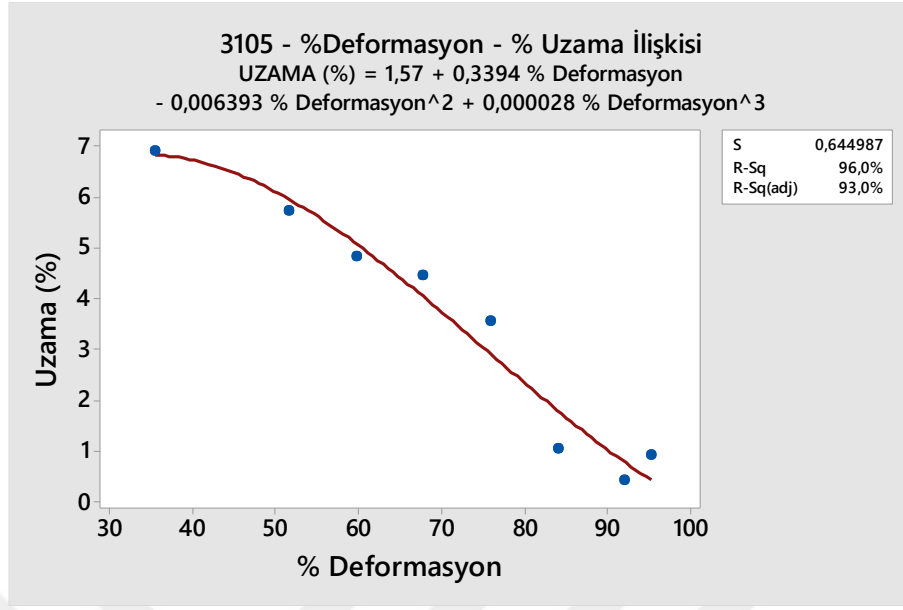
büküm testleri birlikte incelenerek imalat yöntemine uygun olup olmadığına karar verilmelidir. Şekil 4.22 – 25 aralığında yüzde deformasyon oranının yüzde uzama sonuçlarına etkisi regresyon modelleri ile tanımlanmıştır.



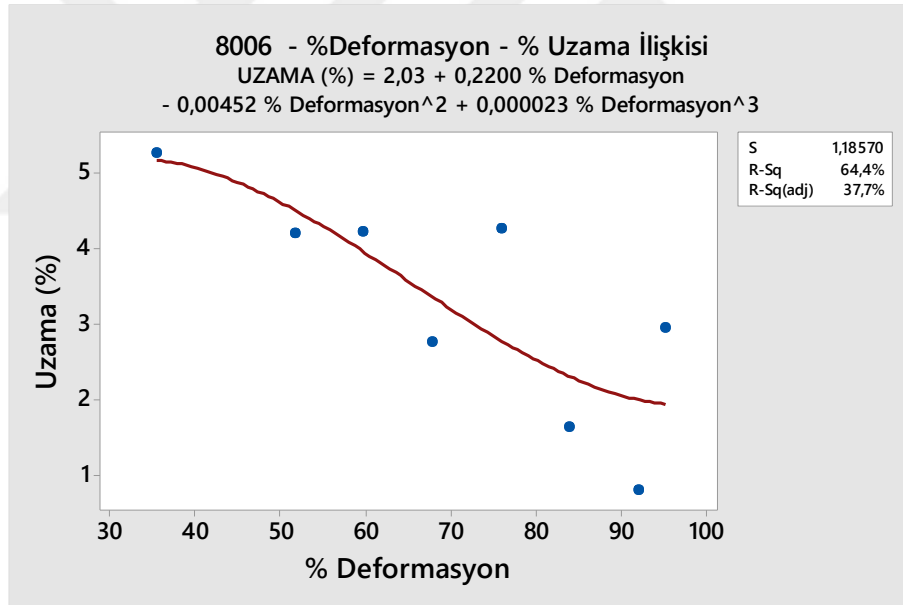
Şekil 4.22: 1050 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı yüzde uzama değişimi



Şekil 4.23: 3005 serili alüminyum alaşımın deformasyon oranına bağlı yüzde uzama değişimi



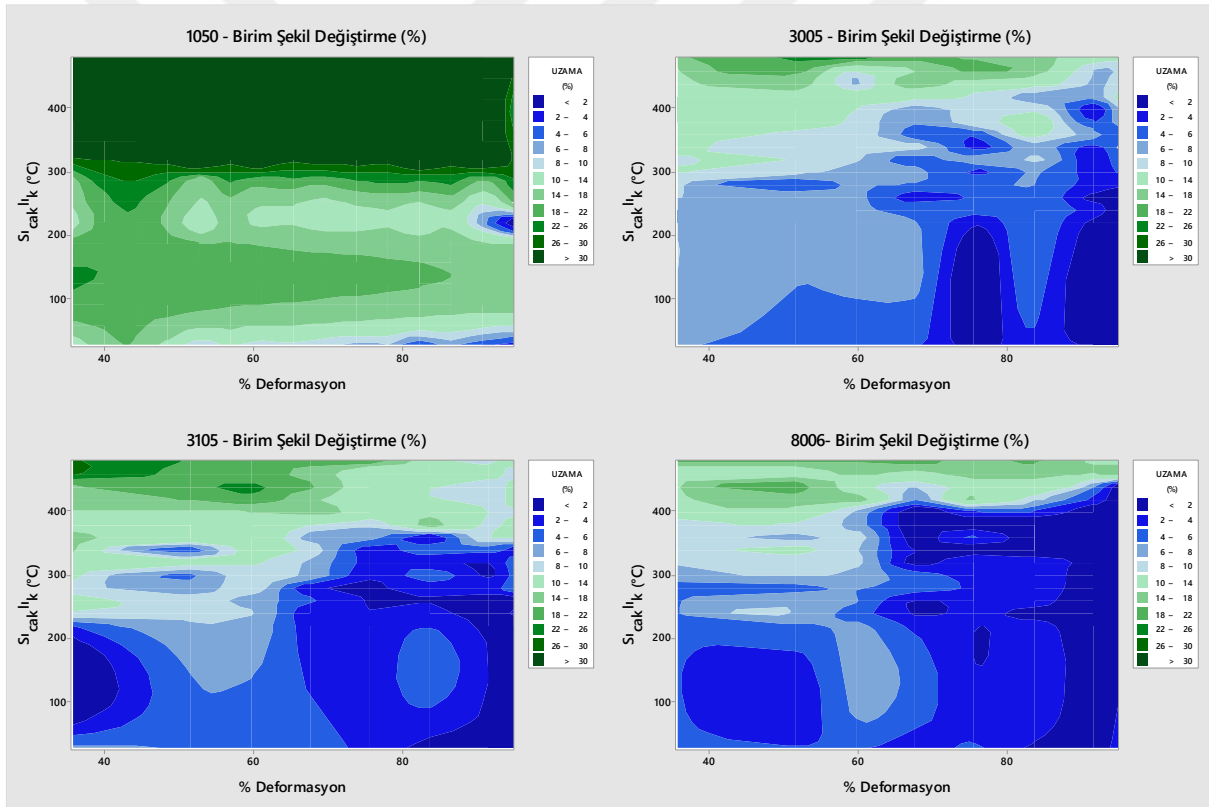
Şekil 4.24: 3105 serili alüminyum alaşımının deformasyon oranına bağlı yüzde uzama değişimi



Şekil 4.25: 8006 serili alüminyum alaşımının deformasyon oranına bağlı yüzde uzama değişimi

Deformasyon yüzdesine bağlı olarak uzama verilerinin regresyon eğrileri incelendiğinde çekme ve akma mukavemetine istinaden standart sapma değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Modellerde 1050, 3005 ve 3105 alaşımlarında anlamlı polinomial regresyon modelleri oluşturulabilirken 8006 serisi için durum farklıdır. Çekme ve akma mukavemetinde anlamlı modeller elde edilirken yüzde uzama değerinde modelin değişkenlik göstermesi Zwick Z050 marka çekme mukavemeti cihazında ekstansometrelerin mekanik çalışma prensibine

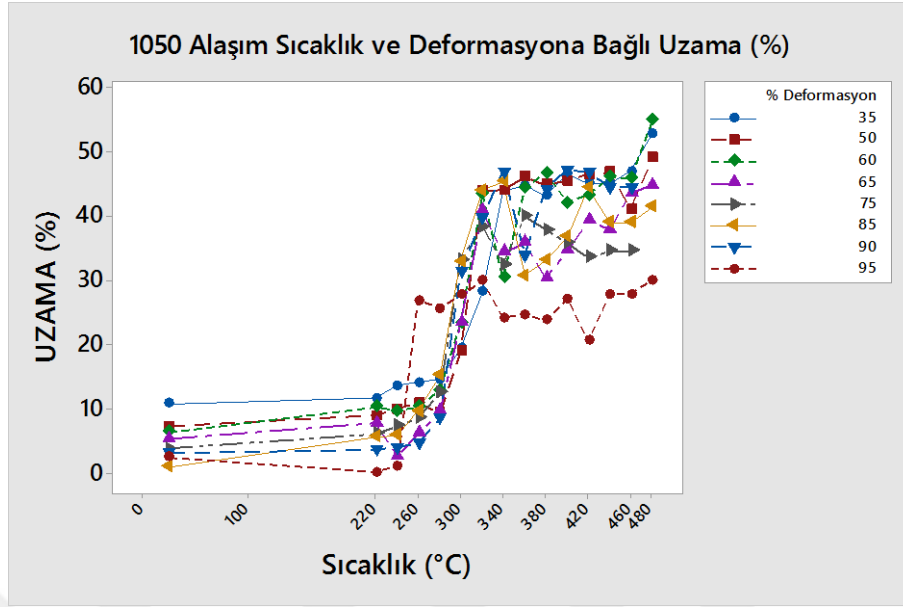
sahip olması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Yüksek deformasyon oranlarında önce daralma verisi mekanik olarak aktarılması sebebiyle herhangi bir çatlak ilerlemesi veya önce daralma hassasiyetinin anlaşılması mümkün olmamaktadır. Eğer yüzde uzama verilerinde anlamlı modeller elde edilmesi isteniyorsa görsel ekstansometre modülü olan çekme mukavemet cihazları tercih edilmelidir. Elde edilen model verilerinde 1050, 3005 ve 3105 alaşımları için model verileri asıl dataları temsil etmektedir. Düşük deformasyon oranlarında en düşük uzama kabiliyeti 8006 alaşımında görülmüştür. Yapı içerisindeki Fe, Mn, Si bileşimlerinin çözünürlüklerinin düşük olması uzama kabiliyetine olumsuz etki göstermektedir. Eğer şekillendirilebilirlik beklentisi varsa gerilim giderme işlemi uygulanmadan ürünler kullanılmamaktadır.



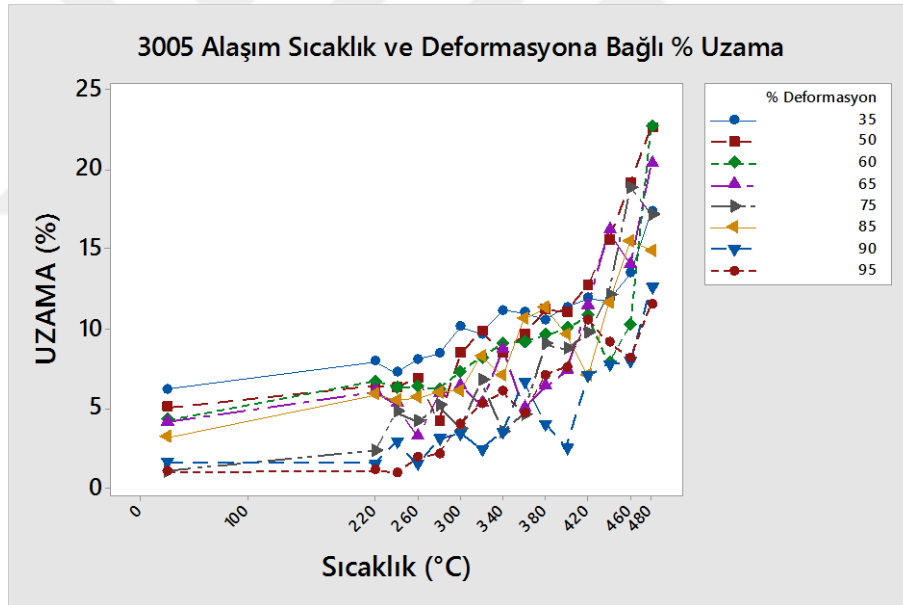
Şekil 4.26: Isıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak yüzde birim şekil değişimi (%)

Şekil 4.26’da verilen birim şekil değişimi grafikleri incelendiğinde yeniden kristallenme olan bölgelerde uzama davranışının yükseldiği bariz bir şekilde görülmektedir. 1050 serili alaşımda uzama davranışı deformasyondan çok az etkilenirken artan deformasyon oranlarında uzama davranışının düştüğü görülmektedir. Benzer şekilde 3005, 3105 ve 8006 alaşımlarda

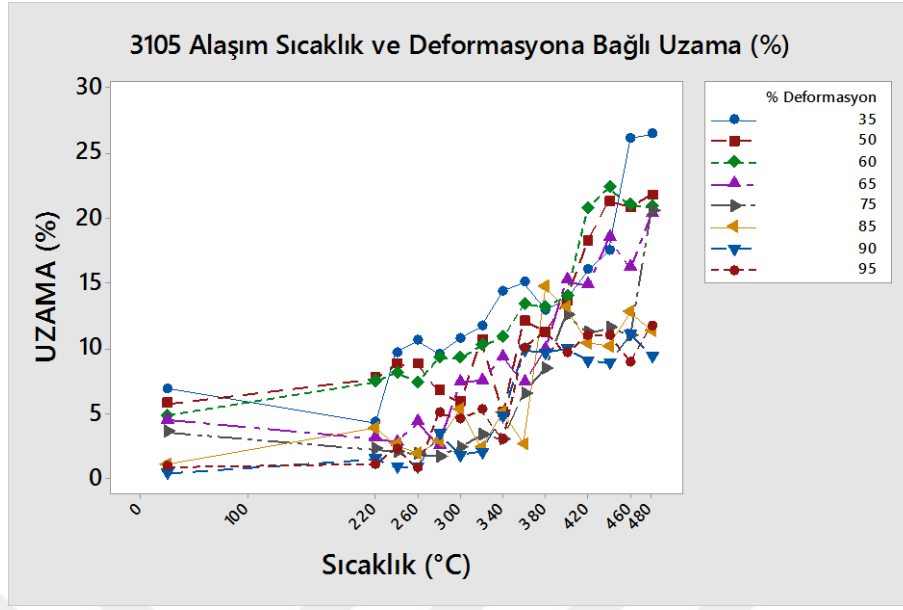
uzama davranışının düşüşü artan deformasyon oranlarında %70 ve üzeri deformasyon oranlarında hızla artmıştır. Uzama davranışını etkileyen en önemli unsurlardan bir diğeri kesit alanıdır. Kesit alanı azaldıkça ana metal kütlesi azalması sebebiyle malzemede akma davranışı sergilenemez ve kopma düşük % uzama değerlerinde gerçekleşir. 8006 serili alüminyum alaşımında diğ er alaşımlar ile benzer kesit alanına sahip olmasına karşın %60 deformasyon sonrasında uzama davranışının 3105 ve 3005 serili alüminyum alaşımlarına göre daha hızlı düşüş sergilediği görülmektedir. Bu durum yapı içerisinde ana kütleyle disperse halde bulunan Fe ve Si bileşenlerinin alüminyum ile çözünürlüğünün düşük olması kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Uzama davranışının en yüksek görüldüğü bölge ısı işlem sıcaklığı en yüksek ve en az deformasyona uğramış malzemelerde olduğu görülmektedir. Al-Mg bileşimine sahip alaşımlarda dislokasyon hareketi çözünme davranışı gösteren magnezyum bileşimi sebebiyle artan deformasyon oranlarında kademeli olarak akma mukavemeti düştüğü görülmektedir. 8006 alaşımında %3 ve üstü uzama bölgelerinde toparlanma sırasında incelenen tane boyutlarında sürekli yeniden kristallenme görülürken %3 altında ise süreksiz yeniden kristallenme davranışı görüldüğü Hatherly ve Humphreys tarafından görülmüştür [24]. Bu çalışmada da benze şekilde %4 uzama bölgesinde yeniden kristallenme davranışının süreklilik göstermesi artan ısı işlem sıcaklıklarında görülmektedir.



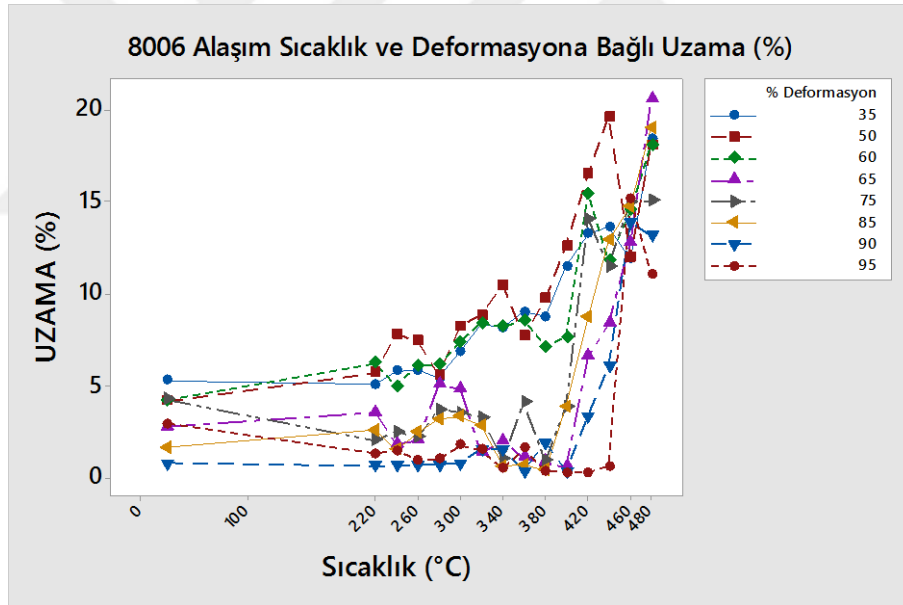
Şekil 4.1: 1050 seri alüminyum alaşımı uzama yüzdesinin ısı işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.



Şekil 4.27: 3005 seri alüminyum alaşımı uzama yüzdesinin ısı işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.



Şekil 4.28: 3105 seri alüminyum alaşımı uzama yüzdesinin ısı işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.



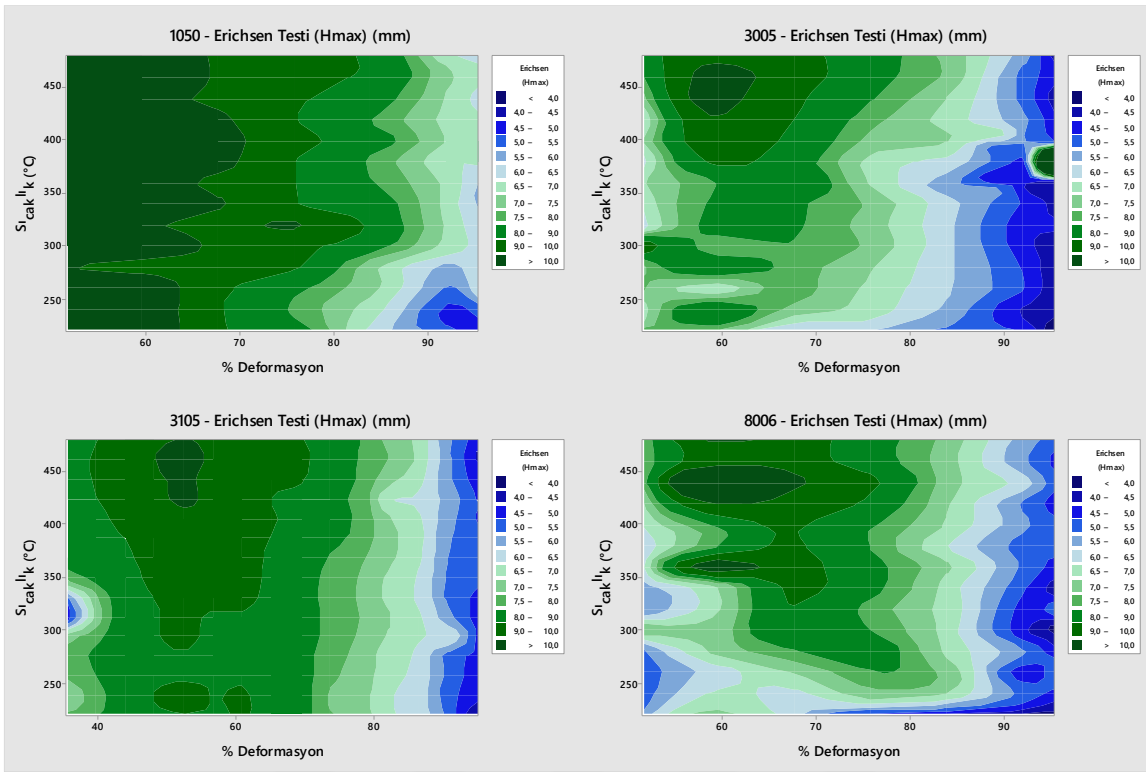
Şekil 4.29: 8006 seri alüminyum alaşımı uzama yüzdesinin ısı işlem sıcaklığına bağlı değişim grafiği.

Şekil 4.26-29 aralığında verilen grafiklerdeki alaşım serilerine ait uzama verilerine bakılacak olursa 1050 alaşım serisi için %95 deformasyon yüzdesine sahip numunelerin ısı işlem sıcaklığına göre yüzde uzama değişiminin diğerlerine göre %10 kadar düştüğü görülmektedir. Uzama farklı deformasyon yüzdeleri için benzer eğim ve davranış göstermiştir. 280 °C ısı işlem sıcaklığında 1050 alaşımının uzama davranışı yükseliş trendindedir. Bu sıcaklıktan sonraki

değerlerde yapı tamamen yeniden kristallenme eğilimi göstermektedir. 1050 dışındaki diğer alaşım serilerinde durum biraz farklıdır. 3105 ve 3005 alaşım serilerinde %75 deforme edilmiş ve yüksek ısı işlem sıcaklıklarına tutulmuş deney serilerinde %5 – 8 aralığında uzama düşüşü görülmektedir. Bu durum yeniden kristallenen tanelerin akma davranışını tamamlayabilmesi için kesit alanlarının yetersiz olduğunu göstermektedir. 8006 alaşımında bu fark daha net bir şekilde açığa çıkmaktadır. %65 deformasyon öncesi ve sonrası iki ayrı bölge olarak birlikte hareket etmektedir. Yapının maksimum sınır değerleri 480 °C sıcaklıkta %65 deformasyon ile elde edilen %20 uzama değeridir. Deformasyon oranı düşük olan deney serilerinin düşük sıcaklıklardaki uzama davranışı %10 ve üstü seviyelerdeyken %65 deformasyonun üzerindeki oranlarda 420°C'ye kadar uzama davranışında değişim gözlenmemiş ve bu seviyeden sonra yeniden kristallenmenin uzamaya olan etkisi hızla artmıştır. En yüksek sıcaklıkta uzama gösteren yapının burada %95 deforme edilmiş deney serisinin olduğu görülmektedir.

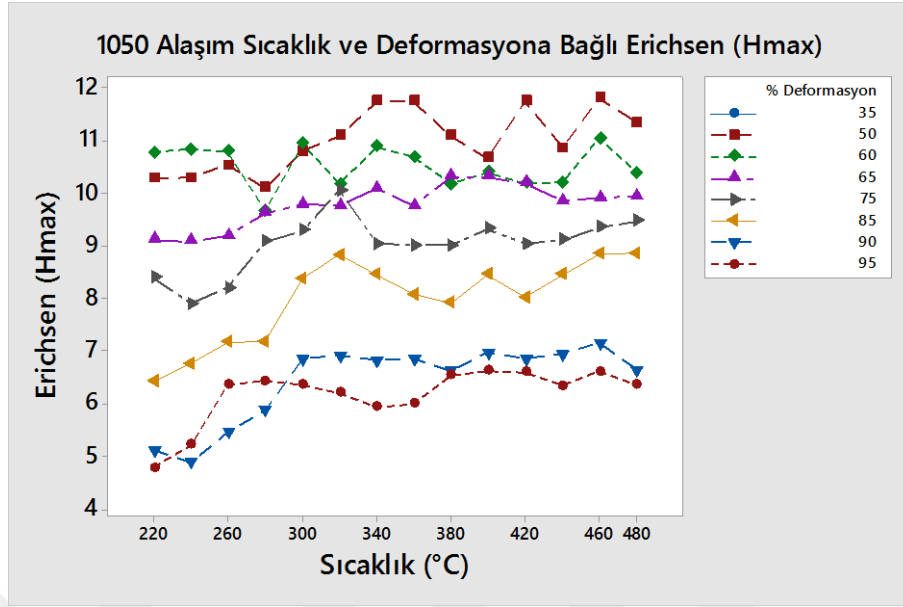
4.2 ERICHSEN DERİN ÇEKİLEBİLİRLİK TEST SONUÇLARI

Erichsen testleri toplu bir şekilde incelendiğinde deformasyon oranı arttıkça malzemelerin kesit alanları azalması sebebiyle erichsen testinin ulaştığı derinlik azalmaktadır. Kesit alanı %35 deformasyon sonrasında kesit alanı 4 mm olan numunelerde, deformasyon oranı %95 olan 0,3 mm kesit alanına sahip numunelerden daha yüksek erichsen derinliği elde edilmiştir. Bu durum erichsen testi sırasında zımbanın ilerlemesi için gerekli malzeme miktarı ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Aynı deformasyon oranına sahip numunelerde ise ısı işlem sıcaklığı en yüksek olanlarında erichsen derinliğinin arttığı görülmektedir. İyi bir derin çekme kabiliyeti istendiğinde grafiğin sol üst tarafına yakın bölgelerinde çalışılması gerekmektedir.

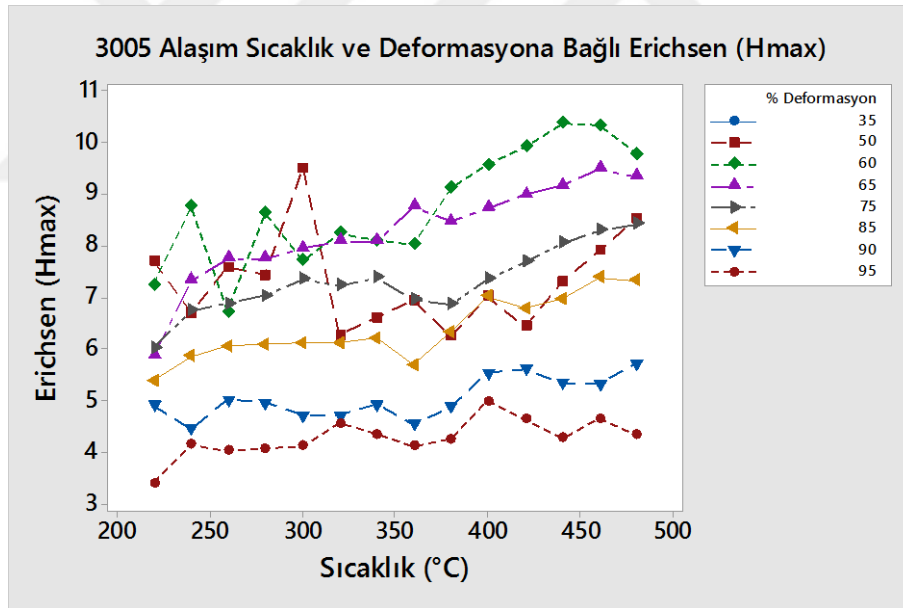


Şekil 4.30: Isıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak erichsen testi (Hmax)

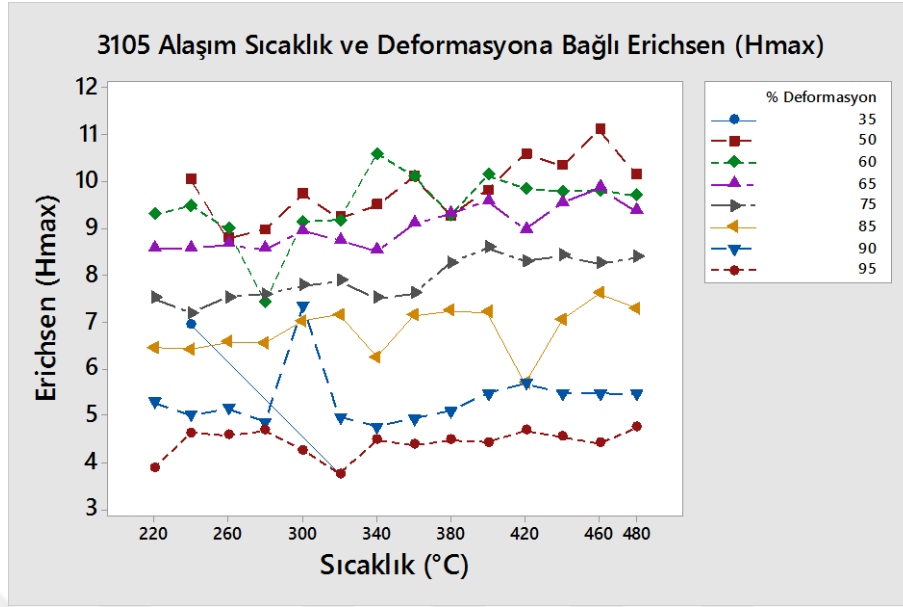
Şekil 4.30’da verilen ısıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı gerçekleştirilen erichsen testlerinde keskin geçişlerin olduğu bölgeler mavi tonundan yeşile dönüş bölgeleri olarak görülmektedir. Bu geçiş bölgeleri yeniden kristallenmenin başladığı bölgelerdir. 3105 alaşım serisinde 3005 alaşıma göre daha yüksek derin çekilme kabiliyeti gösterdiği grafiklerde görülmektedir. %60 deformasyon ve öncesinde düşük ısıl işlem sıcaklıklarında dahi 8 – 10 mm derinliklerde erichsen derinliği elde edilmiştir. Şekil 4.31-34 aralığında verilen grafiklerde erichsen testlerinin ısıl işlem sıcaklığı ve yüzde deformasyon miktarına göre değişimi daha detaylı olarak görülebilir.



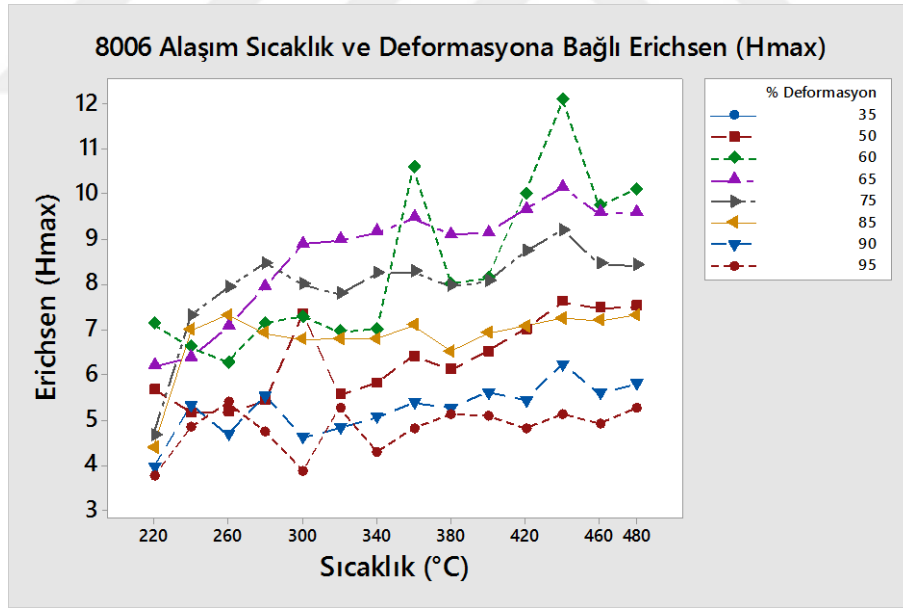
Şekil 4.31: 1050 seri alüminyum alaşımın yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı erichsen testi sonuçları



Şekil 4.32: 3005 seri alüminyum alaşımın yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı erichsen testi sonuçları



Şekil 4.33: 3105 seri alüminyum alaşımın yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı erichsen testi sonuçları



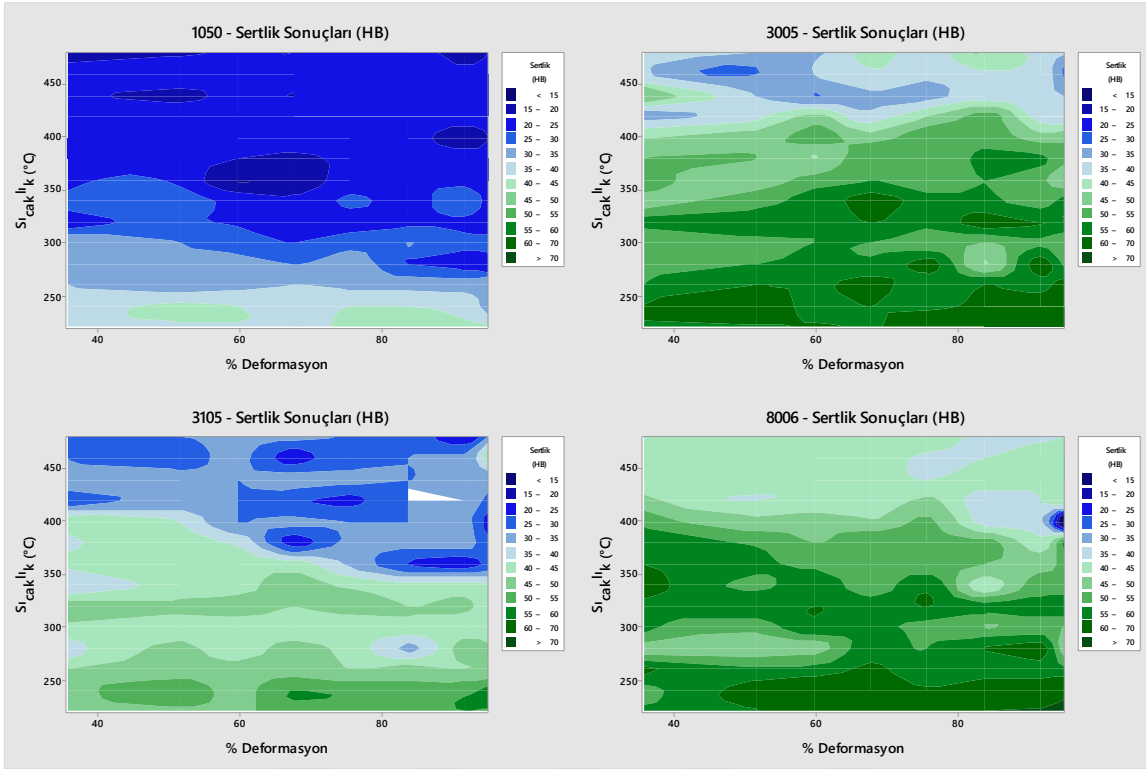
Şekil 4.34: 8006 seri alüminyum alaşımın yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı erichsen testi sonuçları

Alaşım serilerinin yüzde deformasyon ve ısı işlem sıcaklıklarına bağlı olarak erichsen şekillendirilebilirlik testinde zımba derinlikleri incelenmiştir. Hmax maksimum derinlik mesafesi incelendiğinde deformasyon oranının erichsen testi davranışına doğrudan etkisinin olduğu görülmektedir. X ekseninde ısı işlem sıcaklığı değişimine bağlı aynı deformasyon miktarlarında değişimler incelendiğinde 1050 alaşım için yeniden kristallenme sıcaklığı sonrasında minör değişiklikler gözlemlenmiştir. Yaklaşık olarak yeniden kristallenme sonrasında 1050 alaşım serisinde 2 mm derinlik artışı gözlemlenmiştir. Isıl işlemde en fazla etkilenen deformasyon yüzdesi ise %85 deformasyondur.

Alaşım serileri genel olarak incelendiğinde ısı işleme karşı verilen erichsen test derinliğindeki artış en fazla 8006 ve 3005 alaşım serilerinde gözlemlenmektedir. 8006 ve 1050 alaşımları yüksek deformasyon oranlarındaki erichsen testi 3105 ve 3005 serilerine göre 1-2 mm daha yüksek derinliklere sahip olduğu görülmektedir. Yeniden kristallenme davranışı göstermiş olan alaşımların en yüksek derin çekilebilirlik değerleri %60 deformasyon oranında elde edilmiştir. 8006 alaşım serisinde %85 deformasyon oranında ısı işlem sıcaklığının derin çekme kabiliyetine etkisinin 0,25 mm gibi düşük bir oranda olduğu görülmektedir. Slamova'nın çalışmasına göre [29], 430 °C ve üzeri sıcaklıklarda yapıda tamamen tane büyümesi mekanizması gerçekleştiği dile getirilmektedir. Şekil 4.34'de belirtilen 8006 alaşımın şekillendirilebilirlik ve diğer çekme mukavemeti gibi mekanik test deney sonuçları incelendiğinde bu bölgede derin çekilebilirlikte artış gözlemlenmiştir. %33 deformasyon oranında yapılan bu çalışma ile elde edilen veriler birbirlerini doğrular niteliktedir.

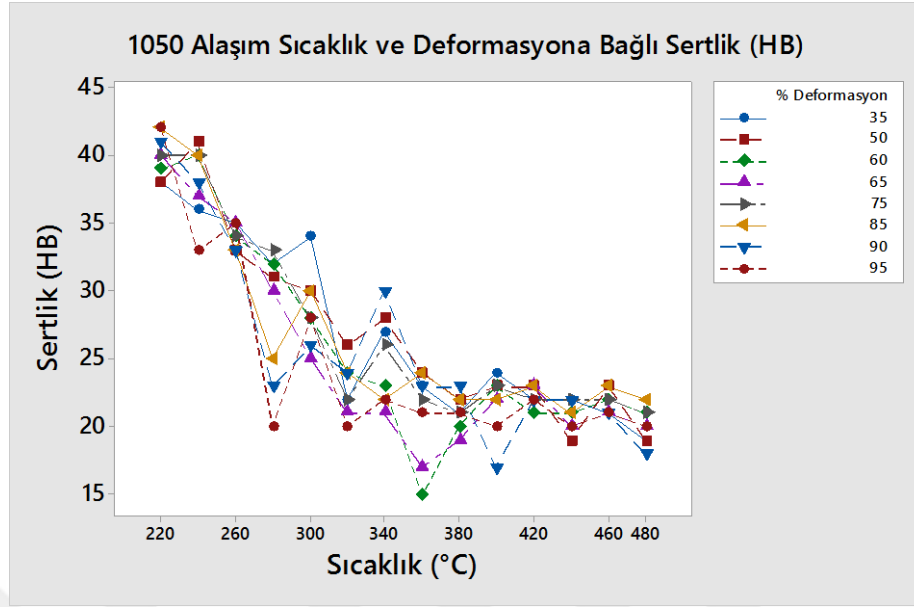
4.3 SERTLİK (HB) TEST SONUÇLARI

Sertlik sonuçları incelendiğinde çekme mukavemeti sonuçları ile değerlerin paralellik gösterdiği görülmektedir. Sıcaklık - % Deformasyon grafikleri incelendiğinde en yüksek sertlik değerlerinin alaşım oranı en yüksek olan alaşım serilerinde olduğu görülmektedir. 1050 alaşım serisinin 220 °C sıcaklıkta dahi yeniden kristallenme ile sertlik değerleri 45- 50 HB değerlerinden 30 - 35 HB değerlerine düştüğü görülmektedir. Quiao ve arkadaşları [30], yaptıkları çalışmada 1050 alaşıma sahip biyetlerde 200 °C ile 375 °C aralığında malzemelerin sertlik değişimlerini incelemişlerdir. Biyetlerin sertlik değerleri 200'den 300°C sıcaklıklara kadar değişim göstermezken 300 °C sıcaklığında ciddi düşüş göstererek 35 HB değerlerine düştüğü görülmüştür.



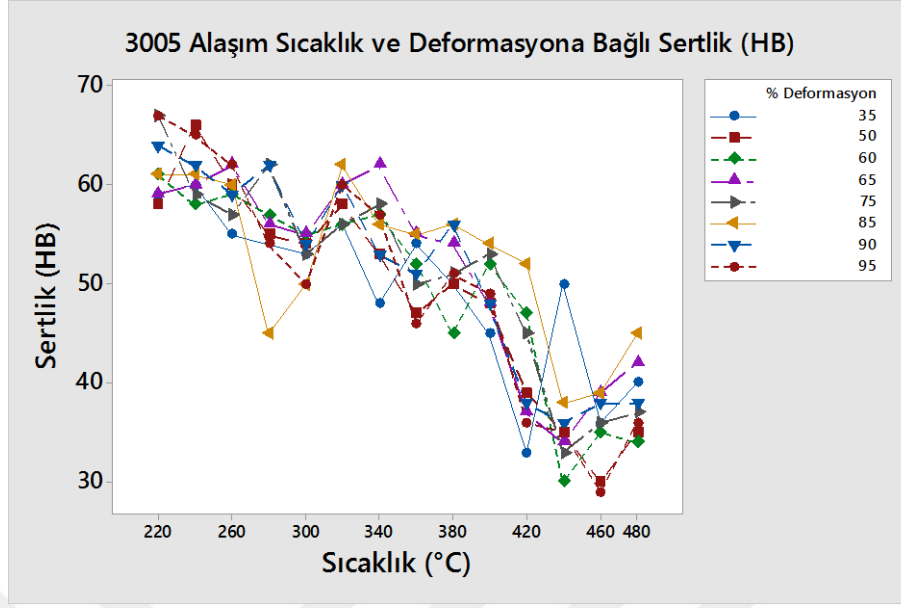
Şekil 4.35: Isıl işlem sıcaklığı ve deformasyon yüzdesine bağlı olarak sertlik ölçüm sonuçları (HB)

Yapılan çalışmada benzer sıcaklıklarda ikiz merdaneli döküm ile hızlı katılaştırılarak üretilen 1050 alaşım levha ürünlerde bu değerlerin %75 deformasyon miktarına kadar benzer değerleri gösterdiği görülmüştür. %75 deformasyon oranı üzerindeki değerlerde bu değerlerin 20 – 25 HB değerlerine düştüğü gözlemlenmiştir. Quiao [31], tamamen yeniden kristallenmiş yapının 20-25 HB aralığında ve 350 °C sıcaklıkta olduğunu tespit etmiştir. Benzer durum Şekil 4.1.35’de elde edilen verilerde de görülmektedir.



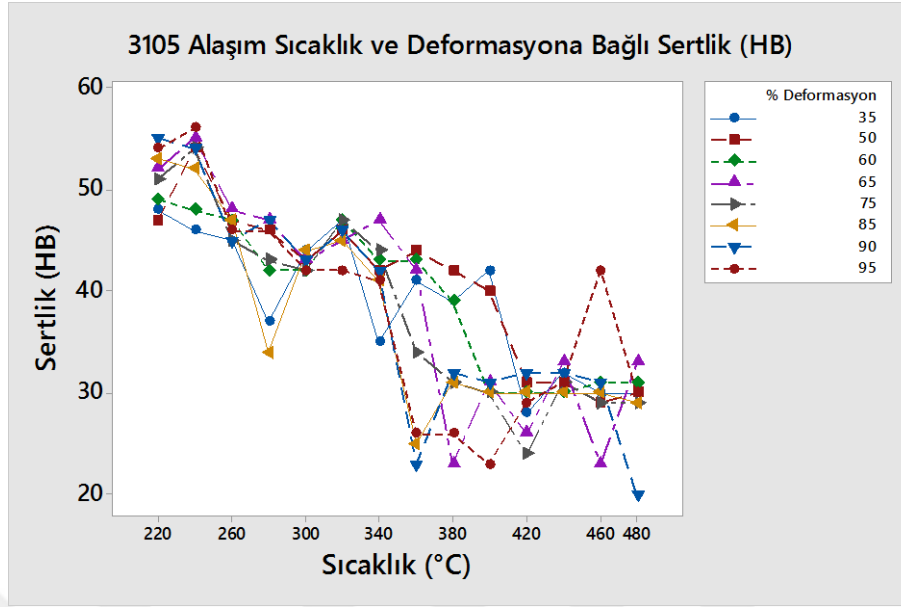
Şekil 4.36: 1050 seri alüminyum alaşımın yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı sertlik (HB) testi sonuçları

Şekil 4.36’da verilen 1050 alaşımın sertlik sonuçları incelendiğinde 350 °C sıcaklık üzerinde sertlik değerleri sıcaklık ile değişkenlik göstermediği görülmüştür. Ancak elde edilen sertlik değerleri %60 ve 65 deformasyon oranları üzerinde belirtilen sertlik değerlerinin 10 HB kadar altına indiği görülmüştür. Bu durum yapı içerisindeki dislokasyon yoğunluğundan kaynaklanmaktadır.



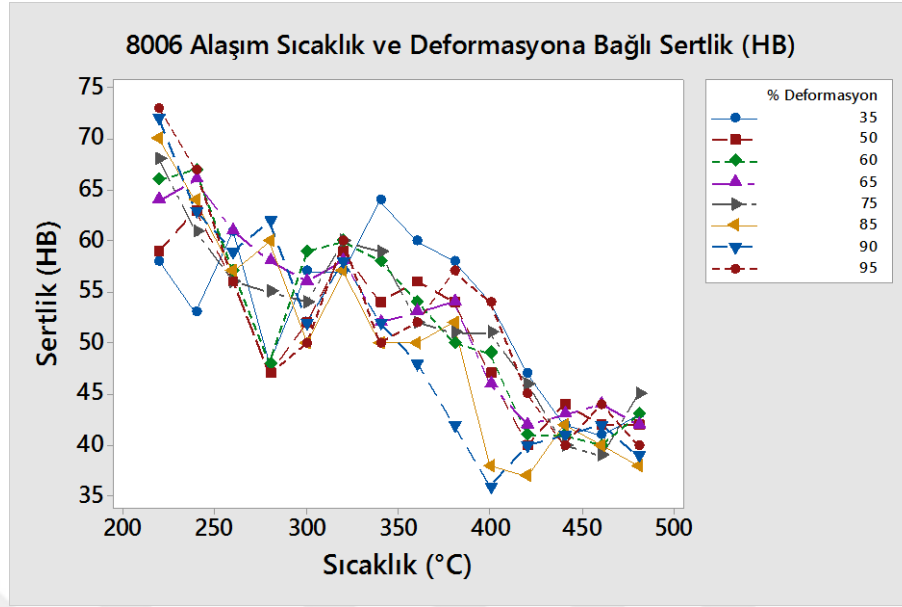
Şekil 4.37: 3005 seri alüminyum alaşımın yüzde deformasyon oranına ve ısıl işlem sıcaklığına bağlı sertlik (HB) testi sonuçları

Şekil 4.37’ de verilen sertlik değişim grafiğinde 3005 alaşımlı alüminyum levhaların farklı ısıl işlem ve deformasyon oranlarına göre yapılan incelemelerde 300°C’de ve 420°C’de iki farklı davranışın olduğu görülmektedir. Veriler çekme testi sonuçları ile benzerlik göstermektedir. 300°C sıcaklıkta toparlanma davranışı gerçekleştiği görülmektedir. %85 deforme edilen malzemenin 280°C sıcaklıklarda ani bir sertlik düşüşü gözlemlenmektedir bu sıcaklıktan sonraki uygulamalarda tüm serilerde artış ve daha sonrasında lineer bir düşüş gözlemlenmiştir. Toparlanma davranışının bu noktada yerini sürekli yeniden kristallenmeye bıraktığı söylenebilir. Pokova [32], yaptıkları çalışmada mikro sertlik ölçümlerinde 300°C ve 450°C’de bu farklılıklar gözlemlenmiştir. Daha dar aralıklarda yapılan ısıl işlem değerlerinin incelenmesi ile yeniden kristallenme sıcaklığının 420°C’de olduğu görülebilir. 400 ve 450 °C sıcaklıklarda ısıl işlem gören malzemelerin EBSD incelemeleri yapılmıştır. Quiao’ da benzer olarak [31], ECAP prosesi sonrasında incelemelerini gerçekleştirmiş ve ikiz merdaneli döküm ile yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ancak Pokova’nın çalışmasında yapılan incelemelerde yeniden kristallenme sıcaklığı 30°C yukarıda verilmiştir. Bu durumda yapılan çalışmadaki zirkonyum tanelerinin etkisi düşünülebilir ve yeniden kristallenme sıcaklığının yükselmesinde etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 4.38: 3105 seri alüminyum alaşımın yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı sertlik (HB) testi sonuçları

Şekil 4.38’de verilen 3105 alaşımlı alüminyum levhaların sertlik değişimleri incelendiğinde, 280 °C sıcaklıkta malzemelerin toparlanma davranışı gösterdiği görülmektedir. Yeniden kristallenme davranışı ise %60 deformasyon ve daha yüksek deformasyon oranları için 380°C’de değişim gerçekleştirdiği gözlemlenmektedir. Bu deformasyon oranının altında malzemelerin yeniden kristallenme davranışları 20°C kadar ötelenmiştir. Çekme ve akma mukavemetlerine benzer olarak sertlik değişimleri de diğer mekanik özelliklerle benzer davranışı sergilediği görülmektedir. Daha öncesinde de belirtilen Liu’nun çalışmasında [28] belirtilen sıcaklık değerleri ile malzemenin davranışı paralellik göstermektedir. Yeniden kristallenme süresi arttırıldığında sertlik ve mekanik özelliklerin değişmediği ancak tanelerin daha iri olduğu Liu’nun çalışmasında belirtilmiştir. Yeniden kristallenme sonrasında yüksek deformasyon oranına sahip olan deney serilerinin daha düşük sertlik değerlerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca düşük sıcaklıklarda yapılan ısı işlem operasyonlarında daha lineer bir düşüş gözlemlenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda malzemelerin yönelme davranış Liu’nun çalışmasında [28], yüksek deformasyon oranlarında yönelme davranışının arttığı, düşük sıcaklıkta ve düşük deformasyon oranlarında ise daha homojen yönelmiş ve eş eksenli kristallerin oluştuğu belirtilmiştir. Bu durum sertlik davranışında farklılık oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Ancak eş eksenli olmayan derin çekme uygulamalarında operasyonel olarak uygulanan bu parametreler malzeme davranışını değiştirecektir.



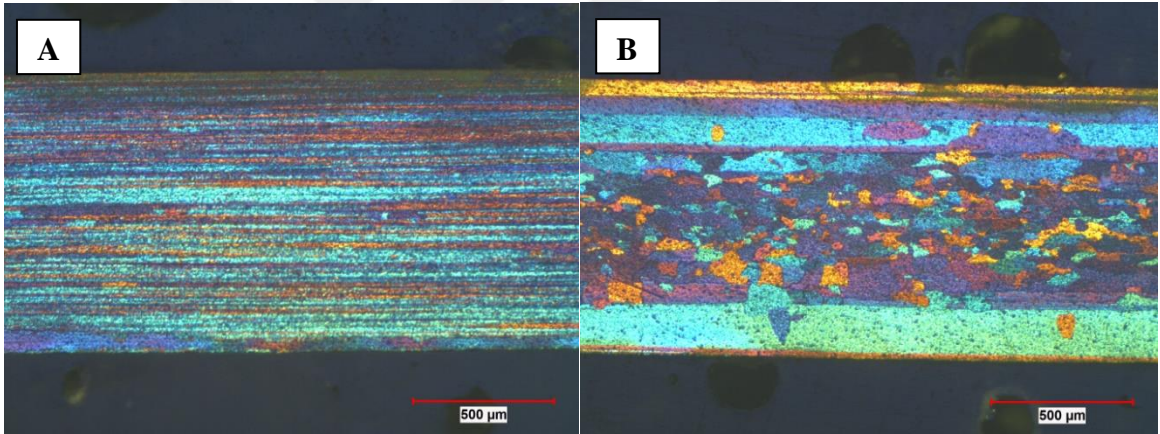
Şekil 4.39: 8006 seri alüminyum alaşımın yüzde deformasyon oranına ve ısıl işlem sıcaklığına bağlı sertlik (HB) testi sonuçları

8006 alaşımın farklı ısıl işlem ve deformasyon oranlarına bağlı olarak sertlik değişimleri Şekil 4.39'da verilmiştir. Veriler incelendiğinde, verilerin maksimum 73 HB değerinden başladığı ve bunun %95 deformasyon oranlarında gerçekleştiği görülmektedir. En düşük sertlik değerleri ise 40-45 HB değerlerinde tamamen yeniden kristallenerek gerçekleştiği gözlemlenmiştir. 280°C sıcaklıkta malzemenin toparlanma davranışı gösterdiği ve bu davranış ile yaklaşık 50-60 HB değerlerine düştüğü gözlemlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda sertlik değerlerindeki düşüşler devam etmiş ve 420°C sıcaklıktaki yapılan ısıl işlemler sonrasında malzemenin yeniden kristallenme davranışı göstermesiyle değerler 40-45 HB değerlerine düşmüştür. Malzemenin öncesinde homojenizasyon görmesi sonrasında tekrar ısıl işlem sıcaklığı ne olursa olsun yeniden kristallenmiş ve tane büyümesi gerçekleşmiş yapıların sertlik ve diğer mekanik değerlerinde değişim gözlenmemiştir [33]. Yapının yeniden kristallenme sıcaklıkları Cieslar ve Pokova'nın yaptığı sertlik incelemesinde de [31] benzer değerlerde olduğu görülmüştür. Mikro sertlik ölçümleri sonrasında yapılan TEM analizlerinde yapı içerisinde disperse olmuş Fe-Si intermetalik partikülleri görülmektedir. İkiz merdaneli döküm ile üretilen bu ürünlerde mikro sertlik değerleri deformasyon oranına bağlı olarak 70 HB değerlerinde incelenmiştir. Yeniden kristallenmenin tamamlandığı sıcaklık 280 C olarak

görülse de bu sıcaklıkta toparlanma kademesi olduğu yapılan deney sonuçlarında Şekil 4.1.39'da göze çarpmaktadır.

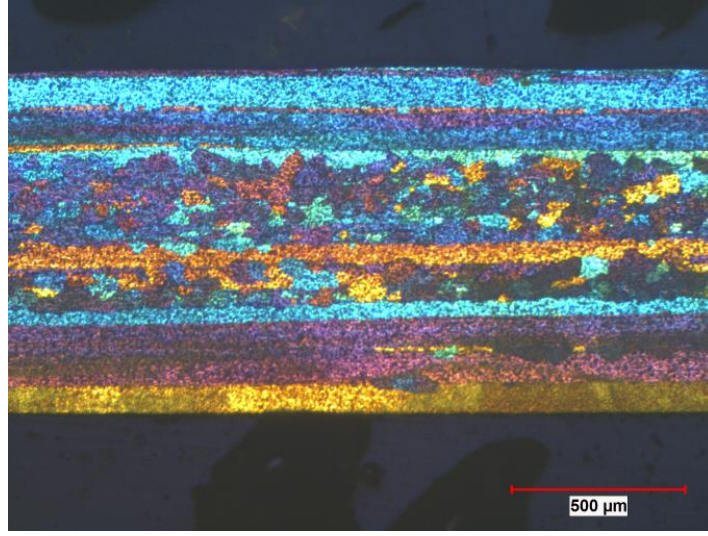
4.4 MİKROYAPI ANALİZLERİ

Deney serilerinin tamamlanması sonrasında malzeme davranışlarının incelenmesi için önemli görülen serilerde mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen mikro yapı analizleri ile ısıtma sıcaklıklarına bağlı olarak gerçekleşen toparlanma, yeniden kristallenme ve tane büyümesi mekanizmaları doğrulanmıştır. Mikro yapı değişimleri ile oluşan tane boyutları modele dahil edilmemiştir. %95 deformasyon oranı sonrasında düşük ısıtma sıcaklıklarına sahip olan deney serilerinde dağlama sonrasında selektif çözünme kabiliyeti düşmesi sebebiyle görüntüler alınmamıştır. Görüntüler yeniden kristallenme bölgelerini temsil etmekte ve %65 deformasyon oranında sabit olarak incelenmiştir.



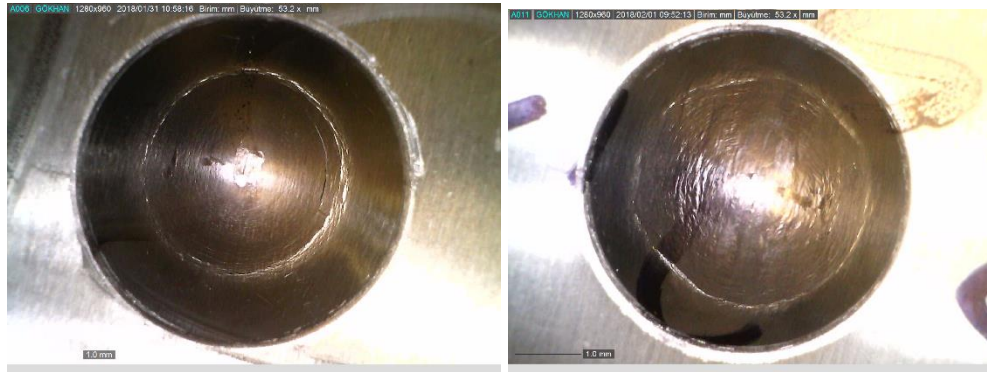
Şekil 4.40: %65 deformasyona tabi tutulmuş 3005 serisi alüminyum alaşımının (a) 300 °C ve (b) 440 °C sıcaklıklardaki mikro yapı görüntüleri

Şekil 4.40'da 3005 serisinde incelenen mikro yapıya istinaden artan sıcaklık ile yeniden kristallenmenin başlamış ve hızlı soğuma bölgeleri olan dış katmanlarda yeniden kristallenme yerini tane büyümesine bırakmıştır. Orta bölgelerde görülen tanelerin büyümeye dahil olmaması kinetik faktörün 440 °C sıcaklık için 4 saatlik sürede tamamlanmaya yetmediğini göstermektedir. Ölçümlenen sertlik değerleri bu sıcaklıklarda tamamen tane büyümesi gerçekleşmiş yapıyı temsil etmektedir ancak malzeme iç bölgelerinde yapının halen korunduğu gözlemlenebilir.



Şekil 4.41: %65 deformasyona tabi tutulmuş 3005 serisi alüminyum alaşımının 480 °C sıcaklıkta ısıtılma sonrası mikro yapı görüntüsü

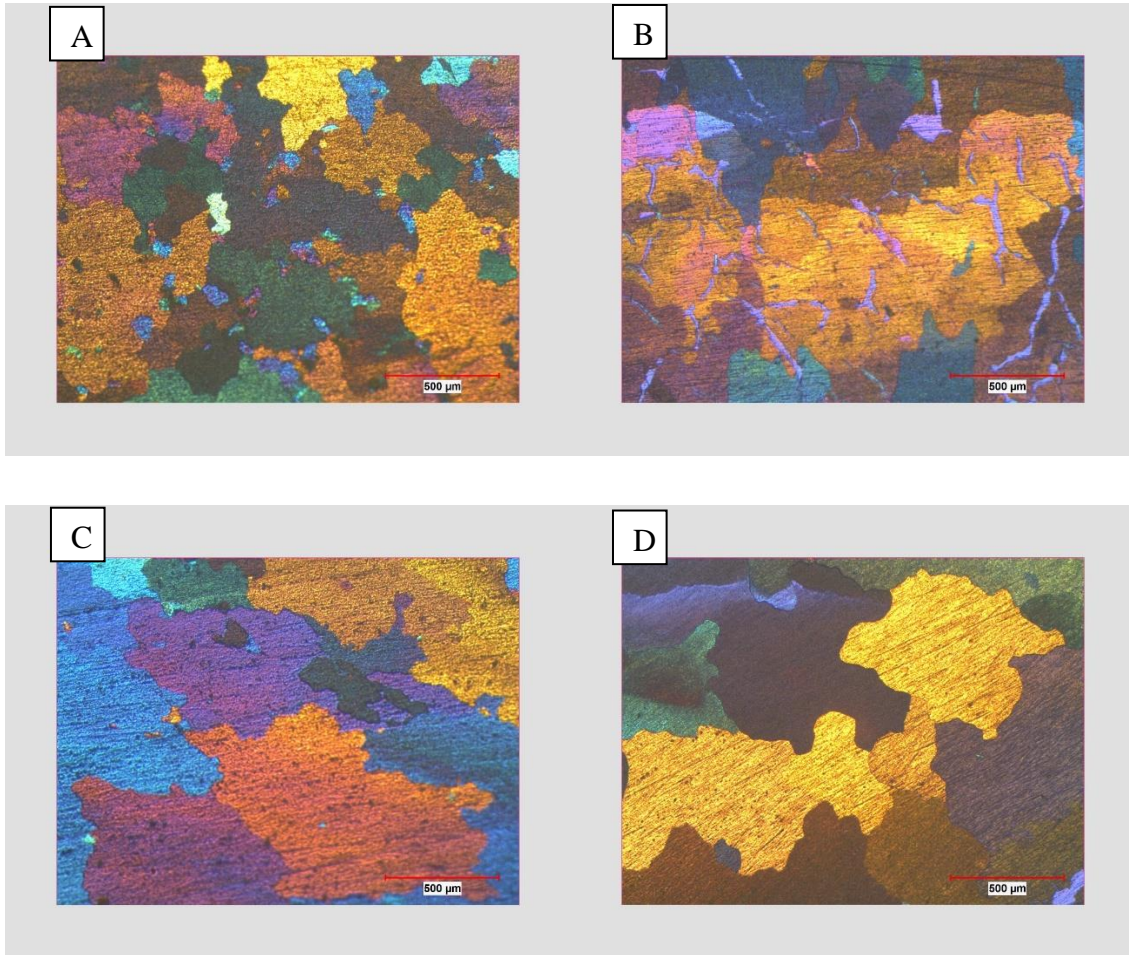
Şekil 4.4.2’de görülen yüzey kısımlarındaki toparlanma artan sıcaklıklar ile birlikte 480 °C’de yerini tanelerin toparlanmaya bıraktığı gözlemlenebilir. Bu sıcaklıkta yüzey kısımlarda artık tamamen büyümüş taneler gözlemlenmektedir. Tane büyümesi sonrasında tamamen yeniden kristallen yapılar malzemenin şekil alma kabiliyetini arttırsa da büküm sonrası yüzey özellikleri kötüleşmektedir [32].



Şekil 4.42: %65 deformasyon uygulanmış ve (a) 300°C ve (b) 440 °C ısıtılma görmüş 3005 alüminyum levhanın erichsen derin çekilebilirlik test numunelerindeki yüzey görselleri

3005 alaşıma ait %65 deformasyon oranındaki numunenin 300 ve 400°C sıcaklıklarındaki ısıtılma sonrası derin çekilebilirlik özelliklerine göre yapılan incelemede malzeme yüzeyinde portakallanma (orange peeling effect) olarak belirtilen yüzey kusurunun olduğu

gözlemlenmektedir. Bu durum 3XXX serisi alüminyum alaşımlarında yüksek sıklıkla görülmektedir. Yapı içerisinde homojen olarak çözünmeyen mangan tane sınırlarına hareket etmesi sonrasında malzeme eğer çekme kuvvetlerine maruz kalırsa yüzey bölgelerindeki büyümüş tanelerin görsel olarak portakal deseni yarattığı görülmektedir. Yönlenmiş taneler deformasyonun etkisi ile kayma düzlemlerince hareket etmekte ve bu hareket sonrasında yüzeyde hem ışık kırınımını etkilemekte hem de kırılma mekanizmasını değiştirmektedir. Bu durum malzemelerde yüzey kusuru olarak hatanın oluşmasına sebebiyet vermektedir. Gelecek çalışmalarda bu kusurun hangi procesten sonra gerçekleşeceği bir kısıt olarak tanımlanacak ve incelenen termo-mekanik proceste yüzey hatası olarak yer verilecektir.



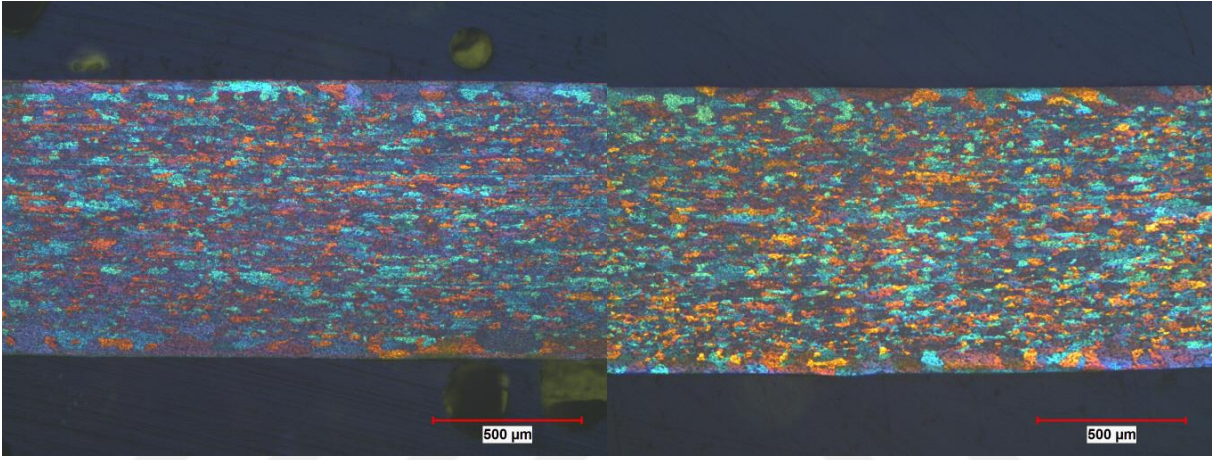
Şekil 4.43: %35 deformasyona sahip 1050 alaşımların (a) 220°C, (b) 240°C, (c) 350°C, (d) 420°C sıcaklıklarda ısıl işlemleri sonrasında elde edilen mikroyapı görüntüleri

Tane büyüme mekanizmasının açıklanması açısından 1050 alaşımda elde edilen mikro yapı görselleri bize büyüme sırasında oluşan katı hal difüzyonunu ve tane boyutları hakkında fikir

vermektedir. Özellikle 220°C ve 240°C sıcaklıklarda elde edilen mikro yapılarda tane aralarında intergranüler çatlak bölgeleri gözlemlenmiştir. Daha yüksek ısıl işlem sıcaklıklarında ise tane boyutları başlangıç boyutlarına göre yüksektir. 1050 alaşımında elde edilen veriler yapının homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Bu nedenle homojen ve küremsi tanelerin yüksek sıcaklıklardaki bu davranışı birim şekil değiştirme kabiliyetini arttırmaktadır.

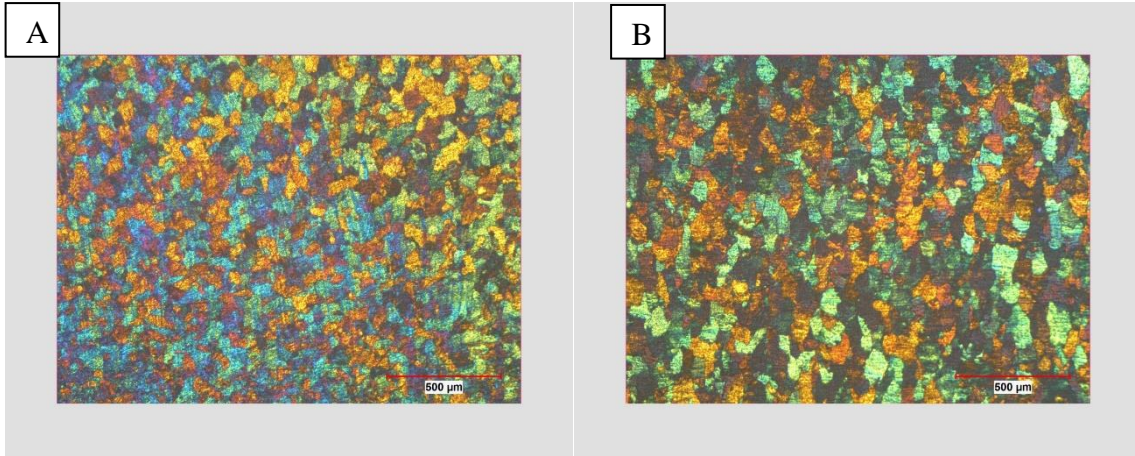
A

B



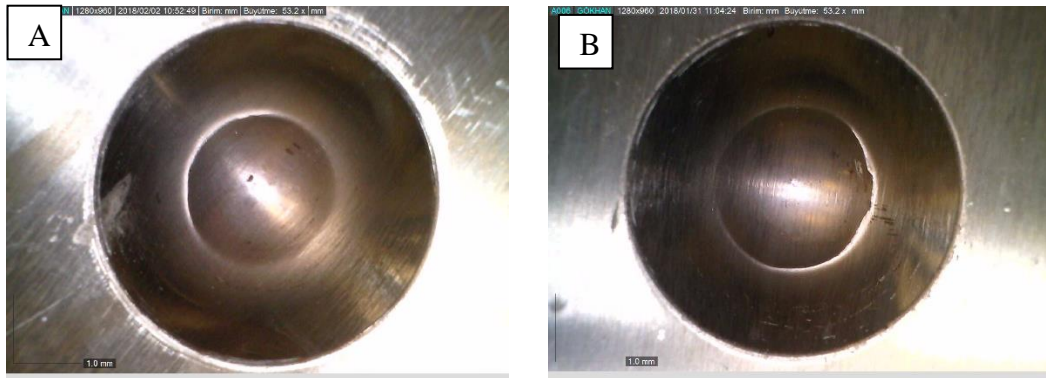
Şekil 4.44: 3105 alaşımlı serinin %85 deformasyon oranındaki 260°C ve 300°C sıcaklıklardaki mikroyapı görüntüleri

Şekil 4.44' de verilen 3105 alaşımlı serinin %85 deformasyon oranındaki 260°C ve 300°C sıcaklıklardaki mikroyapıları incelendiğinde yapısal olarak değişimin çok az olduğu ve tane boyutlarının yüksek oranla değişmediği gözlemlenmiştir. İki görsel elde edilirken benzer metalografi işlemleri uygulanmış ve dağlama işlemi sırasında elektrolitik dağlama gerçekleştirilmiştir. Akım değerleri sabit tutulmuş olmasına rağmen (B) görselinde elde edilen görüntüde yansıma değerleri daha iyi gözükmektedir. Benzer akım değerlerinde çalışma yapılmasına ve metalografi işleminin sabit tutulmasına rağmen bu görüntü farklılığı yapının toparlanma sırasında iç gerilimlerinin azalması sebebiyledir. Görüntüler hadde yönüne paralel olarak incelenmiştir.



Şekil 4.45: 8006 alaşımlı serinin %65 deformasyon oranındaki (a) 360°C ve (b) 400°C sıcaklıklardaki mikroyapı görüntüleri

8006 alaşım serisinin %65 deformasyon oranındaki yeniden kristallenme öncesi ve sonrası 20°C farklılık bölgelerinde 360 ve 400°C sıcaklıklarda alınmış mikro yapı görselleri incelendiğinde yeniden kristallenmenin ve tane büyümesi mekanizmasının homojen olarak değiştiği Şekil 4.45'de gözlemlenmektedir. Bu durum 8006 alaşım serilerinde derin çekilebilirlik özelliklerinde uzama değerlerinin yükselmesinin nedeni olarak açıklanabilir. Yapı içerisinde disperse olmuş Si ve Fe bileşimlerinin çözünürlükleri düşük olması sebebiyle yapıda çekirdeklenmeye katkı sağlamakta ve yapının tane boyutları küçük ve homojen olmasını sağlamaktadır.

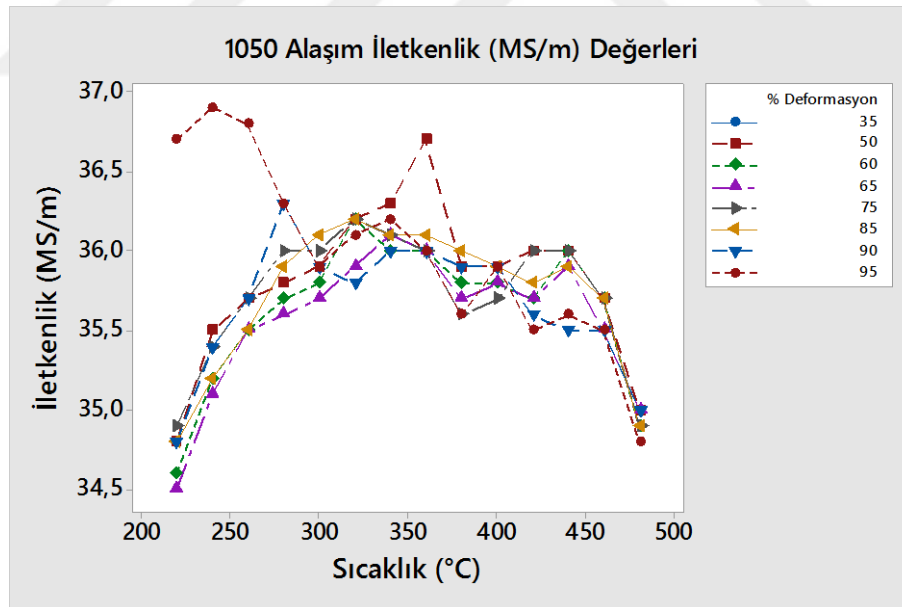


Şekil 4.46: 8006 alaşımlı serinin %65 deformasyon oranındaki (a) 360°C ve (b) 400°C sıcaklıklardaki erichsen test numunesi görüntüleri

8006 alaşım serisine ait benzer sıcaklıklardaki tane büyümesi öncesi ve sonrası test numunesi yüzeyleri incelendiğinde 3XXX serisindeki göre portakallanma yüzey etkisinin oluşmadığı görülmektedir. Tane yapısı incelendiğinde 3xxx serisinde yüzey bölgelerde tane büyümesi mekanizması gözlemlenirken 8006 serisinde benzer durumun olmadığı ve tane büyümesinin homojen gerçekleştiği görülmektedir. Şekillendirme operasyonlarında yüzey beklentisi beklendiği durumlarda 8006 serisini avantajlı kılmaktadır. 1050 serisinde sünek kopma davranışının daha baskın olduğu görülürken 8006 serisinde kopma noktalarında uzamış ve liflenmiş yapılar görülmemektedir. Yapı içerisinde bulunan demir ve silis fazları kopma davranışına etkisi bu iki görsel arasındaki farkta gözlemlenebilir.

4.5 ELEKTRİK İLETKENLİĞİ SONUÇLARI

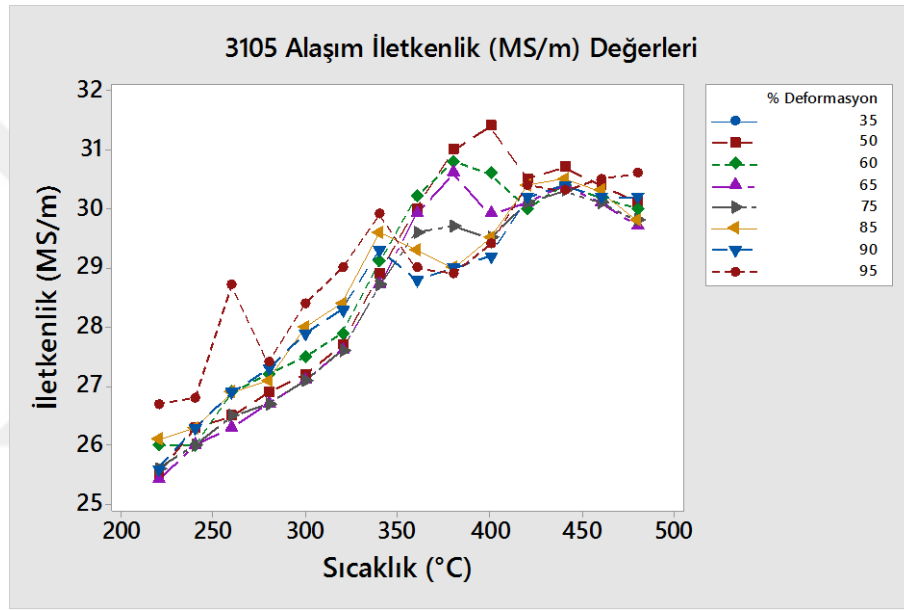
Elektrik iletkenliği değerleri SigmaScope SMP10 cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm birimi MS/m olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.47: 1050 alaşım serili alüminyum ürünlerin farklı yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı elektrik iletkenlik değerleri

1050 alaşım serisi incelendiğinde iletkenlik değerleri diğer alaşım serilerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum yapı içerisinde alüminyum oranının yüksek

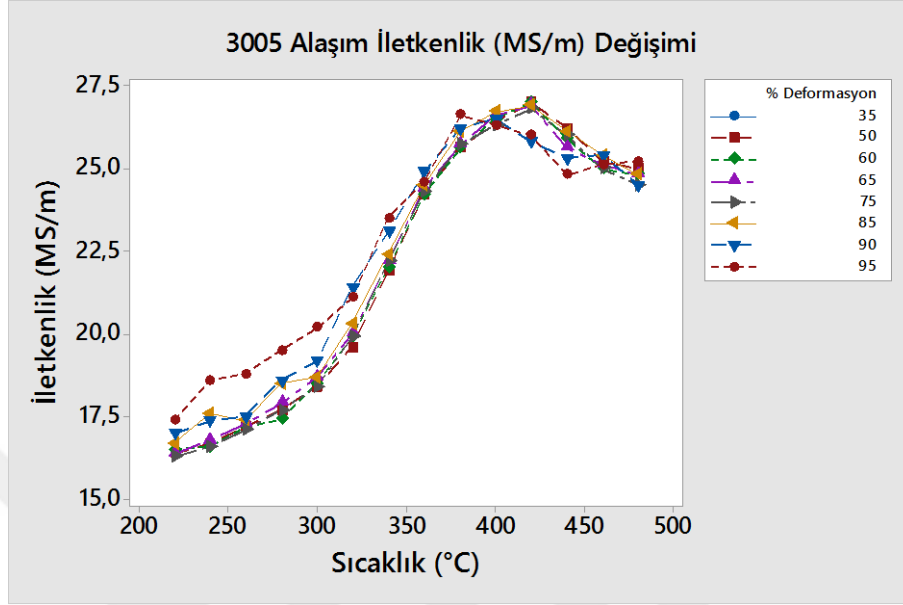
olmasından kaynaklanmaktadır. Ticari saflıktaki %99,5 alüminyum oranı içeren 1050 alaşımın deformasyona bağlı olarak iletkenliğinde çok büyük farklılıklar yaşanmadığı gözlemlenmiştir. %95 deformasyon uygulanmış numune ölçümleri dışında genel olarak tüm seri birlikte hareket etmiştir. %95 oranındaki deformasyona bağlı olarak yeniden kristallenme sıcaklığının düştüğü görülmektedir. 350 °C sıcaklıklara kadar tüm eğride elektrik iletkenliği yükseliş göstermiştir. Bu değerden sonraki sıcaklıklarda ise düşüş yaşanmıştır. Yükseliş ve düşüş yaklaşık 2 MS/m olarak gözlemlenmiştir. Tane büyümesi ile iletkenliğin daha fazla artmadığı ve düşmesi ile ilgili literatürde herhangi bir bilgiye rastlanmamıştır.



Şekil 4.48: 3105 alaşım serili alüminyum ürünlerin farklı yüzde deformasyon oranına ve ısıl işlem sıcaklığına bağlı elektrik iletkenlik değerleri

3105 alaşım serisi incelendiğinde 340 ve 420°C sıcaklıklarda iletkenlik değerlerine artışlar gözlemlenmiştir. Toparlanma kademesi sırasında kısmi düşüşler yaşansa da eğri tamamen artış yönünde ilerlemiştir. Deformasyon oranına bağlı olarak incelemeler gerçekleştirilirse deformasyon oranının iletkenliği 380°C sıcaklıklarda olumsuz etkilediği görülmüştür. Ancak geri kalan tüm deformasyon oranlarında eğri birlikte hareket etmiştir. Bu noktadaki kritik değişim sıcaklıkları 340 ve 420 °C olarak gözlemlenmiştir. Mekanik özelliklerde 380°C sıcaklıkta gözlemlenen farklılık elektrik iletkenliği ile benzer sonuçları ortaya koymamaktadır. Toparlanma ile elektrik iletkenliği artışı mikro yapısal özellikleri tanımlamada mekanik özelliklerde elde edilen verilerden daha güvenilir sonuçlar ortaya koymaktadır. Elde edilen eğri

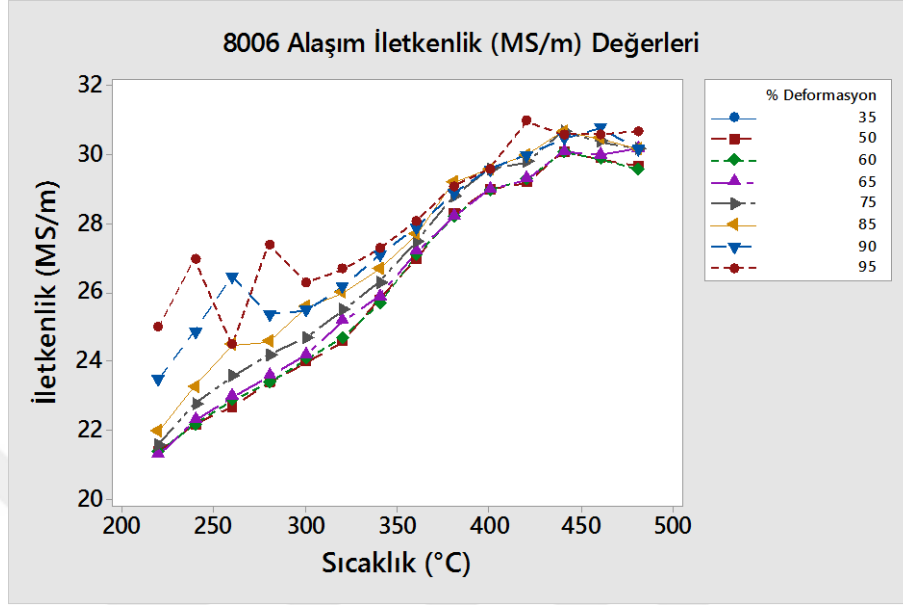
440°C ve üstündeki sıcaklıklarda doğrusal ilerlediği ve bu noktadan sonra elde edilen taneler daha fazla büyümediği söylenilebilir.



Şekil 4.49: 3005 alaşım serili alüminyum ürünlerin farklı yüzde deformasyon oranına ve ısıtım sıcaklığına bağlı elektrik iletkenlik değerleri

3005 alaşım serili alüminyum levhaların elektrik iletkenlik sonuçları incelendiğinde 420°C sıcaklıkta yeniden kristallenme gerçekleşmiş ve toparlanma kademesinin başladığı görülmektedir. Bu sıcaklıktan sonra elde edilen elektrik iletkenliği verilerinde düşüş gözlemlenmiştir. Elektrik iletkenliğinin artışı ise 340°C bölgesinde daha dik bir konuma ulaşmıştır. Elde edilen en yüksek elektrik iletkenliği 27,2 MS/m ile 420°C sıcaklıkta gözlemlenmiştir. Deformasyon yüzdesi elektrik iletkenliğine etkisi çok azdır. %95 deformasyon oranına sahip alüminyum levhanın elektrik iletkenliği 320°C bölgesine kadar diğer serilerden 1-3 MS/m daha yüksek değerlerde seyir göstermiştir. Mekanik özellik incelemeleri ile karşılaştırıldığında toparlanma davranışı mekanik olarak 300 °C sıcaklıklarda görülmüş ve elektrik iletkenliği sonuçlarına bakıldığında bu değerden sonra yapıdaki iletkenlik değerinin eğimi artmıştır. Sonuçlar birbirleri ile paralellik göstermektedir. Elektrik iletkenliği değerlerinde en düşük değerler 3005 alaşım serisinde gözlemlenmiştir. 3005 alaşım serisi içerisinde bulunan yüzde alüminyum bileşimi 8006 serisine oranla yüksek olmasına karşın elektrik iletkenliğindeki bu düşüklüğün sebebi çözünmüş halde bulunan bileşik miktarının 8006 alaşıma oranla daha yüksek olması sebebiyledir. 8006 serisinde Fe ve Si bileşimleri yapıda

çözünmemiş ve disperse olmuş halde bulunmaları sebebiyle iletkenlik değerlerinde 3005 alaşım kadar düşüş gözlemlenmemiştir.



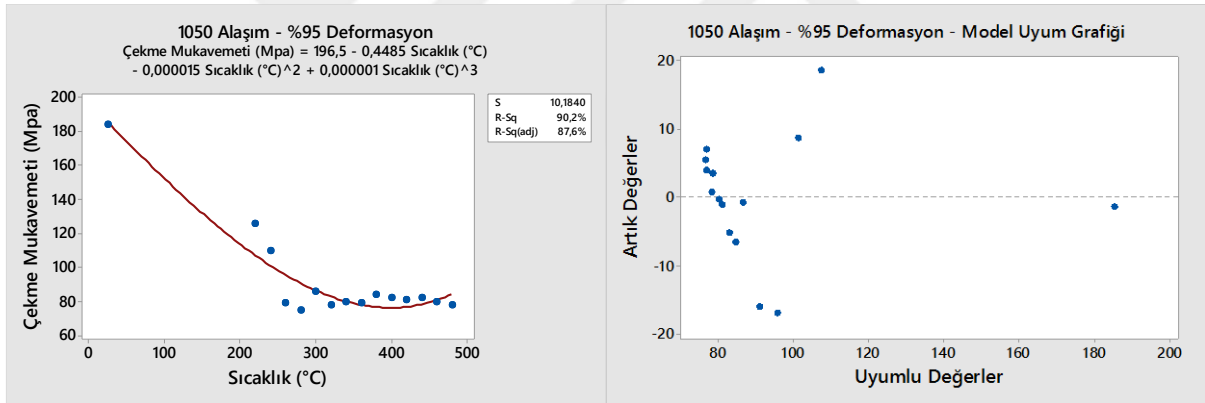
Şekil 4.50: 8006 alaşım serili alüminyum ürünlerin farklı yüzde deformasyon oranına ve ısı işlem sıcaklığına bağlı elektrik iletkenlik değerleri

Şekil 4.50' de verilen 8006 alaşım serili alüminyum levhaların elektrik iletkenlik sonuçları incelendiğinde artışın lineer olduğu ve 460°C sıcaklık değerinden sonra eğrinin doğrusal olarak devam ettiği gözlemlenmiştir. Lineer davranış göstermesi ve yeniden kristallenme ve toparlanma kademelerinde bariz farklılıklar yaşanmamasının sebebi olarak yapı içerisinde çözünürlük değeri düşük intermetalik bileşimlerin bulunması sebebiyledir. Yüksek deformasyon oranları, düşük sıcaklıklarda değişim göstermiştir. Düşük sıcaklıklarda dahi yapının yeniden kristallenme ve toparlanmaya müsait olduğu görülmektedir. Bu değerlerden sonra deformasyon oranı %85 ve altındaki değerlerde iletkenlik değişimi diğer deformasyon oranları ile benzer özellik göstermemiştir. En yüksek iletkenlik değerleri 440°C sıcaklıkta 31 MS/m olarak ölçümlenmiştir.

4.6 REGRESYON ANALİZLERİ VE MODEL VERİLERİNİN İNCELENMESİ

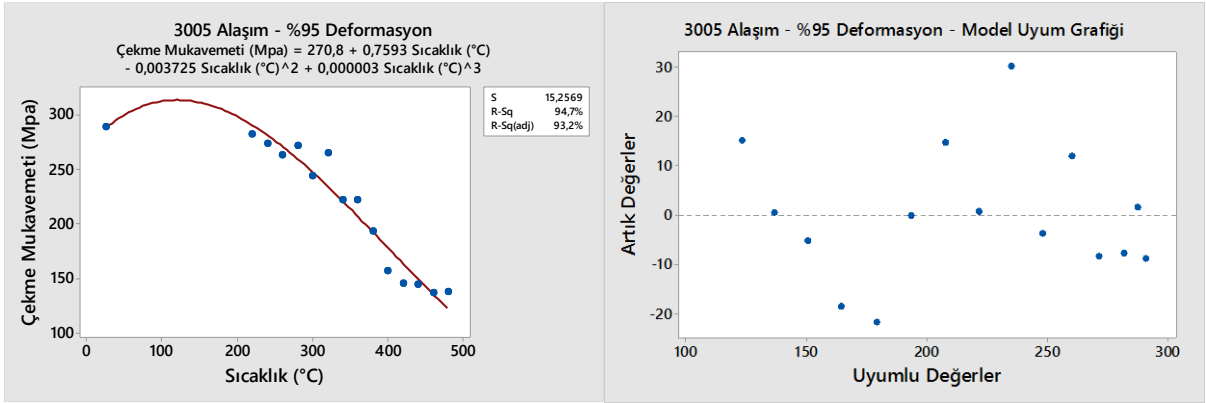
Alaşım serilerinin mukavemet eğrileri oluşturulması akabinde derlenen veriler ile sıcaklık ve deformasyona bağlı olarak veriler kübik fonksiyon parametreleri ile modellenmiştir. Elde edilen modeller vasıtası ile istenilen mekanik özellik model sonucu olarak tanımlandığında

Minitab istatistiksel programı üzerinden hangi deformasyon oranı uygulanması gerektiği ve ne kadar sıcaklıkta ısıl işlem uygulanması gerektiği çıktı olarak verilebilmektedir. Model doğruluğunun anlaşılabilmesi için en küçük kareler yöntemi ile elde edilen R-sq verilerinin %100'e yakın olması istenmektedir. Çekme mukavemeti, akma mukavemeti, uzama ve sertlik değerleri için farklı deformasyon oranlarında ısıl işlem görmemiş deney serilerinin test sonuçları regresyon modeli ile incelenmiştir. İncelemelere göre %99 oranında R-sq değerleri elde edildiği daha önceki bölümlerde görülmüştür. Farklı deformasyon oranlarına ait numunelerin ısıl işlem sıcaklığı ile değişim eğrileri incelenmektedir. Her iki değişken yüzde deformasyon ve sıcaklık verileri birlikte karşılaştırıldığında yüzde deformasyonun model içerisinde etkili olmadığı görülmektedir. Ancak yüzde deformasyon modele dahil edilmediği takdirde R-sq değerlerinde düşüşler gözlemlenmektedir. % 95 deformasyon oranı için tüm alaşım serilerinde incelenen mekanik özelliklerin regresyon denklemleri Şekil 4.51-63 aralığında verilmiştir.



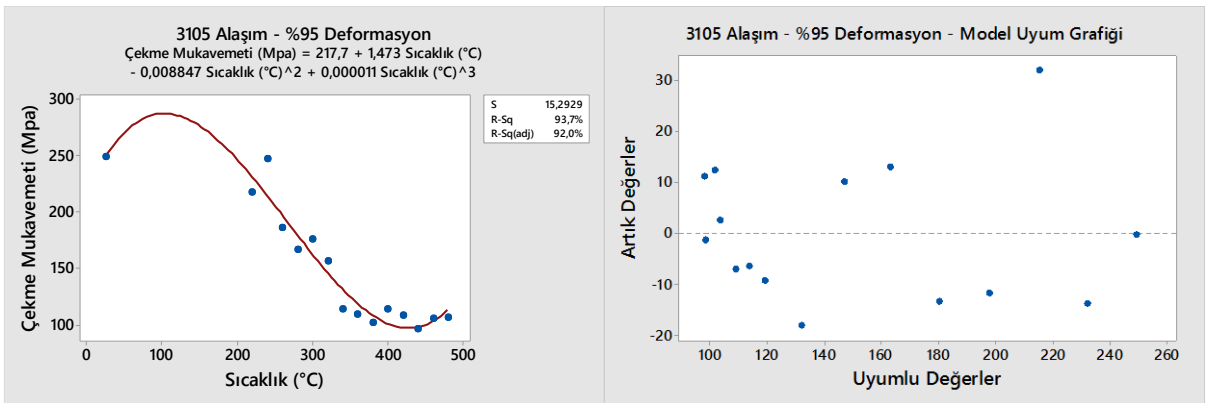
Şekil 4.51: 1050 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı çekme mukavemetinin polinomial regresyon analizi ve model uyum grafiği

Şekil 4.51' de belirtilen 1050 alaşım serisinin %95 deformasyona uğramış deney numunesi incelendiğinde; sıcaklığa bağlı olarak çekme mukavemetinin davranışı incelenmiştir. İncelenen model verilerinde maksimum sapma aralığı 20 MPa olarak görülmektedir. Bu değer aralığı çok kısıtlı bir bölgededir. Ancak 1050 alaşım yapısı itibariyle düşük sıcaklıklarda yeniden kristallenme ve tane büyümesi mekanizmalarını göstermesi sebebiyle 220 °C ve altındaki davranışların incelenmesi gerekmektedir. Genel olarak 1050 serisinde model uyumluluğu diğer alaşım serileri gibi R-sq değerlerine sahip olmasa da %87 ile kullanılabilir olduğu görülmektedir.



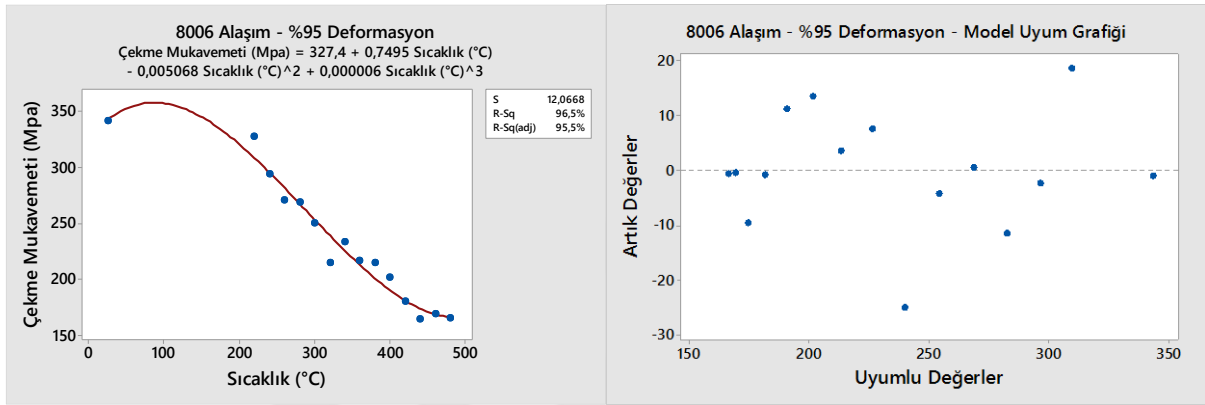
Şekil 4.52: 3005 alışım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı çekme mukavemetinin polinomial regresyon analizi ve model uyum grafiği

Şekil 4.52’de verilen 3005 alışım serisindeki verilerin incelenen ısıl işlem sıcaklıkları için daha dar aralıklarda ve geçişlerin net ve belirgin olarak model ile eşleştiği görülmektedir. Nitekim ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak 3. Dereceden elde edilen çekme mukavemeti denklemindeki R-sq değeri %93,2’dir. Model verileri ile elde edilen veriler arasındaki farklılık incelendiğinde 30 MPa değer farklılıkları görülmektedir. Ancak genel olarak ± 10 MPa değer aralığında model verileri uyumlu değerler göstermektedir. Bu aralık EN 485-2 mekanik standardında verilen aralıkların içerisinde yer almaktadır. Bu aralık örneğin 220 MPa için 195 ile 240 MPa aralığında istenmiştir ve ± 30 MPa değerini sağlamaktadır. Bu nedenle EN standartının sağlanması için istenilen model verileri kullanılabilir.



Şekil 4.53: 3105 alışım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı çekme mukavemetinin polinomial regresyon analizi ve model uyum grafiği

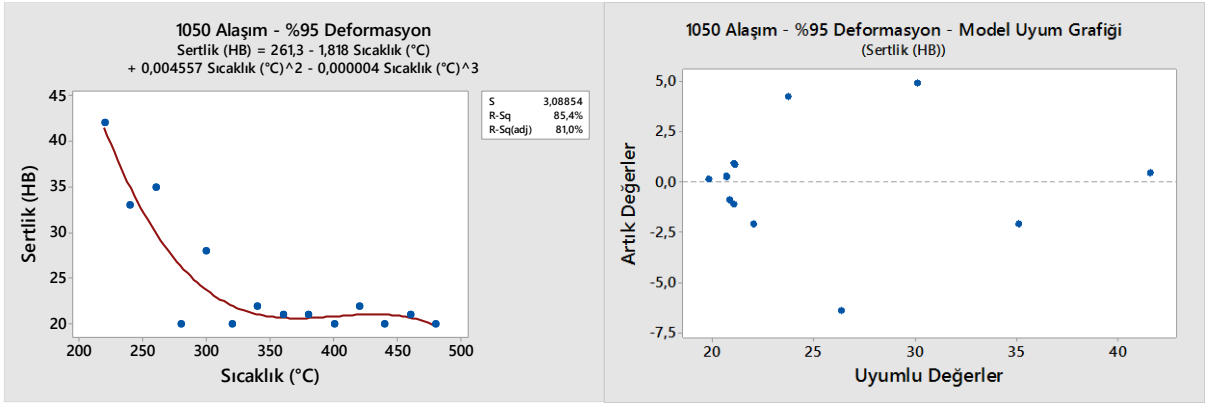
3105 alaşım serisinin deney sonuçları incelendiğinde %92 R-sq(adj) oranı ile yüksek bir uyumluluk oranı yakalandığı görülmektedir. Model uyum grafiği incelendiğinde verilerin ± 20 MPa aralığında dizildiği Şekil 4.53'de görülmektedir. Bu durum istenilen standart aralıkları sağlaması sebebiyle eğer %95 deformasyon uygulanarak bir ürün elde edilmesi ve bunun çekme mukavemeti isteniyorsa ilgili deformasyon oranı için polinomial regrasyon modeli kullanılabilir.



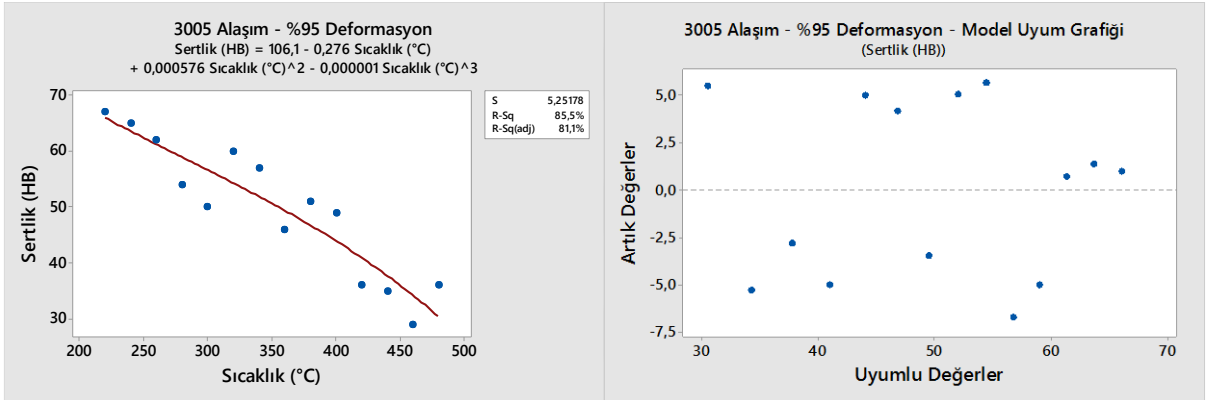
Şekil 4.54: 8006 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı çekme mukavemetinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği

8006 alaşım serisinin deney sonuçları incelendiğinde %95 R-sq (adj) oranında model doğruluğu sağlanmıştır. Model uyumluluk verileri incelendiğinde uyumlu değerler ve artık değerlerin ± 20 MPa değerleri arasında dağıldığını ve genel olarak ± 10 MPa aralığında sapmaların yaşandığı gözlemlenmektedir. Elde edilen regrasyon denkleminde 8006 serisinin ısıtılma işlemine bağlı olarak polinomial fonksiyona daha yakın veriler sağladığı Şekil 4.54 görülmektedir.

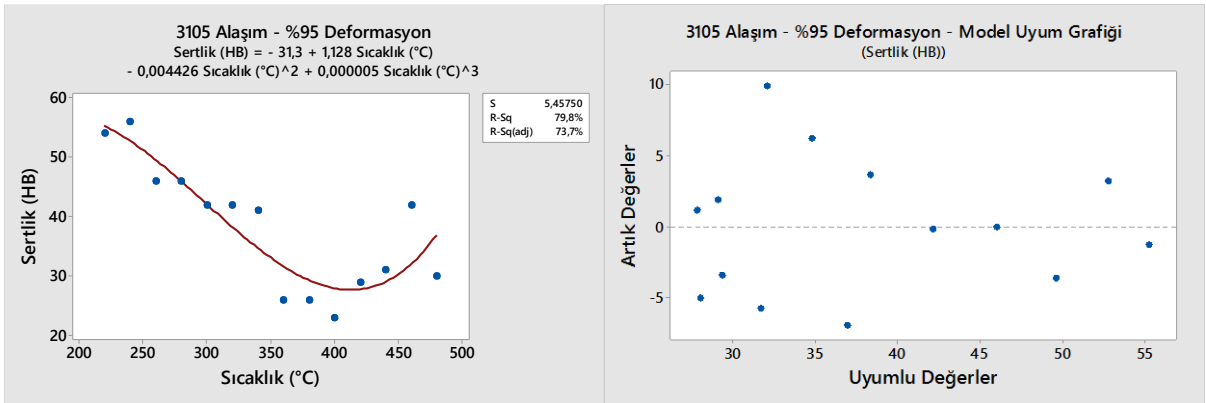
Sertlik değerleri çekme mukavemetine benzer olarak regrasyon modelleri ile incelenmiştir. İncelemeler sırasında elde edilen verilerin regrasyon değerlerindeki model uyumlulukları çekme mukavemetine göre daha düşüktür. Model uyumlulukları düşük olmasına karşın uygulanan polinomial fonksiyonlar ana veriyi temsil etmektedir. %95 deformasyona sahip deney serisinin sertlik dağılım fonksiyonları tüm alaşım serileri için Şekil 4.55 – 58 aralığında verilen grafiklerde incelenmiştir.



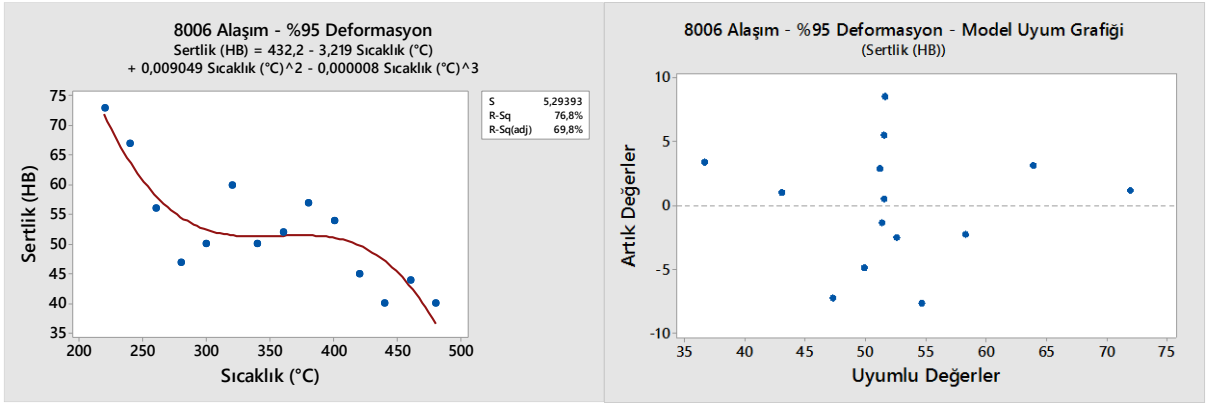
Şekil 4.55: 1050 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı sertlik değerlerinin polinomial regresyon analizi ve model uyum grafiği



Şekil 4.56: 3005 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı sertlik değerlerinin polinomial regresyon analizi ve model uyum grafiği

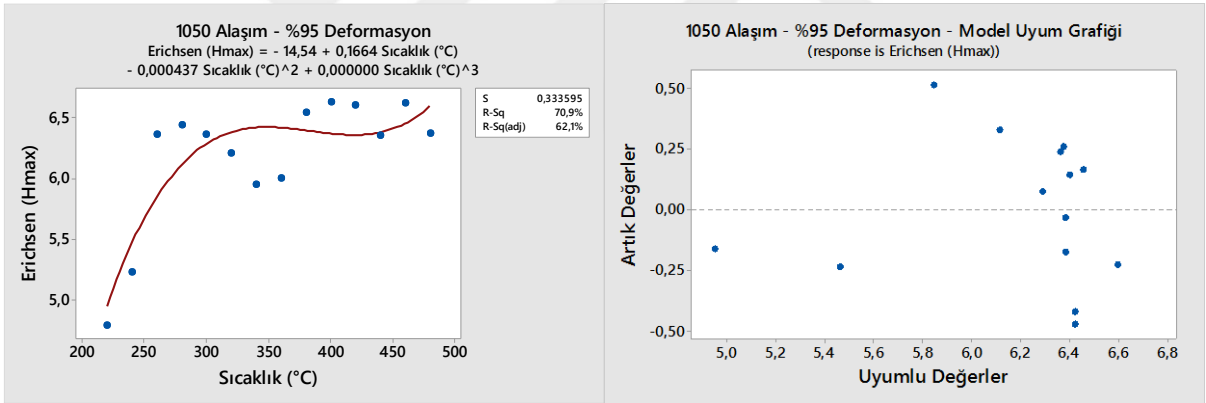


Şekil 4.57: 3105 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı sertlik değerlerinin polinomial regresyon analizi ve model uyum grafiği



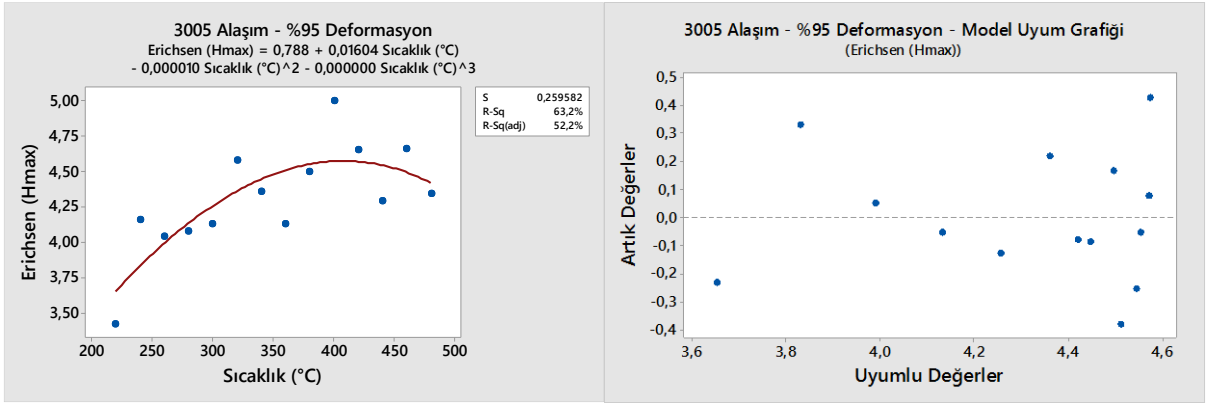
Şekil 4.58: 8006 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı sertlik değerlerinin polinomial regresyon analizi ve model uyum grafiği

Erichsen değerlerinin regresyon fonksiyonları yine benzer yöntemle oluşturulmuştur. Model verileri aşağıdaki grafiklerce tanımlanmış ve model uyumluluk grafikleri verilmiştir.

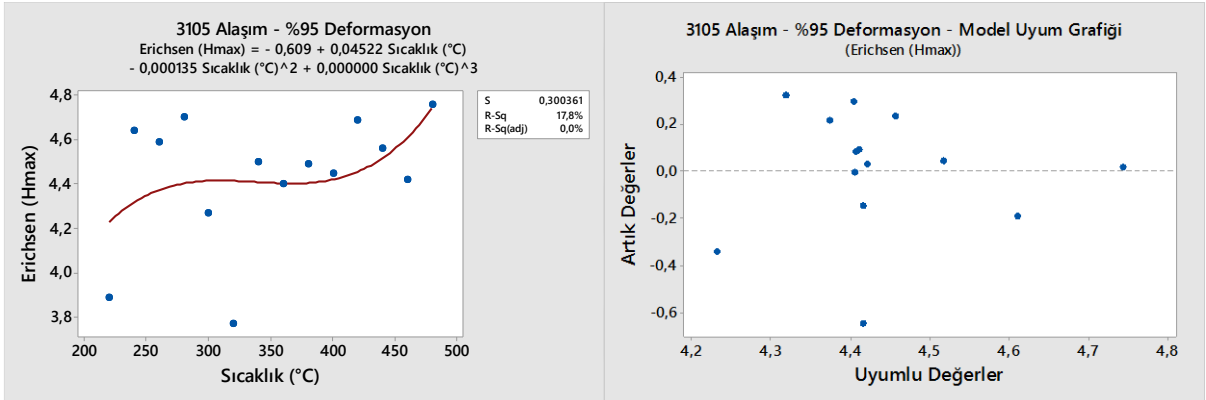


Şekil 4.59: 1050 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerlerinin polinomial regresyon analizi ve model uyum grafiği

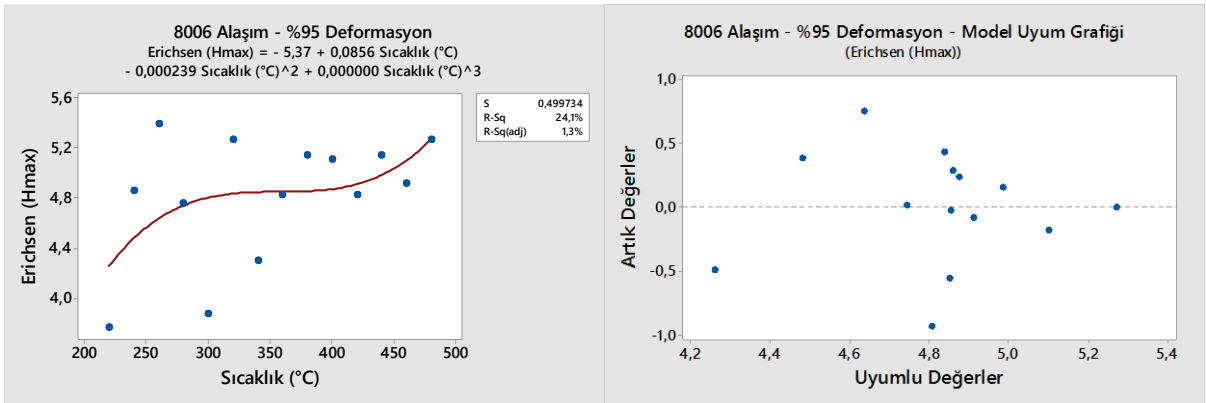
Erichsen Hmax test değerleri incelendiğinde Şekil 4.59’da verilen veri dağılımlarının sertlik ve çekme mukavemeti kadar iyi çıkmadığı ve verilerin geniş sapma aralıklarında olduğu görülmektedir. Bu durum %95 deformasyon oranı için geçerlidir. Daha düşük deformasyon oranlarında kesit alanı daha yüksek olması sebebiyle derin çekme değerleri daha sağlıklı çıkmaktadır. Genel olarak %95 deforme edilmiş ürünlere derin çekilme işleminden daha çok bükerek şekil verme uygulanmaktadır. Isıl işlem sıcaklığına bağlı olarak gerçekleştirilen regresyon modellerinin grafikleri Şekil 4.60 – 4.63’de verilmiştir.



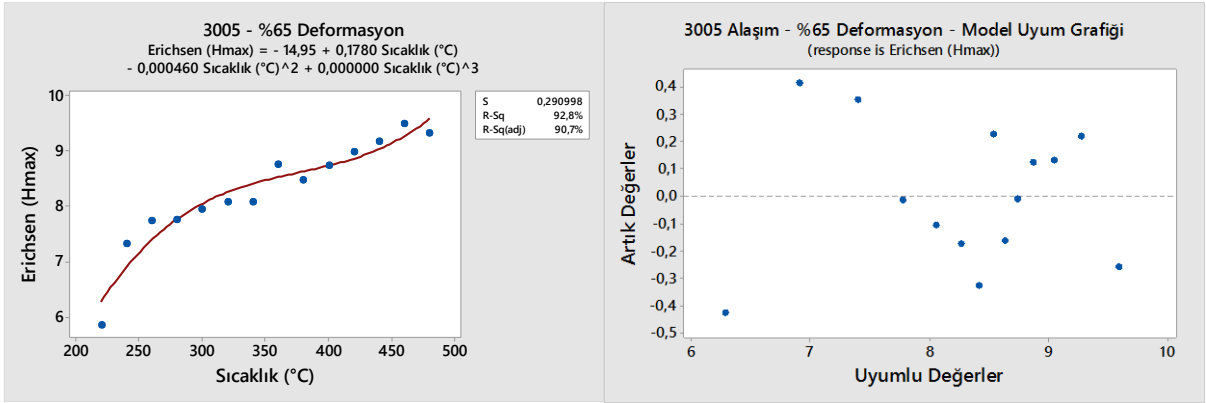
Şekil 4.60: 3005 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği



Şekil 4.61: 3105 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği



Şekil 4.62: 8006 alaşım %95 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği



Şekil 4.63: 3005 alaşım %65 deformasyon oranındaki sıcaklığa bağlı erichsen derin çekilebilirlik değerinin polinomial regrasyon analizi ve model uyum grafiği

Şekil 4.63'de görüldüğü üzere 3005 deney serisinin %65 deformasyon oranındaki incelemesinde; ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak erichsen derin çekilebilirlik verilerinin %90 R-sq (adj) oranında elde edildiği görülmektedir. Bu değer %95 deformasyon oranında elde edilen R-aq (adj) değerinden %40 daha yüksek doğrulukla elde edildiği görülmektedir. Bu durum deformasyon oranına bağlı olarak kesit alanındaki azalmanın test derinliğindeki elde edilen veride sapmalar oluşturması sebebiyledir. Derin çekme sırasında ekstansometrenin hassasiyeti %95 deformasyon oranındaki kesitin değerlerinden düşük olması sebebiyle veriler düzgün bir aralıkta dizilmediği görülmektedir. Model uyumluluğu verileri incelendiğinde artık değerler $\pm 0,4$ mm aralığında dağılım gösterdiği gözlemlenmektedir.

Tablo 3: Alaşım serilerinin deformasyon oranı değişkeni ile doğrusal regresyon denklemlerindeki eğim ve sabit katsayıları.

Alaşım Serisi	Çekme Mukavemeti	Sabit	Akma Mukavemeti	Sabit2	Uzama	Sabit3
1050	0,848	103,9	0,7158	104,5	0,14	14,83
3005	1,364	150,2	1,35	140	0,08	9,28
3105	1,21	126,8	1,3	114,1	0,11	11,52
8006	1,076	218,3	1,027	180,9	0,05	7,334

Eğim değerleri kontrol edildiğinde yönelim durumları ve benzer durumda sabit değerlerinin nasıl değiştiği gözlemlenebilir. 1050 alaşım serisi çekme ve akma mukaveti için en düşük eğim ve sabit değerlerine sahipken uzama verilerinde en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. X değişkeninin tanımlı olduğu değer yüzde deformasyondur.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan bu çalışmada 1050, 3005, 3105 ve 8006 alaşım serilerinin deformasyon yüzdesine ve farklı ısı işlem sıcaklıklarına bağlı olarak çekme mukavemeti, sertlik ve derin çekilebilirlik değerleri incelenmiştir. İncelemelerde sadece deformasyon yüzdesinin etkisi, deformasyon ve ısı işlem sıcaklığının etkisi olmak üzere ikili değişkenlerin alaşım serilerinde malzeme mekaniğine etkileri kontur grafikleri ve regresyon modelleriyle açıklanmıştır.

Çekme mukavemeti için oluşturulan regresyon modellerinde % 97 - 99 aralığında düzeltilmiş R-kare değerleri elde edilmiştir. Deney serilerinde elde edilen test sonuçlarının polinomial regresyon modelleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Herhangi alaşım serisinde belirtilen malzeme toparlanma kademesinde ısı işlem gördüyse ve tekrar deformasyon uygulanacaksa ilgili polinomial fonksiyonlar yardımıyla mekanik test sonuçları tahmin edilebilecektir. Bu durum üretim öncesinde deneme proseslerinin azaltılmasına ve nihai ürünün maruz kalacağı mekanik etkilere dayanım gösterip göstermeyeceğini açıklamaktadır.

Çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde alaşımların deformasyona bağlı mukavemet artışlarında 3105 alaşım serisi 120 MPa artış göstererek deformasyona bağlı en fazla çekme mukavemeti artan alaşım serisi özelliğini göstermektedir. 8006 ve 3005 alaşım serileride %35 - %95 deformasyon aralığındaki eğimleri 3105 alaşım serisine yakındır. Safiyeti yüksek olan 1050 alaşım serisi %95 deformasyon oranı sonrasında %35 deformasyona göre 60 MPa artış göstermiştir. Literatür verileriyle karşılaştırma yapılmış olup biyet olarak dökülmüş ve haddelenmiş benzer alaşımlı ürünlerin farklı deformasyon oranlarına bağlı incelemelerde değerler birbirlerine yakındır. İkiz merdaneli döküm yönteminde farklı ısı işlem sıcaklıklarına bağlı incelemelerde yeniden kristallenmenin 20 °C kadar daha düşük sıcaklıklarda başladığı gözlemlenmiştir.

Deformasyon oranı arttıkça yeniden kristallenme için gerekli ısı işlem sıcaklığı düşmektedir. En büyük farklılık 80°C ile 3105 alaşım serisinde oluşmuştur. Belirtilen ısı işlem sıcaklığındaki düşüş miktarları ilgili kontur grafikleri ile gösterilmiştir. Deformasyon oranına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişimler hem görsel olarak açıklanmış hem de %95 deformasyon oranı için tüm alaşım serilerinde çekme mukavemeti, sertlik ve erichsen derin çekilebilirlik sonuçlarının değişimi regresyon modelleri ile tanımlanmıştır.

Erichsen derin çekilebilirlik testleri incelendiğinde test yöntemine deformasyon oranına bağlı kesit alanının etkisi yüksektir. Örneğin 3005 alaşım serisinde %95 deformasyon yüzdesine sahip deney numunesi 3 mm derin çekilebilirlik gösterirken %35 deformasyon yüzdesine sahip deney numunesi 6-7 mm derin çekilebilirlik göstermektedir. Isıl işlem sıcaklığı ile oluşabilecek maksimum fark 2-3 mm derinlik farklılıkları iken kesit alanı artırılarak 4-5 mm farklılıklar sağlanabilmektedir. Bu nedenle elde edilen derin çekilebilirlik verilerinde ısıl işlem sıcaklığından daha çok bulk metal miktarına derin çekme uygulamasında dikkat edilmesi gerekmektedir.

İlgili alaşım serilerinin yeniden kristallenme ve toparlanma bölgeleri tanımlanmış ve bu bölgelerin deformasyon oranlarına göre sıcaklık değişimleri belirlenmiştir.

Yeniden kristallenme ve toparlanma sıcaklıklarının öncesinde ve sonrasındaki mikro yapı incelemelerde yüzey bölgelerinde toparlanma gözlemlenirken iç kesimlerde yeniden kristallenme olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum ikiz merdaneli döküm yöntemindeki ısı transferine bağlı olarak oluşan tanelerin iç gerilimlerinin bir sonucu olduğu ilgili mikro yapı görselleri ile gösterilmiştir. Derin çekme işlemi sonrasında yüzey görselleri incelenmiş ve alaşım serilerinde uygulanacak deformasyon kademesi sonrasında oluşabilecek yüzey görselleri tanımlanmıştır.

- Deformasyon oranına bağlı olarak gerçekleşen çekme mukavemeti artışları polinomial regresyon modelleri ile oluşturulmuş olup R kare değerleri %98 olan uyumlu veri modellemeleri gerçekleştirilmiştir.

- Deformasyon oranı ile mukavemet artışı; 70 MPa ile en az 1050 alaşım serisinde görülmüştür. 3105 alaşım serisinde bu değer 90 MPa, 3005 alaşım serisinde 90 MPa ve 8006 alaşım serisinde 95 MPa artış ile en yüksek mukavemet artışı görülen alaşım serisi olduğu görülmektedir.

- Isıl işlem sıcaklığına bağlı olarak yeniden kristallenme ve tane büyümesi mekanizmaları ile mukavemet düşüşünün hızla yükseldiği sıcaklıklar; 1050 alaşım serisi için 240 C, 3105 alaşım serisi için 380 C, 3005 alaşım serisi için 410 C, 8006 alaşım serisi için 420 C olarak gözlemlenmiştir.

- Deformasyon oranına bağılı olarak gerçekleşen akma mukavemeti değerlerinde; 1050 alaşım serisi 50 MPa, 3005 alaşım serisi 90 MPa, 3105 alaşım serisi 90 MPa, 8006 alaşım serisinde ise 95 MPa artış gözlemlenmiştir. Akma mukavemetindeki deformasyon oranına bağılı artış miktarı çekme mukavemeti ile benzerlik göstermektedir.

- Isıl işlem sıcaklığına bağılı olarak akma mukavemetindeki ani düşüş yaşanan bölgeler ise; 1050 alaşım serisi için 280 C, 3105 alaşım serisi için 380 ile 420 C aralığında, 3005 alaşım serisi için, 420 ile 460 C aralığında, 8006 alaşım serisinde ise 420 C'de olduğu gözlemlenmektedir.

- Uzama davranışları incelendiğinde deformasyon oranına bağılı olarak uzama miktarları ısıl işlem görmemiş malzemelerde en fazla %11 ile %30 deforme edilmiş 1050 alaşım serisinde olduğu karşımıza çıkmaktadır. Uzama davranışı yüksekte düşüğe doğru sırasıyla 3105, 3005 ve 8006 olarak gözlemlenmektedir. Deformasyon oranı arttıkça bu değer %1 seviyelerine kadar kademeli olarak azalmaktadır.

- Uzama davranışları incelendiğinde 8006 alaşım serisinde %65 deformasyon oranında uzama davranışında düşük sıcaklıklarda dahi %5-6 artışlar elde edildiği görülmektedir. Bu durum kesit alanının 8006 alaşım serili ürünlerde daha etken olduğunu göstermektedir. 1050 alaşım serisinde uzama davranışı tüm deformasyon serileri için 280 C sıcaklıkta artış yaşadığı görülürken, 3005, 3105 ve 8006 alaşım serilerinde deformasyon oranına bağılı olarak uzama davranışı kademeli olarak değişmektedir. En yüksek uzama davranışı kesit alanı en yüksek olan, deformasyon oranı en düşük malzemelerde gerçekleştiği görülmüştür. Erichsen testlerine benzer şekilde kesit alanının uzama davranışına etkisi yüksektir.

- Bir diğer dikkat çekici sonuç ise 3105 alaşım serisinde çekme mukavemeti test sonuçlarında deformasyon yüzdesinin yeniden kristallenme sıcaklığına olan etkisi diğer alaşım serilerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

- 3105 alaşım serisinde yeniden kristallenme sıcaklığı deformasyon oranı %35 seviyesinde iken 420 C'lerde görülmüş ve deformasyon oranı %95 seviyelerine yükseldikçe bu sıcaklık 340 C'lere kadar düşmektedir. 1050 ve 8006 alaşım serilerinde magnezyum 0.004 mertebelerinde iken 3xxx serisi alaşımlarda diğer alaşım serilerinden farklı olarak 0.250 magnezyum bileşimi bulunmaktadır. 8006 serisi ve 1050 alaşım serilerinde deformasyona bağılı yeniden kristallenme sıcaklığında değişim gözlenmemesi deformasyona bağılı yeniden kristallenme sıcaklığının değişim mekanizmasının magnezyum kaynaklı olduğunu göstermektedir.

- Erichsen test sonuçlarında malzemelerin kesit alanlarının mukavemetten daha çok etkili olduğu görülmüştür. En yüksek derin çekilebilirlik değerleri 1050 alaşım serisinde %50 deformasyon ve 480 C ısıtıl işlem uygulandığında elde edildiği görülmüştür. En düşük derin çekme yüksekliği ise 3-4 mm aralığında 3005, 3105 ve 8006 serilerinin %95 deforme edilmiş serilerinde olduğu görülmüştür. 1050 alaşım serisinde minimum değerler 5-6 mm aralığındadır. Kesit alanı 1,5 - 2 mm aralığında olan malzemelerde 1050 yerine diğer alaşım serileride tercih edilebilir. Derin çekme bölgelerinin makro yüzey analizlerinde 1050 ve 8006 serilerinde yüzey normalden 3xxx serisi alüminyum ürünlerde protakallanma davranışı olduğu gözlemlenmiştir. Eğer malzemelerde yüzey beklentisi mevcut ise 1050 ve 8006 alaşım serileri tercih edilmelidir.

- Malzeme yüzey sertlikleri Brinell cinsinden ölçülmüş olup en düşük sertlik değerleri 1050 alaşım serisinde 15-25 HB aralığında ölçümlenmiştir. 3005 alaşım serisinde sertlik değerleri deformasyon oranından etkilenmezken, 3105 alaşım serisinde %95 deforme edilmiş deney serisinin yüzey sertliği 340 C sıcaklıkta düşmüş ve yüzey sertliği 25 HB değerlerinde seyretmiştir. Aynı alaşım serisinin %35 deformasyon oranına sahip deney serisi ise 380 C'de 35 HB değerlerine düştüğü görülmüştür. Yüksek deformasyon oranının yüzey bölgelerden içeriye doğru azalması ve alaşım elementlerinin yeniden kristallenme sıcaklığını değiştirmesi sebebiyle sertlikte düşüşler gözlemlenmektedir. Çekme mukavemetinde deformasyon oranının etkisi 8006 alaşım serisinde gözlemlenmezken sertlik değerlerinde 20 HB kadar %35 ile %95 deformasyon oranları arasında yeniden kristallenme gerçekleşen bölgenin hemen öncesinde (350 - 400 C) sertliklerde farklılıklar yaşanmıştır. Bu durum mikro yapılarda da yeniden kristallenme ile yüzey bölgelerinden tane büyümesi gerçekleşmesi ve deformasyon oranının yüzeydeki kalıntı gerilimi arttırması sebebiyledir.

- Elektrik iletkenliği sonuçları incelendiğinde 1050 alaşım serisinde 340 C ısıtıl işlem sıcaklığında 36,0 MS/m ile en yüksek elektrik iletkenliği elde edilmiştir. Bu değerden sonra toparlanma kademesiyle birlikte malzemenin elektrik iletkenliğinde 1,5 MS/m düşüş olduğu gözlemlenmektedir. 3105 alaşım serisinde elektrik iletkenliği artışı %85 ve üstü deformasyon oranları için tek kademe görülürken, bu deformasyon oranının altında 340 C bölgesinde ve 420 C ısıtıl işlem sıcaklığında iletkenlik artışları olmuştur. Artan sıcaklıklar ile yine 1,5 MS/m kadar bir düşüş olmaktadır. 3005 alaşım serisinde tek kademeli olarak lineere yakın bir eğride iletkenlik artışı sağlanmıştır. 420 C ısıtıl işlem sıcaklığında elde edilen en yüksek değer 27,5 MS/m'dir. 420 C ısıtıl işlem sıcaklığının üzerinde yine 1,5-2 MS/m kadar elektrik iletkenliğinde

düşüş gözlemlenmiştir. 8006 alaşım serisinde ise herhangi kademeli bir mekanizma görülmemiştir. Elde edilen grafikte düşük sıcaklıklarda ısıl işlem görmüş ve yüksek deformasyon oranına sahip deney serilerinde daha yüksek elektrik iletkenliği elde edilmesinin nedeni içyapıdaki gerilimin yeniden kristallenme ve toparlanma kademesi için daha düşük sıcaklıklarda harcanabildiğini göstermektedir. 8006 alaşım serisinde elde edilen maksimum elektrik iletkenliği değerleri 31 MS/m ile 460 C sıcaklıklarda elde edilmiştir. Bu değerden sonra eğri doğrusallığını koruyacaktır.

- Elektrik iletkenliği sonuçlarında alaşım serileri birbirleri ile karşılaştırıldığında iletkenliğin yüksekten düşüğe doğru sıralanmış hali 1050 > 8006 > 3105 > 3005 olarak elde edilmiştir. Eğer malzemelerde yüksek mukavemet, uzama ve yüzey beklentisinin yanında elektrik iletkenliği beklentisi mevcut ise 8006 alaşım serisi tercih edilmelidir. 1050 alaşım serisi iletkenlik değerleri daha yüksek olmasına karşın mekanik mukavemet anlamında 8006 kadar yüksek mukavemete sahip olmayacaktır. |

KAYNAKLAR

- [1]. [1] Lampman, T.Zorc, S.Henry, A.Ronke, 1990, Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, ASM Handbook, 2.
- [2]. J.Hirsch, 2011, Aluminium sheet fabrication and processing, Metals and Surface Engineering, 719-746
- [3]. J. E. Hatch, 1984, Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, Metals Park OH, American Society for Metals, 20-42
- [4]. M.Tzedaki, M.Galceran, 2013, Structure and formation mechanism of rolled in oxide areas on aluminum lithographic printing sheets, Scripta Materialia, 233-236
- [5]. S. Kaan İpek, A. Ulus, G. Hapçı, G. Orhan, 2017, Effect of Annealing Temperature on the Corrosion Behaviour of Continuous Cast and Cold Rolled Aluminum, 8th Aluminum Symposium
- [6]. P. S. Lee, H.R. Piehler, 1998, Influence of surface texture on orange peel in aluminum, Journal of Materials Processing Technology, 315-319
- [7]. K. Kontani, K. Ikeuchi, 1997, Behaviour of interfacial oxide during diffusion bonding of aluminum alloys and its influence on joint strength, Transaction of JWRI, 13-22
- [8]. C. Vargel, 2004, The Book of Corrosion of aluminum chapter B1- introduction to corrosion of aluminum, Elsevier, 12-24
- [9]. S. K. Subodh, 2006, Reduction of oxidative melt loss of aluminum and its alloys, European Final Report, 9-15
- [10]. The Aluminum Association, 2007, Rolling aluminum from the mine through the mill, 3-6
- [11]. Novelis PAE S.A.S. , 2008, Continuous strip caster user and maintenance manual, 2-11
- [12]. Z.B. Kavaklıoğlu, 1999, Alüminyum levha üretiminde proses optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü
- [13]. Y. Ming-bo, P.F.Sheng, 2009, Analysis about forming mechanism of equiaxed crystal zone for 1Cr18Ni 9Ti stainless steel twin roll thin strip, Journal of Materials Processing Technology, 209:2203-2211

- [14]. W.Kurz, 1986, B.Givonala, Theory of micro structural development during rapid solidification, *Acta Metall*, 34: 823-830
- [15]. R. Woodward, 1994, The Rolling of aluminum: the process and the products, European Aluminium Association, 9-11
- [16]. F.D. Fischer, F.G.Rammerstorfer, 1999, Buckling phenomena related to Rolling and levelling of sheet metal, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 42, 1887-1910
- [17]. Z.Y. Jiang, 2011, Mechanics of Cold Rolling thin strip, *Numerical Analysis – Theory and Application*, 440-462
- [18]. Axel E. Barten, 2002, Aluminium Rolling Mill technology – Future concepts in thin strip and foil Rolling, *Die Bibliothek der Technik*, Vol.233, 21-23
- [19]. H. Zhang, M. Diehl, F. Roters, D.Raabe, 2016, A virtual laboratory using high resolution crystal plasticity simulations to determine the initial yield surface for sheet metal forming operations, *International Journal of Plasticity*, 111-138
- [20]. C.K. Mukherjee, 2016, Grain size control for successfully fabricating stainless and inconel alloy tubing, *The Tube % Pipe Journal*, 2-6
- [21]. D.A. Porter, K.E. Easterling, 1992, *Phase Transformation in Metals and Alloys*, Second Edition, 120-130
- [22]. D.Dışpınar, 2018, Alüminyum Şekillendirme Teknolojileri, İstanbul Üniversitesi, Ders Notu, 118-120
- [23]. F.J. Humphreys, M. Hatherly, 1995, recrystallization and related annealing phenomena, Elsevier, First Edition, 1-15
- [24]. F.J. Humphreys, M. Hatherly, 1995, recrystallization and related annealing phenomena, Elsevier, First Edition, 311-318
- [25]. D.Dışpınar, 2014, Malzemelerin Mekanik Özellikleri, İstanbul Üniversitesi, Ders Notu, 60-78
- [26]. Çekme Deneyi Deney Föyü, 2018, Celal Bayar Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 1-13

- [27]. İ.Erdem, 2017, Minitab Uygulamalı İstatistik Yöntemler Kitabı, Başkent Üniversitesi – Seçkin Yayıncılık, 305-351
- [28]. W.C.Liu, Z.Li, C-S. Man, 2007, Effect of heating rate on the microstructure and texture of continuous cast AA 3105 aluminum alloy, *Journal of Material Science and Engineering*, 173-180
- [29]. M.Slamova, 2001, Effect of strain level on recrystallisation response of AA8006 an AA8011 thin strips, *Journal of Czech Metal*, 15-27
- [30]. M.Mhedhbi, M.Khalif, C. Bradai, 2017, Investigations of microstructural and mechanical properties evolution of AA1050 alloy sheets deformed by cold - rolling process and heat treatment annealing, *Journal of Materials and Environmental Sciences*, Sayı 8, 2967-2974
- [31]. X.G. Qiao, M.J. Starink, N.Gao, 2006, Hardness inhomogeneity and local strengthening mechanisms of an Al1050 aluminium alloy after 1 pass of equal channel angular pressing, *Journal of Material Science Engineering A* 513-514, 52-58
- [32]. Michaela Šlapáková POKOVÁ, Mariia ZIMINA, Miroslav CIESLAR, 2016, Effect of pre-annealing on microstructure evolution of TRC AA3005 aluminum alloy subjected to ECAP, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 627-633
- [33]. M. Cieslar M. Pokova, 2014, Twin Roll cast AA8006 Aluminum Sheets Processed by Accumulative Roll Bonding, *Journal of Materials(Basel)*, 8058-8069
- [34]. S.Ertan, 2005 The effect of the thermomechanical processes on the formability of the AA3003 aluminum alloys, *Teknik Alüminyum San. A.Ş.*, 1-6

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Sadık Kaan İpek
Doğum Yeri	İstanbul
Doğum Tarihi	17.05.1993
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	05455674251
E-Posta Adresi	skaanipek@gmail.com



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Metaller ve Malzeme Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	01.01.2015

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Metaller ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Tezli Yüksek Lisans
Mezuniyet Tarihi	21.12.2018

Makale ve Bildiriler
Investigation of Elemental Distribution in the Sheet Cut After Aluminum Continuous Plate Casting, Cold Rolling and Heat Treatment Processes TMS Annual Meeting & Exhibition Arizona/USA
Examination of Fluidity Characteristics of 1xxx, 3xxx and 5xxx Aluminum Alloys with Different Compositions and Solidification Temperatures 8th Alus Aluminium Symposium IST/TUR
Sustainable Source Using and Minimization of the Environmental Effects in Aluminum Sheet Production 8th Alus Aluminium Symposium IST/TUR
Effect of Annealing Temperature on the Corrosion Behaviour of Continuous Cast and Cold Rolled Aluminum 2018 TMS Annual Meeting & Exhibition Arizona/USA
Material Surface Roughness Change in Twin Roll Casting of Aluminium as Cast Sheet Product 2017 TMS Annual Meeting & Exhibition San Diego/USA
Aluminum Sheet Production: General Principles of Refining for Casting 2017 TMS Annual Meeting & Exhibition San Diego/USA
Change in Si Morphology with Time and Temperature in Sr Modified A356 2016 TMS Annual Meeting & Exhibition

