



**TOZ METAL DEMİR LEVHALARIN DİRENÇ KAYNAĞI
İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİ**

İrem Ebrar ALAGÖZ ÖZOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İrem Ebrar ALAGÖZ ÖZOĞLU

27/05/2022

TOZ METAL DEMİR LEVHALARIN DİRENÇ KAYNAĞI
İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİ
(Yüksek Lisans Tezi)

İrem Ebrar ALAGÖZ ÖZOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2022

ÖZET

Toz metalurji yöntemleri, endüstriyel uygulamalarını, son 30 yıl boyunca önemli bir üretim yöntemi olarak arttırdı. Artışındaki bu önemli neden, yüksek üretim hızıdır, parçaların üretimi son büyüklüğe yakındır ve ikincil işlemlere ihtiyaç duymamasıdır. Bununla birlikte, toz metal malzeme boyutları da artmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada, demir bazlı toz metal malzemelerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Bu amaçla, 2x25x25 mm³ ebatlarında toz metal sıkıştırılmış malzemeler tek yönlü preste 500,550 ve 600 MPa basınçlarda üretildi. Bu örnekler daha sonra mikrodalga sinterleme yöntemiyle 925 °C' de 15 dakika sinterlendi. Toz metal numunelerinin ham ve sinterlenmiş yoğunlukları belirlendi, daha sonra numuneler üst üste binen formda nokta direnci kaynağı ile birleştirildi. Birleştirilen numunelerin birleştirme özellikleri optik mikroskop ile incelenmiştir ve sonuçlar kaynak bölgesi, geçiş bölgesi ve ana metalin sertlik değerlerinin ölçülmesiyle değerlendirildi.

Bilim Kodu : 91528

Anahtar Kelimeler : Toz metalurjisi, birleşebilirlik, toz metal malzemelerin kaynağı, direnç kaynağı

Sayfa Adedi : 83

Danışman : Prof. Dr. Adem KURT

JOINABILITY OF POWDER METAL IRON PLATES WITH
RESISTANCE WELDING

(M. Sc. Thesis)

İrem Ebrar ALAGÖZ ÖZOĞLU

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2022

ABSTRACT

Powder metallurgy methods have increased their industrial applications as an important manufacturing method over the last 30 years. The important reason for this increase is the high production speed, the production of parts close the final size and not needing for secondary processes. However, powder metal materials sizes have also increased. For this reason , in this study the joinability of iron-based powder metal metarials with spot resistance welding was investigated. vort his purpose, 2x25x25 mm³ sized powder metal bulk samples were produced by in onedirect press at 500,550 and 600 MPa pressures. These samples were then sintered at 925 °C for 15 minutes by microwave sintering method. The green and sintered densities of the powder metal samples were determined, then the samples were joined by spot resistance welding in the form of overlapping. The joining properties of the joined samples were examined with an optical microscope and the results were evaluated by measuring the hardness values of the weld zone, transition zone and base metal.

Science Code : 91528

Key Words : Powder metallurgy, joinability, welding of powder metal parts, resistance welding

Page Number : 83

Supervisor : Prof. Dr. Adem KURT

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca, her daim bana yol göstererek, teşvik ve desteklerini esirgemedi, engin bilgi birikimi ve tecrübelerini benimle paylaşan; hayata ve insanlığa dair değerli öğütler veren kıymetli danışmanım Prof. Dr. Adem KURT' a sevgi, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım süresince değerli bilgilerini ve önerilerini esirgemeyen çok değerli hocam Doç. Dr. Hayriye ERTEK EMRE 'ye katkılarından dolayı teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarım esnasında, numunelerimi üretirken malzeme ve teçhizat desteğini esirgemeyerek bana her konuda yardımcı olan Dr. İrem Burcu ALGAN ŞİMŞEK ile Uzman Ömer ŞAHİN hocalarıma ve Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Geçirdiğim zorlu dönemde dostluğunu, sevgisini ve desteğini hep yanımda hissettiğim ablam Kübra DOĞAN 'a teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar maddi manevi desteğini esirgemeyen annem, babam ve kardeşime teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Hayatımda geçirdiğim zorlu süreçlerde hep yanımda olan sevgili eşim Fatih ÖZOĞLU 'na ve küçük olmasına rağmen büyük sabır gösterebilen kızım Eslem Erva ÖZOĞLU 'na teşekkür ederim. Bu yaptığım çalışma ve bundan sonra yapacağım her güzel başarıyı kızım Eslem Erva ÖZOĞLU 'na ithaf ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ İMALAT YÖNTEMLERİ.....	5
2.1. Toz Metalurjisi	5
2.2. Tozların Özellikleri	6
2.3. Metal Tozu Üretim Yöntemleri.....	7
2.4. Toz Metalurji Yönetimi ile Parça Üretim Süreci	7
2.4.1. Tozların karıştırılması	8
2.4.2. Presleme işlemi	10
2.4.3. Sinterleme işlemi.....	11
2.5. Toz Metal Parçaların Uygulamaları	14
3. TOZ METAL MALZEMELERİN BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	17
3.1. Toz Metal Parçaların Kaynağı	20
3.2. Direnç Projeksiyon Kaynağı (RPW)	21
3.2.1. Nokta Direnç Kaynağı.....	23

	Sayfa
3.3. Kaynak Sırasında Sıcaklık Dağılımı ve Çekirdeğin Oluşumu	25
3.4. Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	27
3.5. Isı Kaybı	27
3.6. Kaynak Değişkenleri	28
3.6.1. Elektrot bileşimi ve şeklinin etkisi	29
3.6.2. Kaynak akım şiddetinin etkisi	30
3.6.3. Kaynak zamanının etkisi	31
3.6.4. Kaynak elektrot baskı kuvvetinin etkisi	31
3.6.5. Esas metalin kimyasal bileşimi	33
3.6.6. Kaynak edilecek parçaların yüzeylerinin etkisi	33
3.6.7. Elektrot ve iş parçasının temas durumları	33
3.7. Kaynak Kalitesi ve Kaynak Kalitesine Etki Eden Dış Faktörler	34
3.8. Kaynak Kabiliyeti ve Diyagramı	34
3.9. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Makinaları	37
3.9.1. Çoklu nokta kaynak makinaları	37
3.9.2. Tekli nokta kaynak makinaları	37
3.10. Nokta Direnç Kaynağının Kaynak Hataları	38
4. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI TEST YÖNTEMLERİ	45
4.1. Tahribatlı Testler	46
4.1.1. Sıyırma Testi	46
4.1.2. Sertlik Testi	46
4.2. Tahribatsız Testler	48
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
5.1. Malzeme Metot	51

	Sayfa
5.2. Toz Numunelerin Preslenmesi	53
5.3. Toz Numunelerin Sinterlenmesi	55
5.4. Kaynak Deney Seti.....	56
5.5. Kaynak Parametreleri.....	57
5.6. Nokta Direnç Kaynağında Kullanılan Elektrotlar.....	57
5.7. Toz Metal Numunelerin Direnç Kaynağı ile Birleştirilmeleri	58
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	61
6.1. Toz Metal Numunelerin Preslenme Sonuçları	61
6.2. Toz Metal Numunelerin Kaynaklı Birleştirilmesi.....	63
6.3. Mikroyapısal Sonuçlar	66
6.4. Sertlik Sonuçları.....	70
6.5. Sıyırma Testi Sonuçları.....	71
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Kaynak türleri	18
Çizelge 3.2. Direnç kaynağında kullanılan başlıca elektrot alaşımları	29
Çizelge 3.3. Malzeme ve levha kalınlığına göre elektrot kuvveti.....	32
Çizelge 5.1. Basınlara göre ortalama ham yoğunluk değerleri	54
Çizelge 5.2. Basınlara göre ortalama sinterlenmiş yoğunluk değerleri	55
Çizelge 5.3. Kaynak işleminde kullanılan kaynak parametreleri	57
Çizelge 6.1. Basınlara göre ortalama yoğunluk değerleri	61
Çizelge 6.2. Kaynak bölgesi inceleme sonuçları	68
Çizelge 6.3. Basınlara göre ortalama sertlik değerleri (BSD).....	70
Çizelge 6.4. Sıyırma testi sonuçları	74

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Endüstriyel uygulamalarda görülen toz morfolojileri.....	7
Şekil 2.2. Toz metalurjisi üretim aşamaları.	8
Şekil 2.3. Değişik öğütme karıştırma makinaları: a) Dönen tambur b) Dönen çift koni c)Vidalı mikser d) Bıçaklı mikser.....	9
Şekil 2.4. Üç farklı toz karıştırma yönteminin şematik gösterimi a) Yayınma b) Konveksiyon c) Kesme.....	9
Şekil 2.5. Toz metal sıkıştırma safhalarının basitleştirilmiş görünüşü.....	10
Şekil 2.6. Sinterleme sırasında meydana gelen değişimlerin şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.7. Sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli.....	13
Şekil 2.8. İki toz karışımı kullanarak sıvı faz sinterlenmesinin kavramsal aşamaları.....	14
Şekil 3.1. Direnç kaynağı uygulama aşamaları.....	21
Şekil 3.2. Nokta direnç kaynağı prensibi.....	23
Şekil 3.3. Tipik nokta kaynağının çevrimi.....	24
Şekil 3.4. Direnç nokta kaynağında bölgeler, dirençler ve sıcaklık dağılımı	26
Şekil 3.5. Standart elektrot uç şekilleri.....	30
Şekil 3.6. Kaynak süresinin çekirdek oluşumuna etkisi a) Kısa kaynak zamanı b) Ortak kaynak zamanı c) Uzun kaynak zamanı.....	31
Şekil 3.7. Elektron kuvveti ve kaynak basıncının sebep olduğu kuvvet arasındaki denge FN: Kaynak metali sıvı basıncı kuvveti, FE: Elektrotkuvveti.....	32
Şekil 3.8. Elektrotların temas durumuna göre oluşan kaynak çekirdekleri.....	34
Şekil 3.9. Kaynak kabiliyetinin temel faktörler ve özelliklerle ilişkisi.....	35
Şekil 3.10. Kaynak kabiliyeti diyagramı.....	35
Şekil 4.1 Sıyırma testi görselleri	46
Şekil 4.2. A) Brinell sertlik B) Rockwell sertlik C) Vickers sertlik	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Brinell sertlik testi şematik gösterimi	48
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan demiz tolzarının boyut analizi	52
Şekil 6.1. Ham yoğunluk ve sinterleme yoğunluğu	61
Şekil 6.2. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa Ana metal mikro yapısı.....	62
Şekil 6.3. Yoğunluk-Basınç grafiği	63
Şekil 6.4. Artan basınç ile yoğunluk ve gözenekliliğin değişimi	64
Şekil 6.5. a) Mikroyapı b) Makroyapı	64
Şekil 6.6. a) Mikroyapı b) Makroyapı	65
Şekil 6.7. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa Kaynak bölgesinin makro görüntüsü...	66
Şekil 6.8. a) Ana metal b) Geçiş bölgesi c) Kaynak çekirdeği	67
Şekil 6.9. Kaynak Bölgesi inceleme grafiği	68
Şekil 6.10. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa Kaynak bölgesi incelemesi	69
Şekil 6.11. Basınçlara göre ortalama sertlik grafiği.....	71
Şekil 6.12. Sıyırma testinin teknik resmi	72
Şekil 6.13. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa	72
Şekil 6.14. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa Çekme gerilimi grafikleri	73
Şekil 6.15. Sıyırma testi sonucu elde edilen gerilim-basınç grafiği	74

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Çalışmada kullanılan numune örnekler	51
Resim 5.2. Çalışmada kullanılan kalıp-zımba	53
Resim 5.3. Çalışma kullanılan pres makinası	54
Resim 5.4. Synotherm marka DS 1500 model mikrodalga fırın	56
Resim 5.5. Kaynak donanımı	57
Resim 5.6. Deneyde kullanılan a) Elektrotlar ve b) Kalıp	58
Resim 5.7. Bindirme şeklinde nokta kaynağı yapılmış numune	59
Resim 5.8. a) Optik Mikroskop b) Sertlik cihazı c) Çekme cihazı	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
°C	Santigrat derece
dn	Çekirdek çapı
F	Elektrot kuvveti
Fe	Demir
I	Akım
J	Joule
Kg	Kilogram
kN	Kilonewton
K_t	Isı iletme katsayısı
kVA	Kilovoltamper
mm	Milimetre
mm²	Milimetre kare
mm³	Milimetre küp
MPa	Mega paskal
N	Newton
R	Direnç
s	Levha kalınlığı
S	Kaynak kabiliyeti
sn	Saniye
t	Süre
T_{em}	Metalin ergime sıcaklığı

Simgeler**Q****Açıklamalar**

Isı

%

Yüzde

 Ω

Ohm

 κ_t

Isı iletkenliği

Kısaltmalar**Açıklamalar****AC**

Alternatif akım

BSD

Brinell sertlik değeri

DC

Doğru akım

DT

Tahribatlı testler

EBW

Elektron Işını kaynağı

ERW

Elektrik direnç kaynağı

GTA

Gaz Tungsten Ark Kaynağı

GMA

Gaz Metal Ark Kaynağı

HB

Brinell sertlik

ITAB

Isı tesiri altında kalan bölge

LBW

Lazer ışını kaynağı

MIG

Metal inert gaz

MAG

Metal aktif gaz

NDT

Tahribatsız muayene

RSW

Direnç nokta kaynağı

T/M

Toz metalurjisi

TIG (WIG)

Tungsten (Wolfram) inert gaz

ZF

Füzyon bölgesi

1. GİRİŞ

Toz metalurjisi; (T/M) metal tozların şekillendirilip, sinterlenmesi yöntemi ile metalik parça üretme teknolojisidir [1].

T/M tarihte ilk olarak İnkalar tarafından altın tozundan mücevher yapımında kullanılmıştır. M.Ö. 3000 yıllarında Mısır'da demir tozu kullanılmıştır. M.S. 300 yıllarında da Hindistan'da demir tozundan Delhi Sütunu elde edilmiştir. T/M 1800 'ler de Rusya ve İngiltere de platin tozundan ingotlar yapılmıştır. Bakır ve gümüşten bozuk paralar üretilmiştir.

1900 'lerin başlarına gelindiği zaman lambalarda kullanılan karbon filament yerine volfram filamentler üretilmeye başlanmıştır. Daha sonra kobalt tozundan sert metal üretimi denenmiştir. 1940'larda bakır-grafit elektrik kontak parçaları, WC-Co sermentlerin (kesici uçlar, tel çekme kalıpları) üretilmesi gerçekleşmiştir. 1940'lardan sonra demir, demir dışı ve kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Pres kapasitesi 5-50 tondan 1000 ton üstüne çıkmıştır. Fırın büyüklüğü ve üretim verimliliği artmıştır [1,2].

Toz metalurjisi döküm, sıcak/soğuk presleme veya talaşlı imalat gibi geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha üstün olabilmektedir. Bu yöntemlerle üretilmesi güç hatta imkânsız olan parçalar T/M ile kolaylıkla üretilebilir. Mukavemet, aşınma direnci ve yüksek çalışma sıcaklığı gereken durumlarda tercih edilir. Döküm için gereken bitirme işlemlerini ortadan kaldırarak daha hassas ölçülerde parça üretimine imkân sağlar. İstenilen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde parça üretmek mümkündür.

Toz metalurjisi yönteminin diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında birçok üstünlüğü olsa da kendine özgü bazı eksiklikleri de mevcuttur. Bunlardan bazıları; verimsiz sinterleme, presleme sonrasında kalıptan çıkarılırken parçada oluşan çatlaklar, şekillendirme yönteminden kaynaklanan yoğunluk farklılıklarıdır. Kullanılan tozların karakteri, toz tanelerinin büyüklüğü, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi parametreler toz metalurjisi ile üretilen parçanın özellikleri üzerinde özellikle de mekanik özelliklerinde büyük bir etkiye sahiptir [3].

Geleneksel olarak T/M yönteminde öncelikle metal vd. tozlar, rijit bir kalıpta presleme işlemi ile istenilen parça biçiminde şekillendirilir. Oda sıcaklığında kalıp boşluğuna akan tozlar arasında, basınç altında oluşan zayıf sürtünme bağlarıyla yoğunlaşma başlar. Başlangıçta akışkan olan tozlar, kompaktlaşma sonrasında katı özelliği gösterirler. Presleme sonrasında, zayıf mekanik özellikler sergileyen parçalara sinterleme işlemi uygulanır. Kalıpta kompaktlaşma sonrasında uygulanan sinterleme işlemiyle, parçanın şeklini koruması ve mukavemette artış gibi olumlu sonuçlar elde edilir [3].

T/M süreci homojen bir yapıya sahip parçalar imal edilmesiyle üreticilerin çok çeşitli uygulamalarda davranışlarını daha tutarlı ve öngörülebilir ürünler üretmesini sağlar. Ek olarak, T/M süreci, performans gereksinimlerinin uygun hale getirilmesine izin veren yüksek derecede esnekliğe sahiptir [4].

Toz metalürjisi yöntemi, bilim ve sanayi uygulamalarında geniş bir alana sahiptir. Biyomedikal malzemeler, otomotiv parçaları, havacılık ve uzay sanayi, nükleer teknoloji ürünleri, iş makineleri, filtreler, kendinden yağlamalı yataklar vb. birçok uygulamada toz metalürjisi ile gerçekleştirilen üretim artmakta ve mevcut üretimde de gelişmeler kaydedilmektedir [5].

T/M parçalar için geçerli birleştirme süreçleri katı hal ve sıvı hal olarak kategorize edilebilir. Difüzyon bağlama ve sert lehimleme gibi katı hal işlemleri ağırlıklı olarak düşük yoğunluklu gözenekli parçalar için kullanılmıştır. Karşılaştırıldığında, daha yüksek yoğunluklu veya minimum gözenekliliğe sahip parçalar yoğun işlenmiş malzemeler olarak üretilir. Bu malzemeler ergitmeli birleştirme işlemleri kullanılarak kaynaklanır. T/M parçalarının kaynağını kısıtlayan ana sorunlar gözeneklilik, safsızlıklar ve bazı T/M parçalarının yüksek karbon içeriğine sahip olmasıdır [6].

Toz metal parçaların kaynağı, mikro yapılarındaki gözeneklerin varlığı nedeniyle döküm, haddelenmiş ve dövme parçaların kaynağından farklıdır. Gözeneklilik, yoğunluk, sinterleme gibi çeşitli işlem değişkenleri tarafından kontrol edilir. Gözenekliliğin türü, boyutu, dağılımı ve morfolojisi, özellikle kaynak koşulları altındaki bileşenlerde mekanik davranış üzerinde derin bir etkiye sahiptir [7].

Kaynak tekniği son yüz yılda büyük bir gelişme göstermiştir. İlk kaynak işlemi günümüzde sanatsal bir anlam taşıyan demirci kaynağıdır.1885 yılında elektrik direnç kaynağı bulunmuştur. Diğer kaynak eşitleri günümüze kadar gelişerek devam etmektedir.

Direnç kaynağı 1800’lerde Amerika’da tesadüfen bulunmuştur. İkinci dünya savaşından sonra günümüze kadar gelişimi sürekli devam etmiştir [8].

Elektrik direnç kaynağı günümüzde başta otomotiv, makine imalat ve beyaz eşya sanayi olmak üzere, metallerin şekillendirilerek ve kaynatılarak kullanıldığı pek çok endüstri kolunda kullanılan yaygın bir üretim tekniğidir

Elektrik direnç kaynağı yöntemi, ilave malzeme gerektirmediği, yüksek kaynak mukavemeti, estetikliği, kaynak işleminin hızlı yapılabilmesi gibi avantajları sayesinde günümüzde başta otomotiv, makine imalat ve beyaz eşya sanayi olmak üzere, metallerin şekillendirilerek ve kaynatılarak kullanıldığı pek çok endüstri kolunda kullanılmaktadır [9].

Elektrik direnç kaynağı yöntemlerinden biri olan direnç nokta kaynağında elektrik akımı birleştirilmek istenen parçaların üzerinden geçmektedir. Bu elektrik akımına karşı malzemenin sahip olduğu direnç birleşim noktasında malzemelerin ergimesine ve birleşmenin sağlanmasına neden olur. İki ya da daha fazla malzeme bu işlem sırasında kaynak yapılabilir [10].

Bu çalışmada şimdiye kadar uygulamalarına rastlanmayan toz metal levha numunelerin nokta direnç kaynağı yöntemi ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla ortalama 60 mikron boyutlarında ticari demir (Fe) tozları kullanılmıştır. Demir tozları 2x25x25 mm boyutlarındaki kalıp da 500,550 ve 600 MPa’ da preslendi. Preslenen numunelerin boyutları ve ağırlıkları ölçüldü. Daha sonra numuneler mikrodalga fırın kullanılarak 925 °C’ de 15 dakika buyunca sinterlendi. Sinterlenen numunelerin boyutları ve ağırlıkları ölçülüp yoğunluk artışı hesaplandı. Numunelerin bindirme şeklinde nokta kaynağı yapılıp mikroyapısal ve mekanik testleri yapıldı. Son aşamada sıyırma testi yapılarak kaynak bölgesinin ana metal bölgesinden daha fazla dayanıma sahip olduğu belirlendi.

2. TOZ METALURJİSİ İMALAT YÖNTEMLERİ

2.1. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi malzemelerin ve mühendislik parçalarının imal edilmesi için bir katı hal üretim yöntemidir. Bu işlem toz üretimi, şekillendirme işlemleri (soğuk ya da sıcak presleme), sinterleme ve son işlemleri (ekstrüzyon, dövme, haddeleme) kapsar [11].

Bu yöntem küçük, karmaşık şekilli ve diğer metalurji yöntemleri ile üretilmesi zor olan iş parçalarının üretilmelerine olanak sağlar. Ayrıca seramik, kompozit ve metal olmayan malzemelerin üretilmesini de sağlamaktadır [12].

Toz metalurjiye ihtiyaç duyulmasının birtakım nedenleri vardır. Bazı parçaların döküm yolu ile elde edilme imkânı yoktur. Örneğin tungstenin dökümle elde edilmesi imkansızdır, çünkü

3200°C gibi yüksek ergime derecesine sahiptir, ancak toz metalurjisi ile üretilir. Bazı özellikleri sadece toz metal yöntemlerinin vermesi ve ekonomik olması diğer bir tercih sebebidir. Kendi kendini yağlayan yataklar, sert metaller sadece T/M yöntemi ile üretilir. Talaşlı imalatı yok etmesi ve işçiliği azaltması ekonomik üstünlükler sağlamaktadır [1].

T/M parçalarını birbirine veya diğer döküm/dövme ürünlere birleştirerek karmaşık geometrik yapılar üretme yeteneğinden yararlanarak T/M kullanımını daha da artırmak mümkündür [6].

Toz metalurjisinin diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında avantajlarını şöyle sıralayabiliriz [13]:

- Seri ve çok sayıda üretim yapılır.
- Karmaşık yapıdaki küçük boyutlu şekiller seri bir şekilde üretilebilir.
- Dövme ve döküm yöntemlerine göre daha kaliteli ve daha ekonomik malzemeler üretilebilir. Üretilen malzemelerin dayanımı, sertliği ve yoğunluğu oldukça iyidir.
- Toz metalurjisiyle teknolojisinde malzeme kaybı yoktur.
- Toz metalurji teknolojisinde talaş kaldırmaya fazla gereksinim duyulmaz. Bu yüzden ekonomik bir yöntemdir.

- Diğer yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan, yüksek ergime sıcaklığına sahip refrakter (tungsten, molibden gibi) ve sert metallerin üretiminde ekonomik bir yöntemdir.

T/M dezavantajları da aşağıda verilmektedir [13]:

- Yüksek mukavemet gerektiren malzemelerde, diğer yöntemlere göre mekanik özellikler daha kötü olabilir.
- Bu teknolojiye ilk yatırım maliyeti yüksektir.
- Sinterleme sırasında boyca büzülmeden dolayı parçanın hacmi azalacağından kalıp tasarımı yapılırken boyut toleransına dikkat edilmelidir.
- T/M teknolojiyle seri üretilen iş parçalarının birim fiyatları klasik metalurji yöntemleriyle üretilenlere göre biraz daha pahalıdır.

2.2. Tozların Özellikleri

Seçilen üretim tekniği kullanılacak tozun özelliklerini belirlemektedir. Bu sebeple yapılacak parçaların kullanılacak yerlere göre tozları seçilmelidir. Metal tozlarının özellikleri iki ana başlık altında incelenebilir:

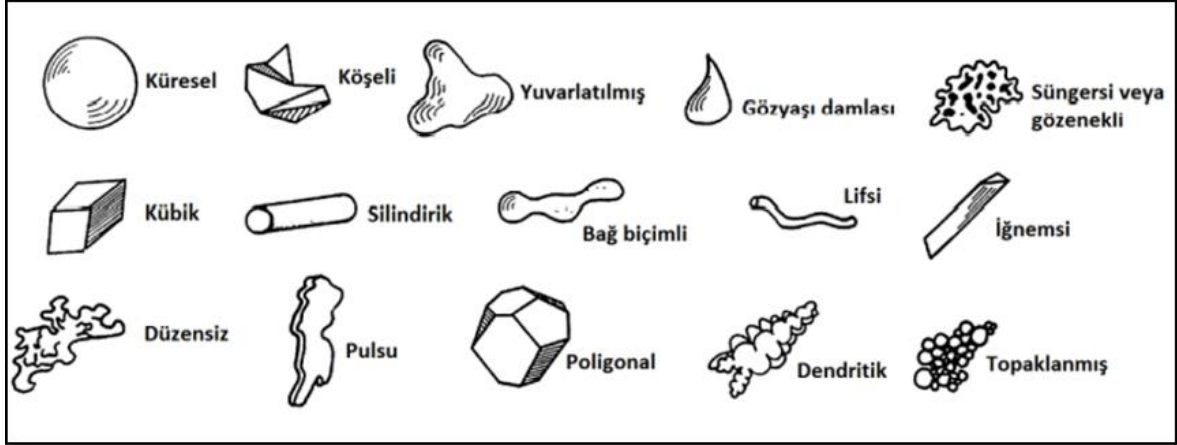
Tozların kimyasal özellikleri: Tozun saflık derecesi, tozun nelerden oluştuğu (bileşimi) kimyasal özelliklerin başında gelmektedir. Metal tozların kimyasal özelliklerini tespit edebilmek için standart kimyasal analiz yöntemleri kullanılır. Tozlar kimyaları bakımından elementel tozlar, karışımli tozlar ve ön alaşımlı tozlar olmak üzere üçe ayrılır. Elementel tozlar yüksek saflığa sahiptir. Karışımli tozlar iki veya daha fazla tozun karıştırılması ile oluşturulur. Ön alaşımlı tozlar ise tamamen alaşım halindedir.

Tozların fiziklerin özellikleri: Tozların fiziksel özellikleri şunlardır [14];

- Toz tane boyutu
- Toz tane şekli
- Tozların özgül yüzey alanı
- Görünür yoğunluk ve
- Akış hızı

2.3. Metal Tozu Üretim Yöntemleri

Seçilen üretim yöntemi, üretilen tozun boyutu, şekli, saflığı vb. özelliklerinin belirlenmesinde çok büyük etkiye sahiptir. Bir malzemeyi toz haline getirebilmek için maliyete, reaksiyonlara ve istenilen özelliklere dikkat edilmesi gerekmektedir [15].



Şekil 2.1. Endüstriyel uygulamalarda görülen toz morfolojileri [16].

Metal tozlarının üretiminde çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır [15];

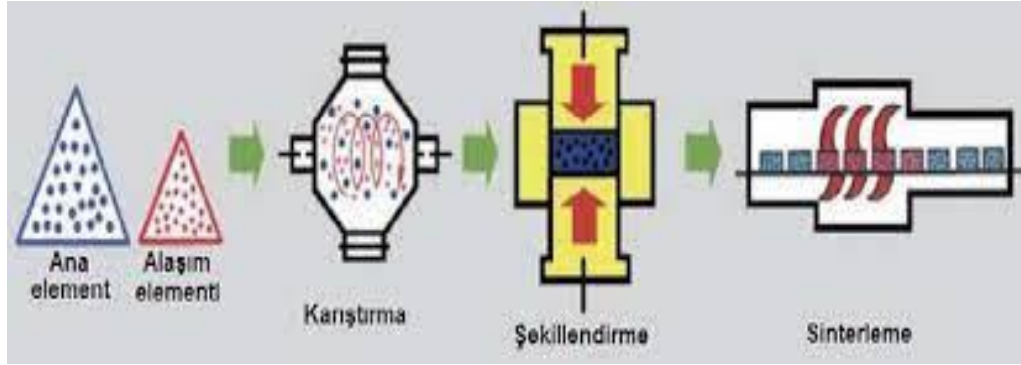
1. Kimyasal üretim teknikleri (İndirgeme reaksiyonları)
2. Elektroliz yolu ile üretim
3. Karbon ayrışma metodu
4. Atomizasyon yöntemi
5. Mekanik üretim yöntemleri (Darbe, Öğütme, Kesme, Basma)

Toz üretmek için en fazla atomizasyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem eritilebilen tüm metallerden ve alaşımlardan toz üretmede kullanılabilen bir yöntemdir. Atomizasyon ile üretilen tozların %80 i ise su atomizasyon ile üretilmektedir [1].

2.4. Toz Metalurji Yöntemi ile Parça Üretim Süreci

Toz Metalurjisi (T/M), son şekle yakın ürün ve ileri teknoloji malzeme alaşımlarının üretilmesine imkân veren farklı bir imalat yöntemidir.

Toz üretilirken ilk önce kimyasal özelliği, boyutu ve şekilleri farklı olan tozlar homojen bir şekilde karıştırılır. Ardından oluşturulan homojen toz karışımı kalıp içerisinde sıkıştırılır. Son adım olarak sinterleme işlemi uygulanır. Gerekli olan sıcaklık ve sürede yapılan sinterleme işlemi ile toz tanelerinin birbirleriyle bağ oluşturmaları sağlanmaktadır. Bu işlemin basamakları Şekil 2.2. 'de verilmiştir [16].



Şekil 2.2. Toz metalurjisi üretim aşamaları [18].

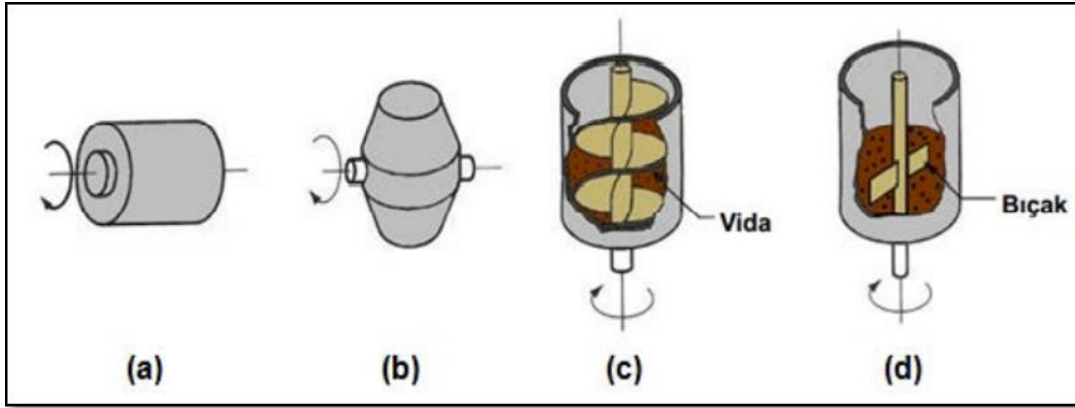
2.4.1. Tozların karıştırılması

Karıştırma; presleme öncesi uygulanan bir işlemdir. Bu işlemde toz boyutunun homojen hale getirilmesi, sıkıştırma için gerekli olan yağlayıcıların eklenmesi ve şekillendirme için toz-bağlayıcı karışımının hazırlanması amacıyla yapılmaktadır. Genelde karışıma %0,5-%1,5 arasında yağlayıcı katılır. Genelde yağlayıcı olarak metalik (Al, Zn, Li, Mg, Ca vs.) stearat ve parafin kullanılır. Yağlayıcı kullanımı tozlar arasındaki sürtünmeyi azaltır, tozların akışını kolaylaştırır ve kalıp aşınmalarını önler [18,19].

Alaşımlanmış tozlara, alaşım elementleri karıştırılırsa, karışan element yağlayıcı gibi davranır. Karbon ve grafit en çok kullanılan alaşım elementidir [18].

Karıştırma işlemiyle aynı zamanda özel parçacık boyut dağılımı (ince ve kaba tanelerin homojen bir şekilde karıştırılması), sinterleme sırasında yeni alaşımların oluşturulması amacıyla yapılmaktadır [20].

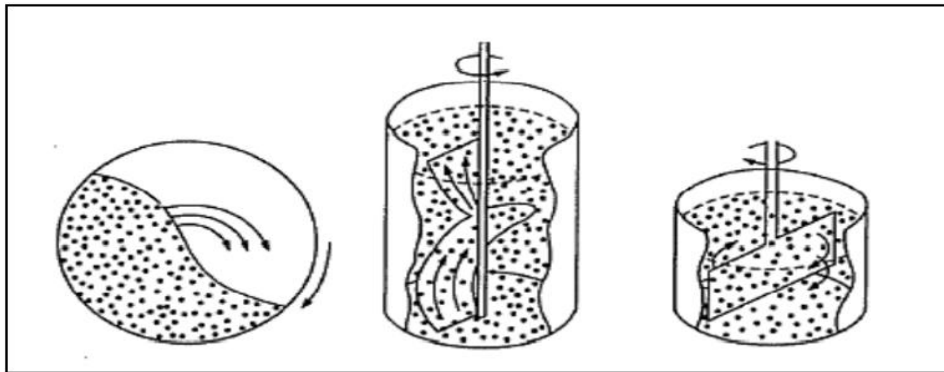
Şekil 2.3 'de değişik öğütme ve karıştırma makineleri gösterilmiştir. Karıştırma işleminde, karıştırıcının doluluk oranı (min. %30-40) da önemlidir [19].



Şekil 2.3. Değişik öğütme ve karıştırma makinaları: (a) Dönen tambur, (b) Dönen çift koni, (c) Vidalı mikser, (d) Bıçaklı mikser [19].

Uygun karıştırma yapılmadığında, tanecikler arasında mekanik kilitlenme meydana gelir. Sinterleme sonrası daha büyük gözenekli yapı oluşur ve mekanik özellikler de kötüleşir. Karıştırma işlemi fazla yapılırsa, yağlayıcının (ergime noktası düşük) ısınarak yapışkan bir hal almasına sebep olur. Az yapılırsa da yağlayıcı kendisinden beklenen özelliği karışıma yansıtamaz [19].

Toz karıştırma mekanizmaları; yayınma, konveksiyon ve kesme olmak üzere üçe ayrılır (Şekil 2.4). Yayınma ile karıştırma dönen silindir içerisinde kesme düzlemleri sayesinde parçacıkların karışmasını sağlamaktadır. Konveksiyon ile karıştırma vidalı karıştırıcı kullanılır. Vida ile alt kısımdaki küçük tozların yukarı taşınımı sağlanır. Kesme ile karıştırma da ise bıçaklı karıştırıcı kullanılmaktadır. Tozlar kayma düzlemlerinden akarak karıştırma işlemi gerçekleştirilir [20].

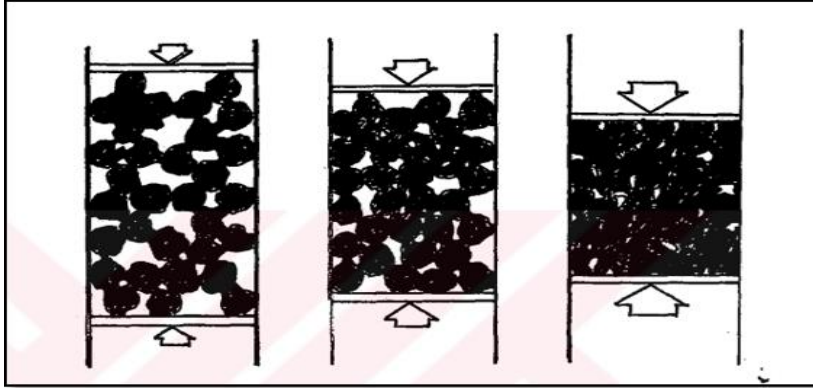


Şekil 2.4. Üç farklı toz karıştırma yönteminin şematik gösterimi
a) yayınma, b) konveksiyon, c) kesme [20].

2.4.2. Presleme işlemi

Tozların en yaygın şekillendirme ve yoğunluk kazandırma yöntemidir. Alt ve üst zımba ile basınç uygulayarak presleme işlemi yapılır. Sıkıştırma sonrası parça elle tutulabilir bir mukavemet kazanır [1].

Presleme başladığı zaman önce parçacıklar birbiri üzerinden kayar. Basınç uygulanmaya devam edildikçe parçacıklar şekil değiştirir ve yapı yoğunlaşır. Bu işlem sonrasında parça dağılmaz ve elle tutulabilir. Ayrıca bu işlemde istenilen gözeneklilik miktarı da verilmektedir [16].



Şekil 2.5. Toz metal sıkıştırma safhalarının basitleştirilmiş görünüşü [14].

Tozların sıkıştırılmasında aşağıdaki şekillendirme yöntemleri kullanılmaktadır [14,22];

- Kalıpta sıkıştırma
- İzostatik sıkıştırma
- Yüksek enerjili sıkıştırma
- Ekstrüzyonla sıkıştırma
- Titreşimle sıkıştırma

1) Kalıpta sıkıştırma: Bu yöntemde 10 MPa (10 tsi) ile 150-200 MPa (tsi) arasındaki basınç değeri toz kütlesine tek veya çift yönlü olarak uygulanır. Uygulanan basınç şekline göre;

- Tek yönlü sıkıştırma: Tek yönlü sıkıştırma yönteminde pres tek yönlü kuvvet uygular. Bu yöntemde, kalıba doldurulan toza üst zımba ile presleme işlemi gerçekleştirilir. Alt zımba ise parçayı yavaş bir şekilde yukarıya doğru ittirerek kalıptan ayırmak için

kullanılır. Toz içerisinde veya toz-kalıp arasında oluşan sürtünmeden dolayı basınç dağılımı düzensiz olur. Bu da parçanın yoğunluğunun homojen dağılmamasına neden olmaktadır. Yoğunluk hareketli zimbaya yakın bölgelerde daha yoğundur.

- Çift yönlü sıkıştırma: Üst ve alt zimba toza eşit basınç uygular. Çift yönlü sıkıştırmada daha homojen bir yoğunluk elde edilir.

2) İzostatik Sıkıştırma: Bu yöntem ile homojen yoğunluk elde edilir. Girintili-çıkıntılı ve boy/çap oranının büyük olduğu parçalar için kullanılmaktadır. İzostatik preslemede esnek kalıp içerisine toz boşaltılır. Daha sonra kalıp, içerisinde bir sıvının (yağ, su vb.) bulunduğu kabın içinde sıkıştırılır. Bu sıvı karışımına korozyon önleyici maddeler de katılır. Genellikle yağlayıcılar kullanılmaz. İşlem sırasında kullanılan sıcaklığa göre soğuk ve sıcak izostatik preslenme şeklinde ikiye ayrılır.

3) Yüksek Enerjili Sıkıştırma (HERF): Parça üzerine kısa sürede, yüksek basınç uygulanması ile yapılan bir yöntemdir.

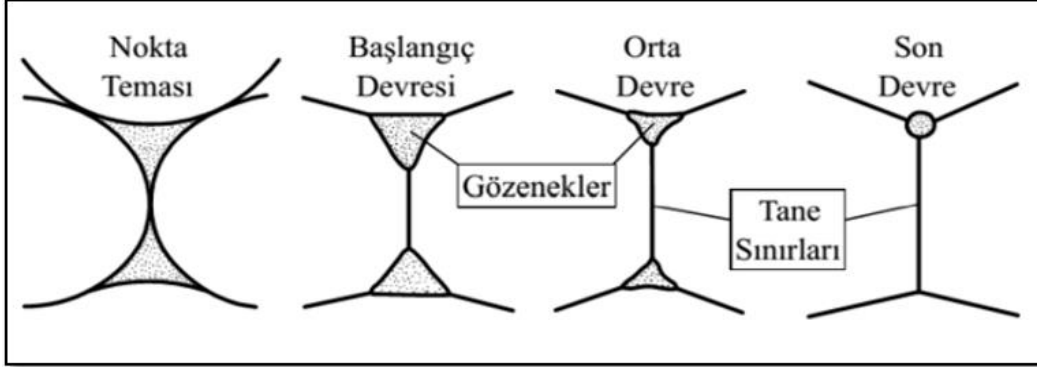
4) Ekstrüzyon Yöntemi ile Sıkıştırma: Kapalı bir kaba tozlar doldurulur. Kabın içindeki hava vakumla alınmalıdır. Daha sonra tozlar ısıtılır ve ekstrüzyon yoluyla parça üretimi gerçekleştirilir. Genelde çubuk şeklinde parçalar üretilir. Bu parçalar yüksek yoğunluklu olur. Hatta tam yoğunluğa ulaşma ihtimali de vardır.

5) Titreşimle Sıkıştırma: Bu yöntemde sert kalıp içerisindeki toza aynı anda basınç ve titreşim uygulanır. Titreşimler sayesinde düşük basınçlarda yüksek yoğunluk elde edilir. Titreşimli sıkıştırma işleminde önemli etkenler frekans ve genliktir. Burada daha az basınç ile yüksek yoğunluklar elde edilmektedir.

2.4.3. Sinterleme işlemi

Sinterleme, parçacıkların birbiriyle ergime sıcaklığının altında, katı halde atom hareketleriyle gerçekleşir. Parça mukavemet kazandırılarak hazır hale getirilir. Üretilecek parçanın gerekli mekanik özelliklerinin kazanımı sinterleme işlemi ile gerçekleştiğinden bu basamak T/M üretimi için kritik rol oynar. Kullanılacak metalin ergime sıcaklığının 2/3 veya 4/5'i sinterleme sıcaklığını vermektedir. Eğer iki bileşenli bir sistem varsa, metallerin

ergime sıcaklıkları arasındaki bir sıcaklıkta sinterleme işlemi yapılmaktadır. Sinterleme süresi, malzeme özelliklerine göre değişir. Sinterleme süresini kısaltmak için sinterleme sıcaklığı artırılmalıdır [14,16,22].



Şekil 2.6. Sinterleme sırasında meydana gelen değişimlerin şematik gösterimi [14].

Sinterleme başlayınca Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi taneciklerin nokta teması halinde oldukları kabul edilerek, sinterleme zamanı ile malzemede; başlangıçta, orta ve son aşamada olmak üzere üç aşamada sinterlemenin gerçekleştiği kabul edilir.

Başlangıç aşamasında temas noktalarında boyun büyümesi oluşur. Bu kademedeki boyun büyüme ve büzülme oranı azdır.

Orta aşamada gözenek yapısı daha düzgün ve partiküllerin daha kolay birleştirilmesini sağlayacak şekilde silindirik bir yapıya sahip olur.

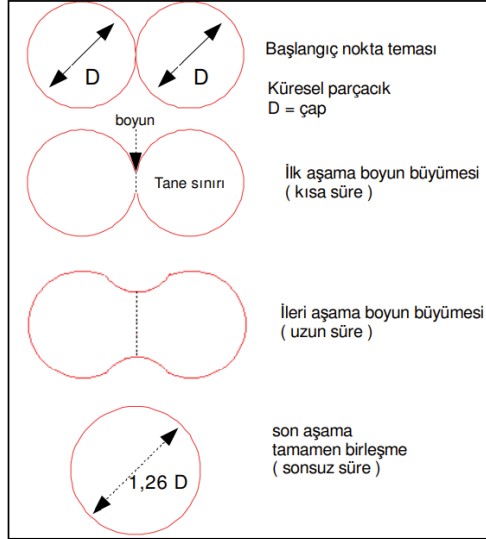
Son aşamada gözenekler küreselleşir ve kapanarak birbirinden bağımsız hale gelirler. Son aşamada %92'yi geçen teorik yoğunluk elde edilir [14,16,22].

Sinterleme prosesi ikiye ayrılır [23]:

- (1) Katı hal sinterlemesi: Metal veya alaşım tozlarının yoğunlaşmasında genellikle gerçekleşen işlemdir. Yoğunlaşma katı halde gerçekleşen atomik difüzyon sayesinde gerçekleşir [23].

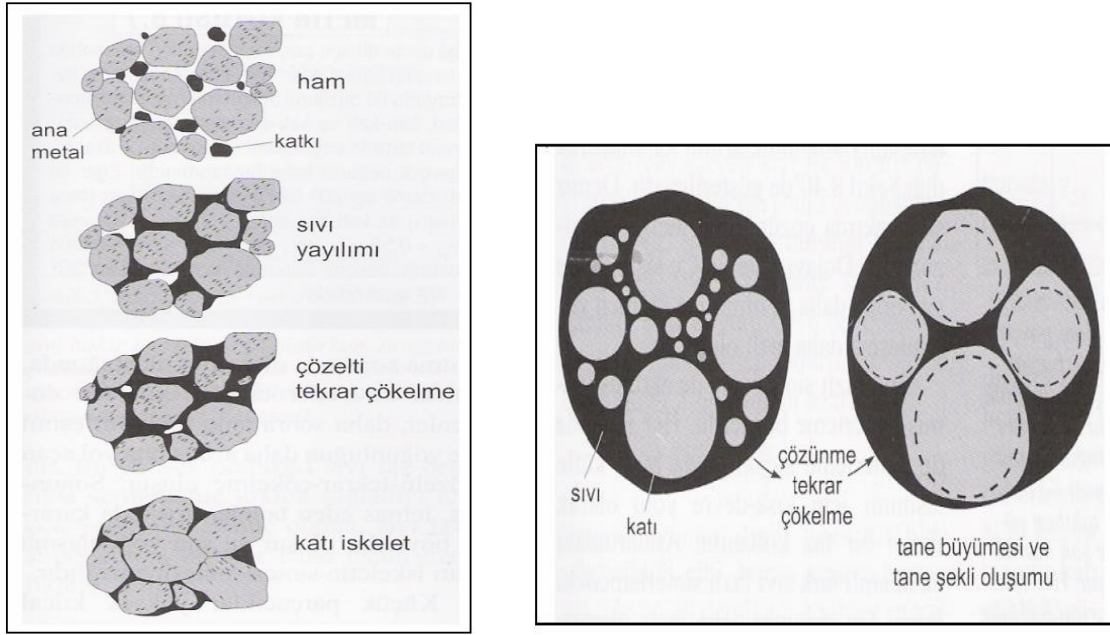
Sinterlemenin ilk aşamasında partiküller arası boyun hızlı bir şekilde gelişir. Yoğunluk artışı olur. Sonra gözeneklerin yapısı daha düzgün hale gelir. Gözeneklerin ortaya çıkması

ise sinterlemenin son safhasıdır. Artık gözenekler küresel ve kapalıdır, tane büyümesi de devam etmektedir [24].



Şekil 2.7. Sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli [24].

(2) Sıvı faz sinterlemesi: Ham T/M parçaların hızlı bir şekilde yoğunlaşmasını sağlamak için kullanılan yaygın bir sinterleme yöntemidir. Bu yöntemde yoğunlaşma malzeme içerisinde oluşturulan %1-10 arasında sıvı faz sayesinde gerçekleşir. Soğuma esnasında sıvı faz tane sınırlarında katılarak tanelerin birleşmesini sağlar [23].



Şekil 2.8. İki toz karışımı kullanarak sıvı faz sinterlenmesinin kavramsal aşamaları [24].

2.5. Toz Metal Parçaların Uygulamaları

İmalat sektöründe demir, çelik ve alaşımları, bakır gibi metal tozlarının kullanımı oldukça geniştir [2].

Toz metal malzemeler günümüzde pek çok malzeme ile başabaş mücadele etmektedir. Uygulama alanları;

1. Talaşlı imalat gerektirmeyen makine parçaları
2. Takım çelikleri
3. Sert metaller
4. Sermetler
5. Kaymalı yataklar
6. Gözenekli metaller
7. Sürtünme elemanları
8. Elektrik ve magnetik malzemeler

Çeşitli yakıt ve patlayıcı sistemlerinde Al, Zr, Mg ve Titanyum gibi yüksek yanma sıcaklıkları olan metallerin tozları kullanılmaktadır.

Demir tozu gıda sanayisinde de kullanılmaktadır. (Gıda zenginleştirici)

Diş dolgu amalgamlarının çoğu bileşimi gümüş esaslı tozlardır.

Çeşitli ferro alaşımlar ve metal tozları kaynak elektrotu örtüsü olarak kullanılmaktadır.

Sert yüzeylerin kaplanması yapılırken, aşınmaya dayanıklı alaşımların tozları kullanılmaktadır [1].

3. TOZ METAL MALZEMELERİN BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Malzemelerdeki ve üretim süreçlerindeki gelişmeler, çeşitli uygulamalar için dövme veya döküm malzemeleri değiştirirken T/M bileşenlerini daha çekici hale getirir. Bunu yaparken zaman zaman T/M parçalarının birbirine veya diğer malzemelerle entegre bileşenler olarak birleştirilmesini gerektirir [25].

T/M parçalardan beklenen önemli birleştirilme koşullardan biri kaynaklanabilirliktir. Sökülemeyen bir birleştirme tekniği olan kaynak en genel tanımıyla; iki veya daha fazla metal alaşımlarının temas yüzeylerinde ısı veya ısı-basınç altında birleştirilmesidir [26].

T/M parçaların kaynaklanabilirliğini birçok fiziksel özellik belirlemekle beraber en önemli özellik bu parçaların gözenekliliğidir. Gözenek miktarı kaynak parametrelerini değiştirebilir. Çünkü; gözenek miktarı ısı transferini de etkiler. Kaynak yapılırken, eriyen metal gözeneklere dolmaya başlar ve gözeneklilik oranını düşürür [1].

Bu nedenle, T/M parçalarının kaynağında yaygın başarı, gözeneklilik, kimyasal bileşim, kirlilik seviyesi ve genel temizliğin, kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölge çatlaması, süneklik ve tokluk, artık gerilmeler ve bozulma gibi kaynak özellikleri üzerindeki etkisinin anlaşılmasını gerektirir [6].

Kaynak yöntemleri, ergitme kaynağı ve ergitmesiz kaynak olmak üzere ikiye ayrılır [25];

Ergitme kaynağı, sadece sıcaklığın etkisi ile ısıtarak, yapılan birleştirme yöntemidir. Uygulanacak kaynağın sıcaklığı birleştirilen malzemenin sıcaklığından daha yüksektir.

Ergitmesiz kaynak, iki veya daha fazla metalik malzemeyi yalnız basınç altında birleştirmektir. Ek kaynak metali yoktur. Ergitmesiz kaynakta metal ergimeden kaynak gerçekleştirilir.

Çizelge 3.1. Kaynak Türleri

Ergitmeli Kaynak Türleri	Ergitmesiz Kaynak Türleri
Oksi-gaz kaynağı yöntemi	Ultrasonik kaynak yöntemi
Elektrik ark kaynağı yöntemi	Difüzyon kaynak yöntemi
Gaz altı kaynak yöntemi	Sürtünme kaynak yöntemi
Toz altı kaynak yöntemi	Patlamalı kaynak yöntemi
Direnç kaynak yöntemi	
Elektron ışıın kaynağı yöntemi	
Lazer kaynağı yöntemi	

Ergitmeli Kaynak Türleri

Oksi-Asetilen Kaynağı; bu yöntemde bir yanıcı bir de yakıcı gazın oluşturduğu kaynak alevi ısı kaynağı olarak kullanılır. En yaygın ve avantajlı olanıdır. Yakıcı gaz olarak genelde oksijen kullanılır. Günümüzde ince kesitli metaller ile boru birleştirmelerde kullanılmaktadır. Ekipmanı ekonomik ve basittir [27].

Elektrik Ark Kaynağı; bu yöntemde metalik elektrot ile iş parçası arasında güç kaynağı kullanılarak elektrik arkı oluşturulur. Akım çeşidi olarak doğru (DC) ya da alternatif (AC) akım kullanılabilir [27].

Gazaltı Kaynağı; kaynak yeri bir gazla korunarak yapılan özel bir ark kaynağıdır. MIG-MAG ve WIG (TIG) başlıca gazaltı kaynak teknikleridir. Genel olarak argon atmosferi altında yapılan MIG (Metal Inert Gas) kaynak tekniği ile koruyucu gaz olarak karbondioksitin kullanıldığı MAG (Metal Active Gas) teknikleri çok yaygın kullanılır. WIG tekniğinde erimeyen Wolfram (Tungsten) elektrot kullanılır. Bu özelliği ile diğer yöntemlerden ayrılmaktadır [27].

Tozaltı kaynağı; bu yöntemde elektrot kaynak yerine otomatik olarak gelir ve ark bu elektrot ile iş parçası arasında oluşur. Yüksek güçlü bir yöntemdir. Akım şiddeti yüksek olduğundan daha büyük bir kaynak banyosu elde edilir ve derin bir nüfuziyet sağlanır. Enerji harcanmasının en çok önlendiği kaynak yöntemidir [28].

Elektrik direnç kaynağı; üst üste bindirilen iki iş parçasından akım geçer ve bu akıma karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten kaynaklı bir ısının meydana gelmesiyle gerçekleşir. Aynı zamanda elektrotlar veya çeneler yardımıyla basınç uygulanır. Genellikle kaynak işleminde ilave hiçbir madde kullanılmaz [27].

Elektron ışın kaynağı; kaynak için gerekli ısı, kaynaklanması gereken yüzeye odaklanmış ve yönlendirilmiş elektron demeti ile sağlanır. İnce ve hassas kaynak işlerinde özel bir uyum gösterir. Roket ve uçak inşası gibi alanlarda kullanılmaktadır. Elektron ışın tabancaları ile elektronları ivmelendirmek için yüksek gerilim oluşmaktadır [28].

Lazer kaynağı; bir dereceye kadar elektron ışın kaynağına benzer. Bu işlem; birleşme ara yüzeyine lazer ışığının odaklanması ile metalin kısa sürede buharlaşma sıcaklığına ulaşması esasına dayanır. İlave metal gerektirmez ve küçük alanda yüksek yoğunlukta enerji biriktirilir [29].

Ergitmesiz Kaynak Yöntemleri

Ultrasonik kaynak yöntemi; kaynak yapılacak iki parçanın yüzeyine ultrasonik frekansta titreşimsel kayma gerilmeleri uygulanır. Titreşim hareketi, teması sağlamak üzere tabakaları kırar ve metalurjik bağ oluşturur. İlave metal, dekapen veya koruyucu gaz kullanılmaz [28].

Difüzyon kaynağı; parçalar vakum ortamında ısıtılır. Sıcaklık kullanılan malzemenin ergime noktasının altındadır. Isıtılan parçaya basınç uygulanır. Ancak plastik deformasyon gerçekleşmemelidir. Daha sonra atomların yayınması ile bir bağ oluşmaktadır [29].

Sürtünme kaynağı; biri dönel simetrik parça olan iki parçanın birleştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Parçanın döndürülmeye başlamasıyla nispeten bir hareket oluşur. Uygulanan basınçtan dolayı da kaymalar meydana gelmektedir. Böylelikle sıcaklık

yükselmesi meydana gelir. Birleşme bölgesi istenilen plastikliğe gelince döndürme işlemi durdurulup, basınç uygulanarak birleşme işlemi gerçekleştirilir [29].

Patlamalı kaynak; çoğu kez iki farklı metalin birleştirilmesinde kullanılır. Genellikle bir metalin diğerinin üzerine kaplanmasında kullanılmaktadır [28].

3.1. Toz Metal Parçaların Kaynağı

Bir metalin kaynak edilebilirliği; kaynak bağlantısının çatlaksız ve istenen özellikleri içerecek şekilde gerçekleştirilebilmesidir.

Kaynak edilebilme metalin kaynak edilme özelliklerinin yanı sıra kaynak şekli ve kalitesine de bağlıdır. Her metal malzemenin kaynak işlemine uygunluğu aynı değildir. Kaynağa elverişlilik diye nitelenen bu teknolojik kavram kaynak işleminde malzeme türüne, malzeme kalınlığına ve uygulanan yöntemin bir arada düşünülmesiyle anlam kazanmaktadır [24].

Toz metal demir malzemelerde yoğunluğu $6,5 \text{ g/cm}^3$ 'den fazla olan malzemeler ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirilirken daha düşük yoğunluklu ($<6,5 \text{ g/cm}^3$) parçalar çoğunlukla ergitmesiz kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilir. Parçacıktan parçacığa olan bağların daha az sayıda olması nedeniyle bu parçaların zayıf kırılma tokluğu, malzemenin büzülen kaynak metali tarafından üretilen gerilmeleri emmesine izin vermez. Bu parçalarda genellikle başarılı olan birleştirme işlemleri difüzyon kaynağı, sinter yapıştırma, yapıştırıcı birleştirme ve sert lehimlemedir.

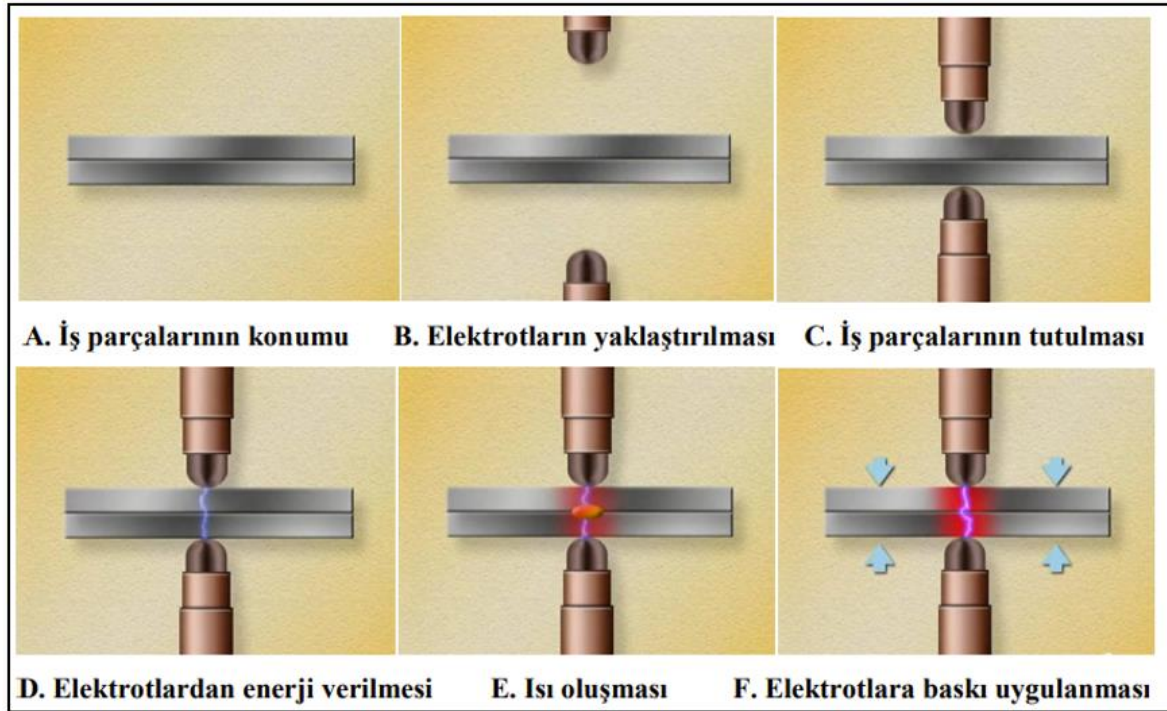
Ara yoğunluk seviyeleri ($<6,9 \text{ g/cm}^3$) geniş bir süreç yelpazesi kullanılarak birleştirilebilir. Ancak direnç projeksiyon kaynağı ve sürtünme kaynağı gibi ergimiş metal hacmini en aza indirgeyenler, en yüksek başarı oranlarına sahiptir.

Daha yüksek yoğunluklar ($> 7,0 \text{ g/cm}^3$) sergileyen parçalar tipik olarak dövme malzemelerle aynı kaynaklanabilirliğe sahiptir ve Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTA), Gaz Metal Ark Kaynağı (GMA), Elektron Işını (EBW) ve Lazer Işını (LBW) kaynağı işlemleri kullanılarak iyi kalitede farklı kaynak bağlantılarını elde etmek mümkündür [7].

3.2. Direnç Projeksiyon Kaynağı

Direnç kaynağı, eski bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem Birleşik Amerika’da 1877 yılında bir rastlantı sonucu bulunmuştur. 1885-1990 yıllarındaki patentleriyle Elihu Thompson, direnç kaynağının yaratıcısı olmuştur. II. Dünya Savaşı’ndan sonra direnç kaynağı yöntemleri gelişerek günümüze kadar gelmiştir [30].

Elektrik direnç kaynağının prensibi, elektrotlar arasında iş parçası konur ve kademeli bir şekilde basınç uygulanır. Böylelikle iş parçasından elektrik akımı geçer. Bu elektrik akımına karşı iş parçası bir direnç oluşturur ve ısı meydana gelir. Dışarıdan başka bir ısı kaynağına gerek yoktur [31].



Şekil 3.1. Direnç kaynağı uygulama aşamaları [32].

Elektrik direnç kaynak yönteminin avantajları; ilave malzeme kullanılmaz bu yüzden hafiflik sağlar. Kaynak mukavemeti yüksektir. Özel kaynak becerisi gerektirmemektedir. Kaynak hızı yüksektir. Günümüzde otomotiv ve uçak endüstrisinde, boru imalatları, ince sacların kaynakları, bağlantı elemanlarının kaynakları vb. alanlarda kullanımı fazladır [33].

Elektrik direnç kaynağı yönteminin çeşitli türleri bulunmaktadır. Bütün direnç kaynağı yöntemlerinde uygun bir akım şiddeti-kaynak zamanı düzenlenmesini gerektirir.

Akımın sürekliliği uygun tarzda şekillendirilmiş elektrotların uyguladığı basınç sayesinde gerçekleşir [33].

Direnç kaynağının diğer kaynak yöntemlerine göre avantajları [34];

- Kaynak hızının yüksek olması
- İlave birleştirme malzemesi gerektirmemesi ve kaynağın kolay kontrol edilebilirliği
- Seri üretime daha uygun olması (tekrarlanabilirlik)
- Maliyetinin düşük olması
- Kaynak bölgesinin ve ısı tesiri altında kalan bölgenin küçük olması
- Malzemenin mekanik özelliklerinin bozulmaması

Direnç kaynağının diğer kaynak yöntemlerine göre dezavantajları;

- Çok fazla kontrol parametresinin bulunması
- Enerji tüketiminin yüksek olması
- Ekipmanların ilk kurulum maliyetinin yüksek olması
- Levhaların arasında bulunan kaynak çekirdeğinin çevresinde oluşan çentiğin etkisinden dolayı oluşan düşük gerilme ve yorulma dayanımı

Direnç kaynağı yöntemlerinin sınıflandırılması aşağıdaki gibidir:

1. Nokta kaynağı: a) Normal nokta kaynağı

b) Kabartılı nokta kaynağı

2. Dikiş kaynağı: a) Sürekli dikiş kaynağı

b) Aralıklı dikiş kaynağı

3. Alın direnç kaynağı: a) Basıncılı alın kaynağı

b) Yakma alın kaynağı

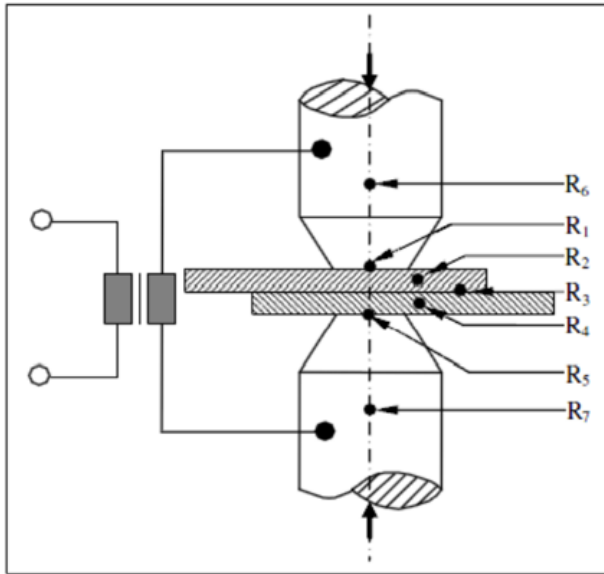
3.2.1. Nokta direnç kaynağı

Nokta direnç kaynağı, en çok kullanılan direnç kaynağı türüdür. Genel olarak direnç kaynağı yöntemleri birbirine çok benzer. Sadece yöntemlerde kullanılan elektrot uçları farklıdır. Nokta direnç kaynağında silindirik gövdeli iki elektrot kullanılmaktadır. Kaynak için gerekli akım transformatörden sağlanır. Gerekli basınç hidrolik, pnömatik veya mekanik donanımlar ile gerçekleştirilir [35].

Üretilen ısı miktarı üç faktöre bağlıdır; amper, iletkenin direnci ve akımın süresi. Bu üç faktör, formülde ifade edildiği gibi üretilen ısıyı etkiler.

$$Q = I^2 R t$$

Burada Q üretilen ısıdır (J), I akımdır (A), R iletkenin direncidir (Ω) ve t akımın (s) süresidir [36].



Şekil 3.2. Nokta direnç kaynağının prensibi [35].

Nokta direnç kaynağında ısı girdisi yukarıdaki formülden yararlanılarak ($Q = I^2 R t$) hesaplanır.

Sekonder devredeki toplam direnç;

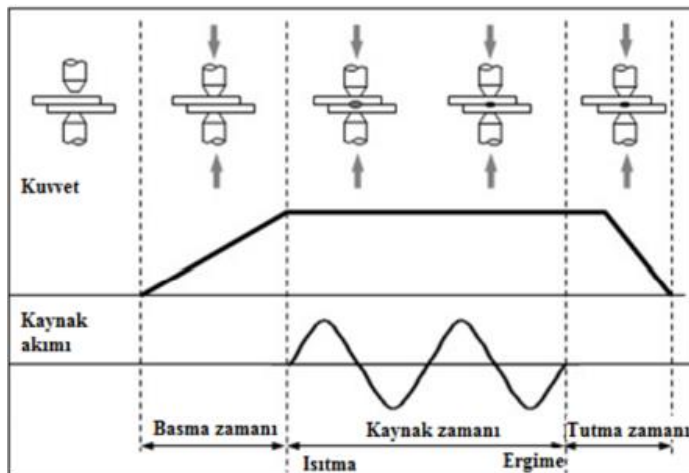
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \text{ 'dir.}$$

Burada elektrotların direnci (R_6 , R_7) ve iş parçalarının dirençleri (R_2 , R_4) malzeme dirençlerini oluşturmaktadır. Elektrot-malzeme temas direnci (R_1 , R_5) ve malzeme-malzeme temas direnci (R_3) de temas dirençlerini oluşturmaktadır.

Malzeme direnci, malzemenin fiziksel özelliklerinden kaynaklanır ve değişken değildir. Temas dirençleri ise, malzemenin ve elektrotların uç durumlarına bağlı olarak değişir. R_3 kaynak sırasında en büyük ısının gerçekleşeceği dirençtir. Diğer dirençlerdeki ısınmalar mümkün olduğunca minimumda tutulmalıdır. Kaynak akımının (I_k), kaynak süresinin (t_k) ve elektrot kuvvetinin (F) doğru bir şekilde seçilmesiyle bu gerekçe sağlanır. Bağlantı kalitesini temas dirençleri etkiler. R_3 'deki sıcaklık malzemenin ergime sıcaklığının üzerine çıkarılırsa malzeme sıvılaşır ve kaynak çekirdeğini oluşturur. Yüzeylerdeki iyi ısı iletmeyen tabakaların (pas, yağ ve boya gibi) olmaması gerekir [35].

Direnç nokta kaynağı (RSW), otomobiller, kamyon römorkları, otobüsler, eğlence araçları, ofis mobilyaları ve aletleri, demiryolu araçları, uçak yapıları, havacılık ve uzay uygulamaları ve diğer birçok ürünün imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır [37]. 3 mm kalınlığa kadar olan sac levhaların birleştirilmesinde direnç kaynağı kullanılmaktadır [35].

Nokta direnç kaynağı genel olarak dört periyotta meydana gelir. Tipik bir nokta direnç kaynağı çevrimi Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Tipik nokta kaynağının çevrimi [35].

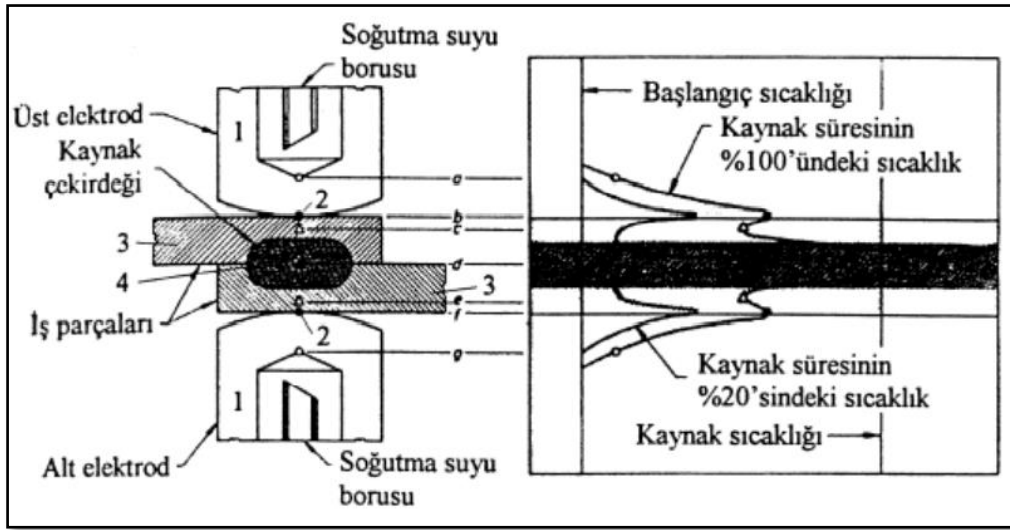
- Basma süresi: Elektrot kuvvetinin ilk uygulandığı an ile kaynak akımının verildiği ilk an arasında geçen süredir.
- Kaynak süresi: Kaynak akımının geçtiği zaman aralığıdır.
- Tutma süresi: Kaynak akımının kesilmesinden sonra elektrot kuvvetinin etkisinin devam ettiği süredir.
- Ölü süre: Elektrotların iş parçası ile temasta olmadığı zaman aralığıdır [35]. Çevrim otomatik olduğu zaman elektrotların geri çekildiği ve iş parçasının kaldırıldığı süredir [38].

Elektrik direnç nokta kaynağı çelik, paslanmaz çelik, nikel gibi birçok malzemenin birleştirilmesinde kullanılan yöntemlerdendir. Kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot kuvveti mekanik özellikleri etkileyen önemli parametrelerdir [39].

3.3. Nokta Direnç Kaynağı Sırasında Sıcaklık Dağılımı ve Çekirdeğinin Oluşumu

Bir seri direnç olan kaynak makinasının sekonder devresi akımı etkilemektedir. Amper cinsinden akım şiddeti devrenin bütün noktalarında, o noktalardaki direnç ne olursa olsun, aynı kalmalıdır. Bu dirençlerin toplamı elektrik akım şiddetini verir. Herhangi bir noktada üretilen ısı ve direnç doğru orantılıdır.

Şekil 3.4'te iki levhanın tek nokta ile kaynağında seri olarak yer olan direnç noktaları gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Direnç nokta kaynağında bölgeler, dirençler ve sıcaklık dağılımı [40].

Bu dirençler;

1. Elektrot direnci,
2. Elektrot-levha arası temas direnci,
3. Levha direnci
4. Levhalar arası temas direncidir.
 - a) Üst elektrotun direnci
 - b) Üst elektrot ile üst levha arasındaki temas (kontakt) direnci
 - c) Üst levhanın direnci
 - d) Üst levha ile alt levha arasındaki temas direnci
 - e) Alt levhanın direnci
 - f) Alt levha ile alt elektrot arasındaki temas direnci
 - g) Alt elektrotun direnci

Isının tamamı birleşme yeri olan özel bir noktada meydana gelmez. Isı yukarıdaki şekilde gösterilen yedi bölgenin her birinden, bu bölgenin dirençleri ile orantılı olarak üretilmektedir. Kaynak ısısının yalnız 4 (d) nolu düzlemde olması istenir. Diğer bütün noktalarda oluşan ısıyı mümkün olduğu kadar azaltmak gerekir. Kaynağın başlangıcında bütün noktalardaki sıcaklık, başlangıç sıcaklığı adı verilen düşey çizgiyle belirtilmiştir. En büyük direnç 4 düzleminde ve bu yüzden bu bölgede ısı çok daha hızlı oluşur. Bundan sonra gelen büyük dirençler 2 (b) ve 6 (f) bölgelerindeki dirençlerdir. Buna paralel olarak 2 ve 6 bölgelerinde ısı hızla artar. Ancak 4 düzlemindeki kadar değildir. Kaynak için gerekli

toplam zamanın küçük bir kesrinden sonra, sıcaklık gradyanı soldaki eğri ile temsil edilebilir. (%20'ye karşılık gelen eğri) Kaynak süresinin %100' ündeki sıcaklık çizgisi maksimum ısıyı görmektedir. Bu nedenle 2 ve 6 düzlemlerindeki ısı bu düzlemlere temas eden 1 (a) ve 7 (g) düzlemindeki elektrotlara doğru hızla iletir. 4 düzleminde oluşan ısının artma hızı diğer bölgelerden her zaman yüksektir. İyi bir şekilde kontrol edilen kaynak işleminde, kaynak sıcaklığına önce 4 (d) düzlemindeki küçük noktalarda erişilecek ve zamanla kaynak dikişi oluşturacak şekilde büyüyecektir [40].

3.4. Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

Teorik olarak ITAB olarak adlandırılan bölge ortam sıcaklığının üstünde kalan bölgeyi tanımlamakla birlikte genel anlamda kaynak ısısından etkilendiği ölçülebilen bölgeyi açıklamak adına kullanılmaktadır.

Genel anlamda nokta direnç kaynağında ITAB 3 ana bölgeye ayrılmıştır. Birincisi *süper kritik bölge* olarak adlandırılır. Bu bölge kaynak çekirdeğine bitişik olan bölgedir ve tane irileşmesinin görüldüğü kısımdır. İkinci kısım ise *orta bölge*dir. Bu alandaki sıcaklık süper kritik bölgenin sıcaklığından daha düşük değerdedir. Bu kısımda kısmi dönüşüm gözlenmektedir. Üçüncü bölge *alt kritik bölge*dir. Bu kısımda ısının etkisi görülmemektedir. Eğer ısı etkisi altındaki bölge üzerinde sıcaklık dağılımı ve soğuma hızı bilinirse kaynak çekirdeğin soğuma sonrasındaki içyapısı belirlenebilir [33].

3.5. Isı Kaybı

Isı kaybı kaynağın her aşamasında değişen hızlarla devam etmektedir. Akımın uygulama sırasındaki ısı kaybı ve akımın kesilmesinden sonraki ısı kaybı olmak üzere 2 aşamada incelenmelidir.

Birinci aşamadaki ısı kaybının miktarı şunlara bağlıdır:

- Metalin bileşimi
- Parçaların kütlesi
- Kaynak süresi
- Dış soğutma aracı

Bu faktörlerden iş parçasının bileşimi ve kütlesi kontrol edilememektedir. Fakat dış soğutma aracı kontrol edilebilmektedir. Bir akım uygulandığında üretilen ısı, elektrik iletkenliği ile ters orantılı olacak şekilde değişmektedir. Isıl iletkenlik, ısıнын kaynak alanından kaybını belirleyen bir faktördür. Belirtilen bu iki faktör metal malzemelerde aynı yönde paralel olarak görülür.

Elektrotların etkin bir şekilde soğutulması (suyla) ısı kaybını hızlandırmaktadır. Kaynak alanından iş parçalarına doğru olan soğuma hızını azaltmak için kaynak zamanı uzun tutulmalıdır. Bu uygulama, çevre metale daha fazla ısı iletimine izin verir [33].

Sıcaklık farkı oldukça önemlidir. Genellikle kalın levhalarda uzun kaynak zamanı kullanıldığı için soğuma hızı düşük, ince levhalarda kısa kaynak zamanı kullanıldığı için soğuma hızı yüksektir [40].

Kaynak yerinden elektrotlar hızlı bir şekilde çekilirse ısı metale ve atmosfere geçecektir. Buda soğuma hızını azaltacaktır. İnce parçalarda distorsiyonlardan dolayı bu sakıncalı olabilir. Kalın parçalarda, kaynak bölgesi daha büyüktür. Bu yüzden daha fazla zaman gereklidir [40].

3.6. Kaynak Değişkenleri

Kaynak işlemi sırasında değişkenler arasında en iyi uyumun sağlanması gerekir. Böylece iyi bir kaynak elde edilmiş olur. Uygun bir şekilde ayarlanan akım şiddeti ve zamanla istenilen kaynak çekirdeği çapı elde edilir.

Direnç nokta kaynağında, sağlam bir kaynak yapmak isteniyorsa kaynak değişkenleri her zaman parçaların ince kalınlıkta olanına göre ayarlanmalıdır [31].

Kaynak ısısını ve kalitesini etkileyen kaynak değişkenleri aşağıda verilmektedir [41];

- a. Elektrot bileşiminin- elektrot şeklinin etkisi
- b. Kaynak akımının etkisi
- c. Kaynak süresinin etkisi
- d. Elektrot baskı kuvvetinin etkisi
- e. İş parçasının malzeme türü

- f. Kaynak edilecek parçaların yüzey durumunun etkisi
- g. Elektrot ve iş parçasının temas durumları
- h. Esas metalin gördüğü ısı ve mekanik işlemler

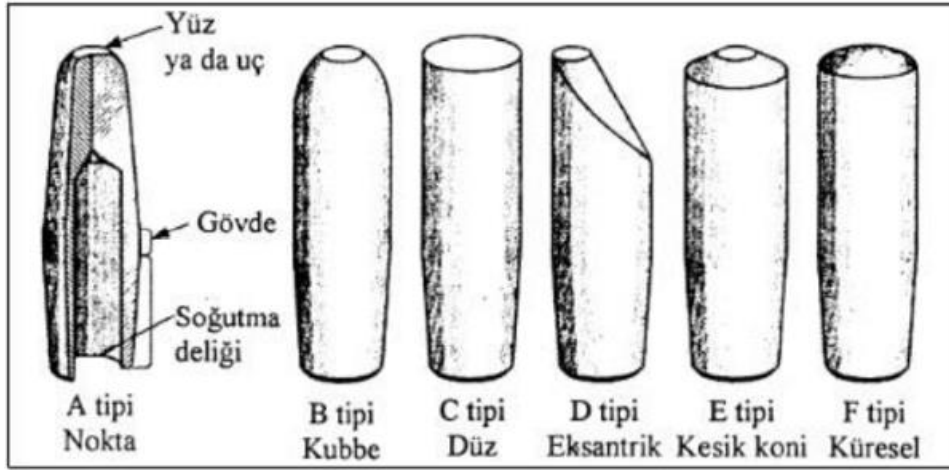
3.6.1. Elektrot bileşimi ve şeklinin etkisi

İlk olarak kullanılan elektrotlar saf bakırdan imal edilmiştir. Fakat sahip oldukları mekanik özellikler sebebiyle daha sonra çeşitli bakır alaşımlı elektrotlar kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan alaşımın sertliğinin yükselmesi genel anlamda elektrotun ısı ve elektriksel direncini yükseltir. Ayrıca yapılacak kaynak işlemine göre uygun geometriye sahip elektrotlar tercih edilmektedir [33].

Çizelge 3.2. Direnç kaynağında kullanılan başlıca elektrot alaşımları [35].

Alaşım	Brinell Sertlik (kg/mm ²)	İletken Metal (% saf Cu)	Yumuşama Sıcaklığı (°C)	Kullanıldığı Yer
Bakır (soğuk çekilmiş)	95	90	150	Alüminyum
Tellür-Bakır	100	90	175	Alüminyum
Kadmiyum-Bakır	110	85	250	İnce yumuşak çelik sac
Krom- Bakır	150	80	500	Tüm çelikler
Tungsten-Bakır	200-300	30	1000	Çelik ve bakır alaşımları

Herhangi bir uygulama için alaşım seçiminde, alaşımın ısı ve elektriksel özelliklerine bakılmalıdır. Elektrotların elektrik iletkenliğinin yüksek, temas direncinin düşük tutulması ile elektrotun ısınması minimumda tutulabilir. Elektrotlar ayrıca, mukavemetli olmalıdır [35].



Şekil 3.5. Standart elektrot uç şekilleri [34].

Kaynak yapılacak iş parçalarının şekil ve boyutlarına göre elektrotlar belirlenir. En çok kesik koni uçlu ve küresel uçlu olan elektrotlar kullanılır [31].

3.6.2. Kaynak akım şiddetinin etkisi

Isı formülündeki akım karesel bir değerdir. Ve bu sebeple, ısı üretiminde büyük bir etkiye sahiptir. Kaynak akım şiddeti; malzemenin çekme-makaslama dayanımı, çekirdek çapı oluşumu ve elektrot dalma derinliğini önemli derecede etkilemektedir [35].

$$Q = K I^2 R T$$

Burada Q üretilen ısıdır (J), I akımdır (A), R iletken direncidir (Ω), t akımın (s) süresidir ve K bir sabittir (İşlem sonucunun birimini (joule) kaloriye dönüştürmek için kullanılır. k = 0,24)

İletilen akımın şiddetindeki değişimlere ilaveten, kaynak ara yüzeyinde de akım yoğunluğunda değişimler olabilir. Bu yüzden dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. Kaynak sırasında, akımın bir önceki kaynak noktasından ve elektrotların etkilemediği metalik temas noktalarından kısa devre olması ile meydana gelir. Boyutları büyümüş elektrotlar akım yoğunluğundaki azalma nedeniyle kaynak ıssında ve kaynak özelliklerinde azalmaya sebep olur [31]. Aşırı miktardaki akım kaynakta fişkırmaya sebep olur ve kaynağın mukavemetini düşürür.

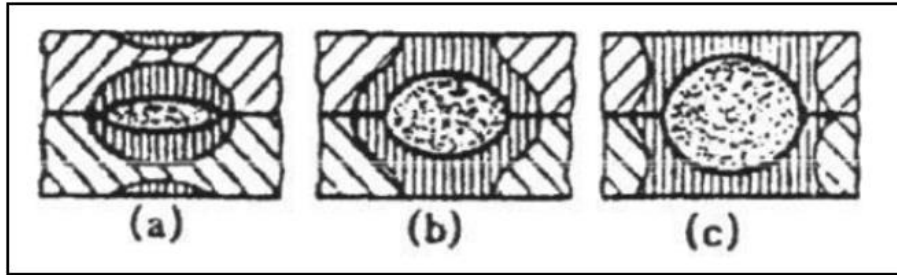
3.6.3. Kaynak zamanının etkisi

Isı üretim hızı öyle olmalıdır ki kaynak istenilen zaman diliminde ısı kayıplarını da karşılayarak gerçekleşebilsin. Isı formülünden de anlaşılacağı gibi üretilen toplam ısı ile zaman doğrusal bir şekilde değişir. Zaman arttıkça ısı kayıpları da artacaktır. Kaynak süresi çok kısa olursa birleşme gerçekleşmeyebilir, kaynak çekirdeğinin çapı çok küçük kalabilir. Kaynak süresi uzun olursa iş parçası buharlaşma sıcaklığına erişecektir. Sonuçta dikişten küçük parçacıkların fişkırması ile gaz kabarcıkları oluşacaktır.

Kaynak akım şiddeti ve basınç arttırılarak kaynak süresinde azalma sağlanabilir. Yüksek akımdan kaynaklı fişkırma önlemek için basıncı düşürmek gerekir. Kısa süreli kaynak ve yüksek akım şiddeti ile uzun süreli kaynak ve düşük akım şiddeti kullanarak aynı nokta çapını elde etmek mümkündür [35].

Kısa süreli kaynak tekniğinin büyük faydaları olduğu için çok gelişmiştir. Bu yüzden büyük ölçüde kullanılmaktadır [31].

Kaynak çekirdeğinin oluşumunda sürenin etkisi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Kaynak süresinin çekirdek oluşumuna etkisi

a) Kısa kaynak zamanı b) Orta kaynak zamanı c) Uzun kaynak zamanı [33].

3.6.4. Kaynak elektrot baskı kuvvetinin etkisi

Kaynak yapılacak iş parçaları kaynak bölgesinde basınç altında bir arada tutulur. Basıncın miktarı akım miktarını da etkiler. Elektrot kuvveti, kaynak işleminin basma, kaynak ve dövme safhalarında önemli bir rol oynamaktadır. Basma safhasında, elektrot kuvveti, levhalar arasındaki temas direncinin uygun bir değerde tutar. Kaynak safhasında, elektrot kuvveti, fişkırma yapan sıvı metali basınç ile katı metal çukuru içinde tutarak

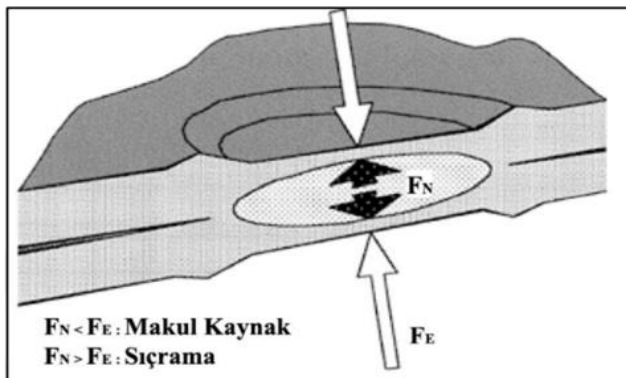
fıskırmayı engellemektedir. Dövme safhasında ise, kaynak dikişi katılaşırken büzülme olabilir. Büzülme nedeniyle oluşabilecek boşluk, çatlak vb. kusurların oluşumunu önlemek burada dövme yoluyla mümkündür [30,31].

Diğer bütün değişkenler sabit iken, basınç arttırıldığında akım da artar ve basınç azaldığında akım da azalır. Bununla beraber üretilen toplam ısı üzerindeki etki değişebilir. Basınç arttırıldığında temas direnci azalır. Bu direnç azalmasını dengelemek için daha fazla akım uygulanmalıdır. Ayrıca elektrot kuvveti çok yüksek olursa, levhalarda istenmeyen distorsiyonlar ortaya çıkarır [30,31].

Çizelge 3.3.Malzeme ve levha kalınlığına göre elektrot kuvveti [30,31].

Malzeme	P
Alaşımsız çelikler için	2xS
Yüksek alaşımlı çelikler için	3,5xS
Alüminyum için	2,5xS
P (KN): Elektron kuvveti S (mm): Levha kalınlığı	

Elektrot kuvvetinin bir kısmı da ergimiş metalin sıvı basıncının dengelenmesi için kullanılır. Basınç dengelenemezse sıçrama meydana gelir [42].



Şekil 3.7. Elektrot kuvveti ve kaynak basıncının sebep olduğu kuvvet arasındaki denge.

FN: kaynak metali sıvı basıncı kuvveti, FE: elektrot kuvveti [42].

3.6.5. Esas metalin kimyasal bileşimi

Metallerin bileşimi, onların birçok mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bir metalin özgül elektrik direnci, ısı formülündeki R değerinin şiddetini ve verilen akım için sıcaklığı da etkiler. Elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliği yüksek olan bakır, gümüş gibi metallerde akım yoğunluğu yüksek olsa da çok az ısı meydana gelir. Bu metallerin ısı iletkenliği de yüksektir. Bu yüzden üretilen ısı az miktarda olsa iş parçasına doğru hızlı bir şekilde iletilir. Buda erime için gerekli ısı birikimini engeller ve kaynak yapmayı zorlaştırır [30,35].

Metal malzemeye ait olan özgül elektrik direnci Joule kanunundaki direnç değerini etkilediğinden dolayı oluşacak ısı miktarını da direkt olarak etkilemektedir. Genel anlamda malzemenin bileşimi kaynak işlemi için gerekli olan ısı değerini etkilemektedir [33].

3.6.6. Kaynak edilecek parçaların yüzeylerinin etkisi

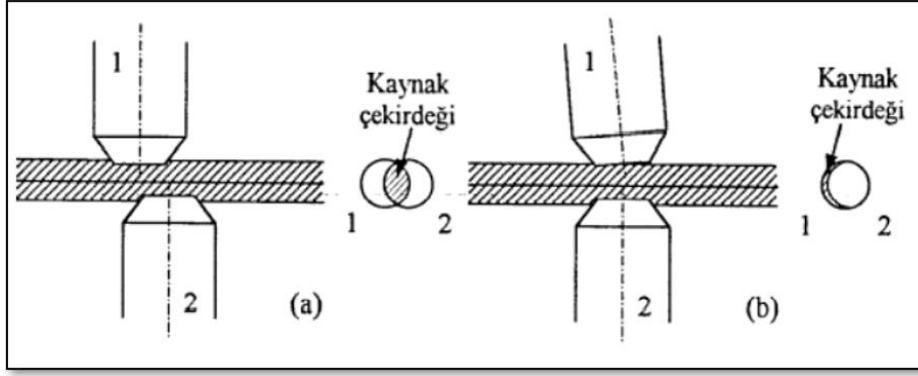
Kaynak yapılacak iş parçasının yüzey durumu ısı üretimini engelleyebilir. İş parçasının yüzeyi düzgün ve temiz olursa uniform sonuçlar elde edilir [35].

Yüzeyi üzerinde oksit veya pul bulunduran herhangi bir malzeme önceden bilinmeyen sonuçlar oluşturabilir. Ayrıca pullar elektrotların yüzeylerine yerleşerek elektrotun bozulmasını çabuklaştırır [30].

3.6.7. Elektrot ve iş parçasının temas durumları

Elektrotlar birbirlerine paralel olmalı ve iş parçasında kaynağın yapılacağı bölgeye dik olmalıdır. Eğer iyi bir kaynak yapılmak isteniyorsa bu şart yeterli değildir. Ayrıca birbirine paralel olan elektrotların aynı ekseninde de olması gerekmektedir.

Şekil 3.8.(a)'da görülen kaynak bölgesi, olması gereken alanın yaklaşık olarak üçte biridir ve bu da uygulanacak basıncın üç katına çıkmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.8.(b)'de ise elektrotlar birbirine paralel değildir.



Şekil 3.8. Elektrotların temas durumuna göre oluşan kaynak çekirdekleri [41].

Anlatılan bu durumların yanı sıra bindirme şekli ve kenar mesafeleri de kaynak kalitesini etkilemektedir. Nokta kaynağının düzgün yapılabilmesi için kaynağın kenara uzaklığı çekirdek çapının yarısı kadar olmalıdır [41].

3.7. Kaynak Kalitesi ve Kaynak Kalitesine Etki Eden Dış Faktörler

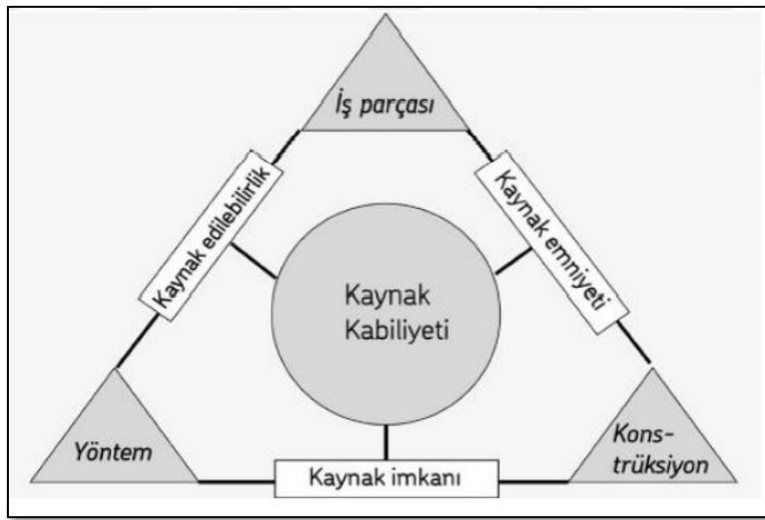
Seri imalatla kaynak kalitesi belirtilen değerler dışında da sürekli değişim göstermektedir. Bu değişimin çeşitli sebepleri vardır. Başlıca etkileri şu şekilde sıralanabilir [43];

- Manuel yani operatöre bağlı çalışan tabancalardaki punta kaynak noktasının açılı veya parça kenarına atılması,
- Otomatik hatlardaki robot punta noktasında oluşan eksen ve nokta kaçıklıkları,
- Parça üzerindeki kaplama (galvaniz) ve malzeme kalınlıklarının değişmesi,
- Malzemenin kirli, pis veya tozlu olması,
- Parça konumlama fiksörlerinde oluşan boyutsal hatalar,
- Parçanın boyutsal hataları, özellikle kenar uzunluklarındaki boyutsal hatalar (punta için kritiktir),
- Elektrot yüzeylerindeki genişleme ve gerekli frekanslarda elektrotların tıraşlanmaması (kalemıraş bıçakları ile)

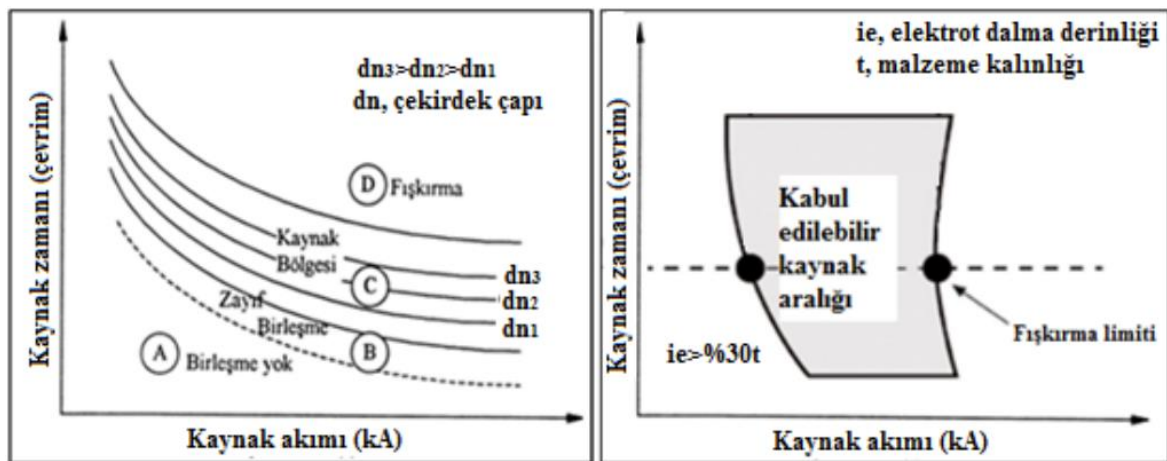
3.8. Kaynak Kabiliyeti ve Diyagramı

Nokta direnç kaynağının en önemli parametreleri, elektrot kuvveti, kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanıdır. Elektrot kuvvetinin değiştirilmesi oldukça zor olduğundan ve aynı zamanda elektrotlar mantarlaştığından, genellikle sabit bir elektrot kuvveti seçilir. Sabit

elektrot kuvvetinde ve geniş aralıkta değişen kaynak parametrelerinde kabul edilebilir birleştirmeleri gösteren grafiksel açıklamaya ‘kaynak kabiliyeti diyagramı’ adı verilir. Belirli bir levha malzemesi için elektrot uç çapı, kaynak çekirdek çapı, elektrot dalma derinliği ve elektrot kuvvetine bağlı olarak nokta direnç kaynaklı bağlantının dayanımı için bir kaynak kabiliyeti diyagramı (akım-zaman) elde etmek mümkündür. Kabul edilebilir özelliklere sahip çekirdek çapı ancak kaynak zamanının akım şiddetine bağlı değişimi ile elde edilebilir. Diyagramın genişliği, üreticilere uygun kaynak aralığı seçimi için toleranslar sunar.



Şekil 3.9. Kaynak kabiliyetinin temel faktörler ve özelliklerle ilişkisi [44].



Şekil 3.10. Kaynak kabiliyeti diyagramı [35].

Şekil 3.6’da nokta direnç kaynağı sonrası meydana gelen kaynak çekirdek çapı (nokta çapı) “dn” ile gösterilmiştir. Yukarıdaki diyagram A, B, C ve D olmak üzere dörde

ayrılmaktadır. A bölgesinde ergime ve birleşme yoktur. B bölgesinde zayıf bir birleşme basınç kaynağı ile oluşur. Ancak B bölgesinde de ergime yoktur. C bölgesi ergime veya kaynak bölgesidir. Ergime C ve B bölgesinin sınır eğrisinden itibaren başlar ve ergimiş kaynak bölgesinin boyutları, bu bölge içine girdikçe artar. C bölgesi malzemenin cinsine bağlı olduğundan bazı metallerde (bu bölge dar olduğu için) kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanının dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekir. Uygulamada, C bölgesinin üst sınırına yakın olan akım ve zaman değerleri seçilmelidir. D bölgesi fişkırmalı bölgedir ve C bölgesinin üst sınırından itibaren fişkırmalı başlar. Şekil 3.10'da gösterilen kabul edilebilir kaynak aralığı diyagramının sol tarafı, akım şiddeti ve kaynak zamanı değişimine bağlı elektrot dalma derinliğinin; kullanılan malzeme kalınlığının %30'unu geçmeyecek şekilde seçilmesi ile ölçülmektedir. Bu değerlerin üzerinde fişkirmalar meydana gelebilmektedir. Elektrot dalma derinliğinin kesit kalınlığının %30'u altına inmesi durumunda nokta kaynağı istenilen dayanım özelliğini sağlayamayabilir. Aynı zamanda yine bu değerlerin aşılması durumunda kaynak kesit kalınlığında aşırı incelme meydana geleceği için kullanılacak yüzey kalitesini etkilemekte ve boyama işleminde o bölgedeki yüzey kalitesini bozmaktadır. Diyagramın sağ tarafı ise maksimum çekme-makaslama dayanımı değerlerini veren veya hataları minimuma indirme amacı ile %80 çekme-makaslama dayanımı veren değerler belirlenerek oluşturulabilir [35].

Metallerin nokta direnç kaynak kabiliyeti metalin ısı iletkenlik kat sayısına, metalin ısı direncine ve metalin ergime sıcaklığına bağlıdır [40].

Malzemelerin nokta direnç kaynak kabiliyetleri artırılırsa kaynak hataları azalır ve kaynak kalitesi yükselir.

Çelikler bir yere kadar kaynak edilebilir, demir dışı metallere de kaynak yapmak zorlaşmaktadır. Kaynak kabiliyeti faktörü aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır;

$$S = \frac{\kappa_t}{T_{em} \times K_t} \times 100 \quad (3.1.)$$

S: Kaynak kabiliyeti

κ_t : Isı iletkenliği

T_{em} : Metalin ergime sıcaklığı

K_t : Isı iletme katsayısı

Formüle göre elde edilen kaynak kabiliyeti faktörü sonuçlarının değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir [45].

Kaynak kabiliyeti faktörü	Kaynak kabiliyetinin durumu
0,25'e kadar	Kötü
0,25-0,75 arası	Yeterli
0,75-2,0 arası	İyi
2,0'den yukarı	Çok iyi

Kaynak kabiliyeti faktörü (S) arttıkça kaynak kabiliyeti de yükselmektedir.

Nokta direnç kaynağı, birleştirilen malzemeler yönünden diğerlerine göre daha serbesttir. Nokta direnç kaynağı yöntemiyle birçok metal ve metal çiftlerini hatta kaplamalı malzemeleri de değişik biçim ve boyutlarda birleştirmek mümkündür.

3.9. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Makinaları

Elektrik direnç nokta kaynağı makinelerini uyguladığı nokta sayısına göre ikiye ayrılmaktadır [46].

3.9.1. Çoklu nokta kaynak makinaları

Bu kaynak makinasında, parçaya uygulanacak bütün kaynak noktalarının aynı anda ve bir defada gerçekleştirildiği bir yöntemdir. Çoğunlukla otomobil üretmek için kullanılır. Bu, punta kaynak robotlarıyla birkaç saniye içinde yapılır.

3.9.2. Tekli nokta kaynak makineleri

Genel olarak iki tip tekli nokta kaynak makinesi vardır:

Uzun kollu kaynak makineleri: Bu makineler basit ve genel olarak en çok kullanılan türlerdir. Kolların uçlarında birer elektrot bulunur. Üst kol hareketlidir ve pedala basılınca alt kola yaklaşır. Kollar yardımı ile diğer kaynak makinelerinde kaynatılması mümkün olmayan işlerin kaynaklı birleştirilmesi yapılır.

Pres türü kaynak makineleri: Bu yöntemde elektrot hareketli olan başlık ile doğrusal bir hareket yapar. Özellikle kalınlıkları fazla olan levhalar kaynatılmasında kullanılır.

3.10. Nokta Direnç Kaynağının Kaynak Hataları

Sürekli ve yüksek kaliteli nokta kaynaklarının elde edilmesi tabakaların yüzey durumunun, teçhizatın elektrik-mekanik ilişkisinin, elektrot bakımının, kaynak programı seçiminin sağlam bir şekilde kontrolüne bağlıdır. Bu kontrolleri yaparken oluşabilecek kaynak hatalarının türleri ve sebepleri iyi bilinmelidir [47].

ERW (Electric Rezistans Welding) 'nin kaynak kusurları plaka yüzeyine diktir ve bir kaynak sürecinde yığmadan kaynaklanan düzlemsel şekillere sahiptir. Bu kusurların EDK boru hatlarının saha testlerinde zaman zaman patlama kazasına neden olduğu bildirilmektedir. Bununla birlikte, elektrik direnç kaynağındaki kaynak kusurlarının nedeni ile ilgili olarak çok az araştırma bildirilmiştir; kusurlar, şerit kenarlarının yüzeyinde oluşan ve aralarında sıkılmadan kalan bazı oksitler olarak tanımlanmıştır [48].

Direnç kaynağı, özellikle yeni başlayanlar için şaşırtıcı derecede zor bir süreç olabilir. Direnç kaynakları yanlış yapıldığında, üreticilerin dikkat etmesi gereken birkaç farklı kusura yol açabilir. Bu kusurlar;

Sıçrama

Direnç kaynağında sıçrama kusurlu bir kaynağın işaretidir. Sıçrama genellikle kaynağı oluşturmak için çok güçlü bir akımın kullanılmasından kaynaklanır. Kaynak bölgesindeki malzeme kaybı, bitmiş ürünün genel mukavemetini zayıflatabilir [47].

Sıçramanın sebepleri ve alınması gereken önlemler şunlardır [49];

1- Elektrot ucunun yanlış hizalanması

- Uçları malzeme üzerinde hizalanacak ve düz olacak şekilde giydirilmeli

2- Aşırı kaynak basıncı

- Elektrot basıncını azaltın.

3- Çıkış amperi çok yüksek

- Varsa, amper ayarı azaltılmalı (hava soğutmalı modellerde mevcut değildir).

- 4- Kaynak süresi çok uzun
- Kaynak süresini azaltılmalı

Girintili yüzeyler

Uygun nokta kaynakları oluşturmak, birleştirilecek metal yüzeylere uygulanan basınç üzerinde çok hassas kontrol gerektirir. Çok fazla basınç uygulandığında, elektrik akımına karşı direnç düşer ve metalin uygun kaynak sıcaklığına ulaşmasını engeller. Direnç kaynaklı bir birleştirmeyi incelerken, derin birleşme çukurları parçaların birbirine çok sıkı bastırıldığı bir göstergesi olabilir. Bu, uygun şekilde yapılmamış zayıf bir kaynağı gösterebilir [48].

İç çatlaklar

İç çatlaklar genel olarak radyografi ile incelenir. Ancak kaynaktan kesit almak suretiyle tahribatlı olarak da incelenebilirler. Çatlaklar kaynak içinde değişik şekillerde (enine, boyuna, kollu, yıldız vb.) olabilirler [47].

İç çatlakların sebepleri aşağıda verilmiştir;

- 1- Kaynak basıncının yetersiz olması
- 2- Kaynak sırası zamanın uygun olmaması
- 3- Elektrotların farklı hizada olması
- 4- Kaynak akımının fazla olması
- 5- Elektrotların yana kayması
- 6- Elektrotların yetersiz soğutulması

Dış çatlaklar

Nokta kaynağının yüzeyine doğru uzanan çatlaklar uygun olmayan bir kuvvet ve akımdan kaynaklanmaktadır.

Aşırı sıcaklığın oluşmasını önlemek için kaynak basıncı yeteri kadar büyük olmalıdır. Kaynak basıncı düşük olması temas direncinin büyük olmasına neden olur. Bu çatlak türü parçanın mukavemetini azaltmaktadır [47].

Dış çatlak oluşmasının sebepleri aşağıda verilmektedir;

- 1- Elektrotların yanlış hizalanması
- 2- Kaynak basıncının yetersiz olması
- 3- Parçaların konumu
- 4- Kaynak sırası zamanının uygun olmaması
- 5- Nüfuziyetin fazla olması
- 6- Kaynak akımının yüksek olması

Büzülme boşluğu

Farklı yerlerdeki soğutma hızı uyumsuzluğu büzülme boşluklarının oluşmasına neden olur. Kaynak külçesinin etkili alanı azalır ve ara yüzeyinde büzülme boşlukları oluştuğunda çekme-kesme testleri altında lokal kesme stresi artar.

Büzülme boşlukları oluşumu karbona, alaşım elementlerine ve ‘S ve P ‘miktarına güçlü bir şekilde bağlıdır. Daha yüksek karbon eşdeğeri, nokta kaynaklarında daha fazla büzülme boşluğuna neden olur [50].

Bakır birikmesi

Bakır birikmesi parçanın korozyona karşı hassasiyetini arttırır. Bakır döküntüleri tel fırça ile temizlenir veya kum püskürtme işlemi yapılarak tamamen ortadan kaldırılabilir [47].

Bakır birikmesinin sebepleri aşağıda verilmiştir;

- 1- Malzemenin yüzeyinin uygun olmaması
- 2- Elektrot temizliğinin iyi yapılmaması
- 3- Elektrot uçlarındaki rutubet
- 4- Kaynak akımının yüksek olması
- 5- Kaynak basıncının yetersiz olması

Aşırı ezilme

Aşırı ezilme kaynak yüzeylerinde derin çukurlaşmaların oluşmasından kaynaklanmaktadır. Levhanın kalınlığının %10-20'si arasındaki değerler kabul edilebilir. Derin bir ezik metal kalınlığında azalmalara sebep olur. Buda mukavemet kaybına yol açar [47].

Aşırı ezilmenin sebepleri aşağıda verilmektedir;

1. Elektrot ucunun çok küçük olması
2. Kaynak basıncının fazla olması
3. Kaynak akımının yüksek olması
4. Fıskırma
5. Nüfuziyetin fazla olması
6. Yüzeyin fazla ısınması
7. Basma periyodunun uygun olmaması

Asimetrik punta kaynak işaretleri

Çoğu zaman, iyi uygulanmış bir dirençli nokta kaynak işaretinin mükemmel yuvarlak bir şekle sahip olması veya en azından iki metal parçasını birleştirmek için kullanılan kaynak kafalarının şekline uygun olması gerekir.

Asimetrik şekiller, yanlış hizalanmış elektrotlar veya kaynak bölgesinde yabancı kirleticilerin varlığı gibi kaynaktaki kusurları gösterir. Bu, basınç altında kırılma olasılığı daha yüksek olan daha zayıf bir kaynak oluşturur [48].

Levha ayrılması

Levha ayrılması kaynak noktasındaki levha yüzeylerinin birden ayrılması olayıdır. İki dış levhanın ortalama kalınlığının %10'undan fazla olmayan ayrılmalar normal olarak kabul edilebilir [47].

Levha ayrılmasının sebepleri aşağıda verilmektedir;

- 1- Kaynak basıncının yüksek olması
- 2- Elektrotların aynı hizada olmaması
- 3- Elektrot ucunun çok küçük olması
- 4- Fıskırma
- 5- Kaynak akımının yüksek olması
- 6- Parçaların düzgün yerleştirilmemesi
- 7- Kaynak zamanının fazla olması

Simetri

Kaynak noktası yatay ve düşey eksenlere göre simetrik ise iyi bir kaynak yapılmış demektir. Kaynak kalitesini iyileştirme için birleşme içinde düzgün olan noktalar istenir [47].

Simetrik olmayan kaynak noktalarına aşağıdaki faktörlerin bir veya birkaçı sebep olabilir:

- 1- Elektrotların yanlış hizalanması
- 2- Elektrot ucunun çok küçük seçilmesi
- 3- Yüzey durumunun düzgün ve uygun olmaması
- 4- Kaynak programının yanlış seçilmesi
- 5- Parçaların düzgün yerleştirilmemesi

Kaynak nüfuziyeti

Nokta kaynağında nüfuziyet, erimenin parçalar üzerinde uzanabildiği derinlik olarak tarif edilebilir. Nüfuziyet sınırının yaklaşık olarak %20-80 arasında değişimine izin verilir [47].

Yetersiz nüfuziyet: Nüfuziyeti %20 'den az olacak şekilde yapılan kaynaktır. Bu hata, bütün malzeme kalınlığı boyunca olmamaktadır ve çentiklerin oluşmasına sebep olur.

Yetersiz nüfuziyetin sebepleri aşağıda verilmektedir;

- 1- Kaynak akımının yetersiz olması
- 2- Kaynak basıncının fazla olması
- 3- Uygun olmayan ısı denge

4- Elektrot ucunun çok büyük seçilmesi

5- Yüzey durumunun uygun olmaması

Aşırı nüfuziyet: Nüfuziyeti %80 'den fazla olan kaynaklardır. Aşırı nüfuziyetten dolayı fişkırma, çatlaklar ve gözenekler gibi diğer hataları meydana getirebilir.

Aşırı nüfuziyetin sebepleri aşağıda verilmektedir;

1- Uygun olmayan yüzey durumu

2- Elektrot ucunun çok küçük seçilmesi

3- Kaynak sırası zamanının uygun olmaması

4- Kaynak basıncının yetersiz olması

5- Elektrot soğutulmasının yetersiz soğutulması

4. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI TEST YÖNTEMLERİ

Malzeme seçimi, malzeme muayenesi, malzemenin karakteristik özelliklerini öğrenebilmek için yapılan deneylerdir. Malzemenin satışa sunulmadan önceki hatalarının tespiti için ve üretimi yapılan parçanın çalışma şartlarında karşılaştacağı kuvvetlere karşı göstereceği davranışın önceden görülebilmesi için bu testler uygulanır.

Malzemelerin muayenesinde şunlar ele alınmaktadır:

- Parçaların iç kusurlarının muayenesi
- Malzemenin iç yapısının ve kimyevi bileşenlerinin muayenesi
- Malzemelerin işlenme özelliklerine yönelik muayene

Malzemelerin muayenesinde kullanılan yöntemlerin çokluğu seçim yapılmasını kolaylaştırır. Seçilen muayene yönteminin istenilenleri karşılıyor olup olmadığı ve maliyeti göz önüne alınmalıdır [51].

Punta kaynak kalitesini test etmek için kullanılan temel test yöntemleri şunlardır:

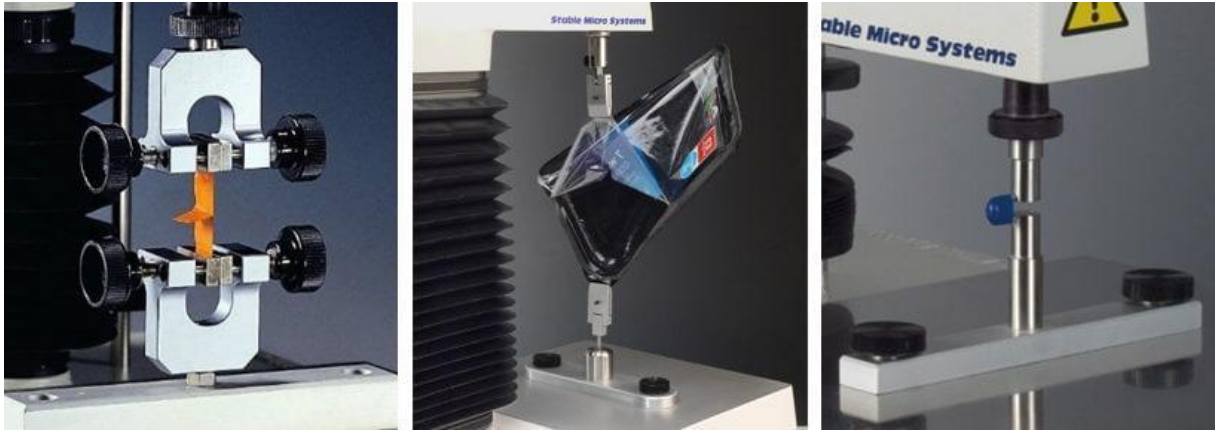
Tahribatlı Testler	Tahribatsız Testler
• Çekme-makaslama Testi • Gerilme testi • Darbe Testi • Burulma Testi • Sıyırma Testi • Yorulma testi • Aşındırma Testi • Bükme testi • Yontma Testi • Sertlik testi	• Gözle Muayene Yöntemi • Mikroskopik Muayene Yöntemi • Sıvı Penetrant Muayene Yöntemi • Ultrasonik Muayene Yöntemi • Radyografik Muayene Yöntemi • Manyetik Muayene Yöntemi

4.1. Tahribatlı Testler

Malzemelerin çalışma şartlarında karşılaştıkları kuvvetlere karşı verecekleri tepkilerin önceden tespit edilebilmesi amacı ile gerçekleştirilir. Malzeme tahribata uğratılır. Bu yüzden bu gruptaki işlemler tahribatlı muayene yöntemleri olarak bilinir. Kullanılacak malzeme hangi kuvvetlere maruz bırakılacaksa o tür test makinelerinde muayeneleri yapılmaktadır [51].

4.1.1. Sıyırma testi

Tahribatlı sıyırma testleri, sacın bir tarafının diğerinden sıyrılarak, genellikle kaynağı bir yükleme koşuluna tabi tutan, bir silindir kullanılarak gerçekleştirilir. Bir sıyırma testinde, yük, nokta kaynağının bir tarafında yoğun bir şekilde yoğunlaşır ve tipik olarak, farklı bir hata modunda başarısız olabilecek kaynakları karşılaştırmayı kolaylaştırabilen ITAB 'daki hatayı ortaya çıkartır [52].



Şekil 4.1. Sıyırma testi görselleri [53].

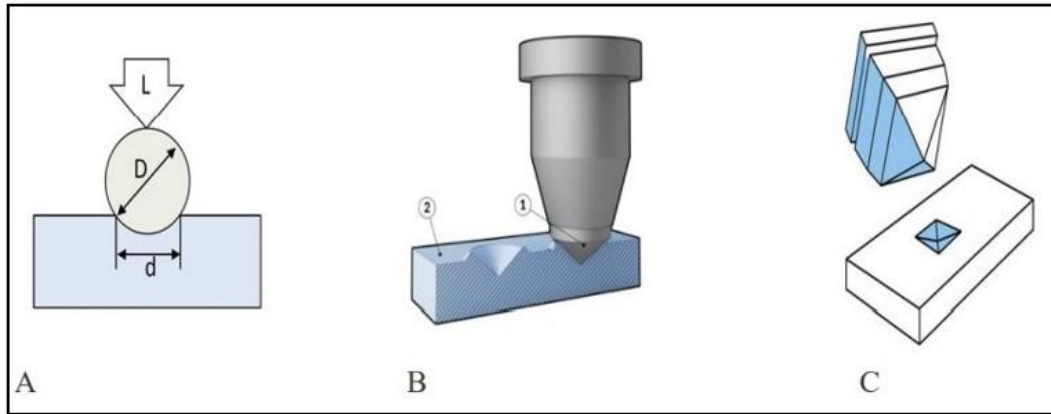
4.1.2. Sertlik testi

Sertlik testi, malzeme deneyleri arasında en genel kullanılan yöntemlerdendir. Deney oldukça kolaydır. Numunedeki tahribat da diğerlerine göre daha azdır. Ayrıca malzemelerin sertliklerinin ölçülmesi, malzemenin mekanik özelliklerinin hakkında oldukça iyi bilgiler vermektedir.

Sertlik ölçümü laboratuvarda özel cihazlar ile yapılır. Bu sonuç malzemenin aşınmaya karşı gösterdiği direnç olarak da yorumlanabilir [51].

Eşit olmayan sertlik dağılımı bir endişe kaynağıdır. Yüksek sertlik bölgeleri parçayı kırılğan hale getirebilirken düşük sertlik bölgeleri aşınma direncini azaltabilir. Bu nedenle parçayı yüksek sertlik veya yüksek tokluk gerektiren her iki uygulama türü için de uygun hale getirmeyebilir. Sertliği plastik deformasyona karşı mukavemet veya direnç ölçüsü olarak tanımladığımız için, deformasyon miktarı arttıkça sertliğin de arttığı söylenebilir [54].

Test malzemesine ve işlem geçmişine göre birkaç girinti şekli ve malzemesi kullanılır. En yaygın geometriler, Şekil 4.2'deki A' da gösterildiği gibi Brinell testinde kullanılan bir küre ucu, B'de gösterildiği gibi Rockwell testinde kullanılan bir koni ucu ve C' de gösterildiği gibi Vickers testinde kullanılan dikdörtgen bir piramit ucudur [55].

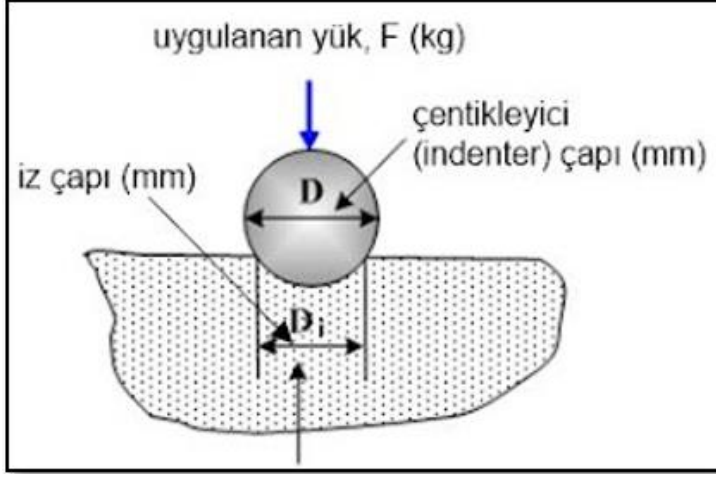


Şekil 4.2. A) Brinell sertlik B) Rockwell sertlik C) Vickers sertlik [55,56].

Brinell sertlik testi

Brinell sertlik testi en eski sertlik test metodudur. Brinell sertlik ölçme metodu, çekme gerilimi 150 kg/mm^2 den az olan demir, çelik ve metal olmayan malzemelere uygulanır. Brinell sertlik ölçme metodunda malzeme boyutuna göre belirlenen çapta küresel çelik bilyalar kullanılır. Belirli çaptaki bilya numune yüzeyine belirli bir süre yük uygular ve numune yüzeyinde kalıcı bir iz oluşturur.

Brinell sertlik test raporu ‘70 HB 5/1200/25’ şeklinde verilir; anlamı, Brinell sertlik 70, bilya çapı 5 mm, test yükü 1200 kg ve test süresi 25 saniyedir [57].



Şekil 4.3. Brinell sertlik testi şematik gösterimi [57].

Brinell testinin dezavantajları, diğer yöntemlere kıyasla yavaş olması ve yıkıcı olması, test örneğinde büyük bir girinti bırakmasıdır [58].

4.2. Tahribatsız Testler

Tahribatsız muayene yöntemlerinin amacı yapıların performanslarını etkileyecek özelliklerin (kusur, kimyasal bileşim vb.) yapı ya da parça kullanım dışı olmadan önce ortaya çıkarmaktır. Ayrıca yapı ve malzemelerde hasar tespiti de yapılabilir [51].

Tahribatsız muayene günümüzde oldukça sık kullanılan bir kalite kontrol tekniğidir. Malzemedeki kalıntıları, gerilmeleri, hata boyutunu, kırılma dayanımı ile yapının güvenli bir şekilde çalışmasını belirlemek amacıyla kullanılabilmektedir [59].

Sıradan ergitme kaynakları için kullanılan çoğu tahribatsız test yöntemleri, nokta kaynaklarında kullanılabilir. En yaygın tahribatsız test yöntemleri şunlardır [51];

Gözle Muayene Yöntemi: Maliyet açısından en düşük olan yöntemdir ve malzemenin dış yüzeyindeki hataların tespiti sağlanır. Muayeneyi yapan kişi deneyimli olmalıdır.

Mikroskopik Muayene Yöntemi: İş parçasından küçük bir örnek alınır. Daha sonra örnek numuneler parlatılıp dağlanır ve böylece numune mikroskop ile incelenebilecek hale getirilir.

Sıvı Penetrant Muayene Yöntemi: Yüzey süreksizliğine girebilen penetrant bir sıvı kullanılır ve böylece görünür bir indikasyon verir. Bulunan kusurlar çatlak türlerinden ise çizgi şeklinde, gözenek türlerinden ise yuvarlak şekilde görülmektedir. Metal, cam ve seramiklerde yüzey kusurlarının tespitinde kullanılır. Kullanımı kolaydır.

Ultrasonik Muayene Yöntemi: Malzemeye girmek için ultrases kullanılır. Süreksizlikler bir osiloskop ekranında görülür. Metal, seramik, plastik vs. malzemelerin yüzey ve yüzey altı süreksizliklerini açığa çıkarmak için kullanılır. Ayrıca malzeme kalınlığı ölçümünde de kullanılabilir. Fakat yatırım maliyeti yüksektir. Test sonuçlarını yorumlayabilmek için çok iyi eğitilmiş personele ihtiyaç vardır.

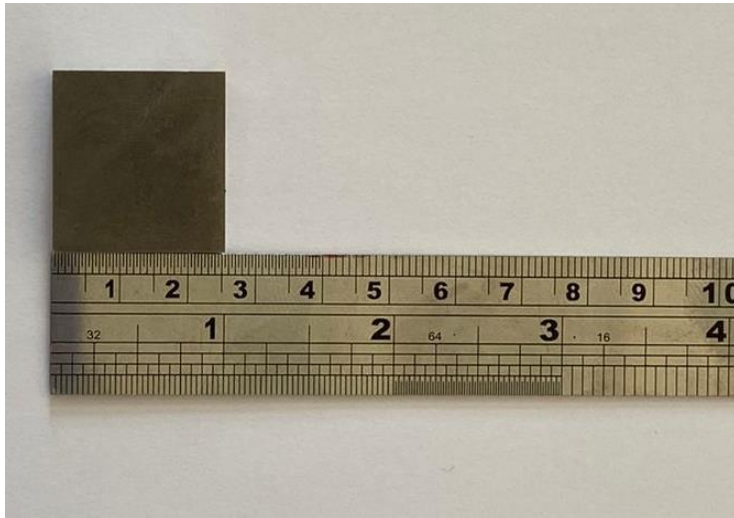
Radyografik Muayene Yöntemi: Elektromanyetik ışınlar (X ve gama ışınları) malzemeye nüfuz ettirilir. Malzemedeki süreksizlikler film üzerine kaydedilir. Metaller ve birçok diğer malzemelerde yüzey ve yüzey altı süreksizliklerin tespitinde kullanılır. Başlangıç maliyeti yüksektir. Personelin sağlık fiziği kurallarına göre çalışması gerekmektedir. Aksi halde personele zarar gelebilir.

Manyetik Muayene Yöntemi: Bir parça içinde manyetik alan yaratmak için elektrik akımı kullanılır. Süreksizlik tarafından bozulan manyetik alan bölgelerinde manyetik parçacıklar birikir. Mıknatıslanabilen (ferromanyetik) metallerde yüzey ve yüzey altı süreksizliklerinin tespitinde kullanılır. Kullanımı kolaydır. Saha çalışmalarında cihazlar taşınabilir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

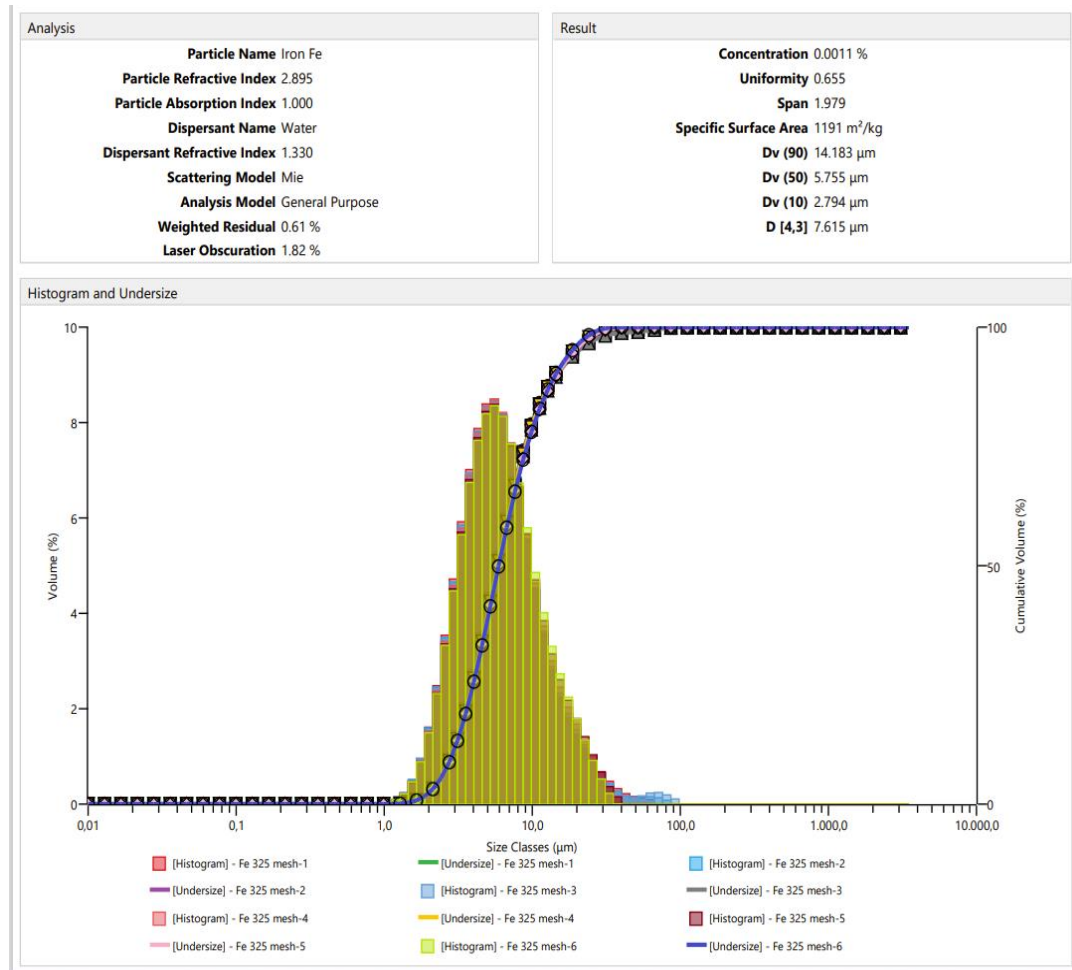
5.1. Malzeme Metot

Bu araştırma toz metal levha malzemelerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla ortalama 60 mikron boyutlarında Fe tozları kullanılmıştır. Fe tozları 500-550 ve 600 MPa basınçlarda 2x25x25 mm boyutlarında preslenerek toz metal levha malzemeler üretilmiştir. Preslenen numuneler mikro dalga fırınında 925°C de 15 dakika süreyle sinterlenmişlerdir. Preslenen numunelerin ham ve sinterlenmiş yoğunlukları belirlenmiştir. Sinterlenmiş numuneler bindirme şeklinde birleştirilmişlerdir. Daha sonra numuneler birleşme bölgesinden kesilerek birleşme bölgesinin mikro yapısı, sertlik değerleri ölçülerek değerlendirilmiştir. Ayrıca sinterleme sonrası mikroyapılar optik mikroskopla incelenerek presleme basıncının mikroyapıya etkileri belirlenmiştir. Son olarak da sıyrma testi yapılarak kaynak bölgesinin dayanımına bakılmıştır.



Resim 5.1. Çalışmada kullanılan numune

Deneylerde kullanılan demir tozlarının boyut analiz sonuçları Şekil 5.1’de verilmiştir.



Result									
Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under
0.010	0.00	0.146	0.00	2.131	3.40	31.100	98.59	453.960	100.00
0.011	0.00	0.166	0.00	2.421	5.88	35.335	99.07	515.772	100.00
0.013	0.00	0.188	0.00	2.750	9.42	40.146	99.40	586.001	100.00
0.015	0.00	0.214	0.00	3.125	14.14	45.613	99.62	665.793	100.00
0.017	0.00	0.243	0.00	3.550	20.06	51.823	99.77	756.449	100.00
0.019	0.00	0.276	0.00	4.034	27.08	58.880	99.90	859.450	100.00
0.022	0.00	0.314	0.00	4.583	34.95	66.897	100.00	976.475	100.00
0.024	0.00	0.357	0.00	5.207	43.34	76.006	100.00	1109.435	100.00
0.028	0.00	0.405	0.00	5.916	51.84	86.355	100.00	1260.499	100.00
0.032	0.00	0.460	0.00	6.722	60.02	98.114	100.00	1432.133	100.00
0.036	0.00	0.523	0.00	7.637	67.52	111.473	100.00	1627.136	100.00
0.041	0.00	0.594	0.00	8.677	74.10	126.652	100.00	1848.692	100.00
0.046	0.00	0.675	0.00	9.858	79.61	143.897	100.00	2100.416	100.00
0.053	0.00	0.767	0.00	11.201	84.09	163.490	100.00	2386.415	100.00
0.060	0.00	0.872	0.00	12.726	87.63	185.752	100.00	2711.357	100.00
0.068	0.00	0.991	0.00	14.458	90.42	211.044	100.00	3080.544	100.00
0.077	0.00	1.125	0.00	16.427	92.63	239.780	100.00	3500.000	100.00
0.088	0.00	1.279	0.09	18.664	94.41	272.430	100.00		
0.100	0.00	1.453	0.32	21.205	95.85	309.525	100.00		
0.113	0.00	1.651	0.83	24.092	97.01	351.670	100.00		
0.128	0.00	1.875	1.79	27.373	97.92	399.555	100.00		

Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan demir tozlarının boyut analizi

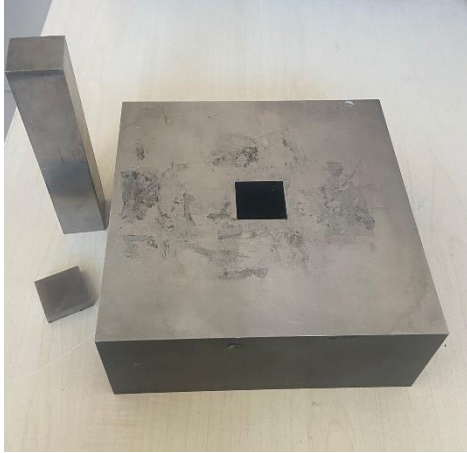
5.2. Toz Numunelerin Preslenmesi

Ortalama 60 mikron boyuttaki Fe tozları 10'ar gram tartılıp 2x25x25 mm³ boyutlarındaki kalıpta 500,550 ve 600 MPa basınçlarda preslenmiştir. Preslenen numunelerin en, boy, yükseklik ölçümü kumpas yardımıyla yapılmıştır. Pres sonrası ağırlık ölçümü hassas tartı ile yapıp ham yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Deneyde kullanılan kalıp ve pres makinesi Resim 5.2 ve Resim 5.3 'de verilmektedir.

Yoğunluk hesabı Arşimet prensibi yerine boyut ve ağırlıklar ölçülerek aşağıdaki eşitlik yardımı ile yapılmıştır [60].

$$\text{Yoğunluk } (\rho) = \frac{\text{Parçanın Ağırlığı (m)}}{\text{Parçanın Geometrik Hacmi (V)}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$\% \text{ Teorik Yoğunluk} = \frac{\text{Ham Yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk}} \times 100 \quad (5.2)$$



Resim 5.2. Çalışmada kullanılan kalıp-zımba



Resim 5.3. Çalışmada kullanılan pres makinesi

Eşitlik 5.1'e göre yapılan hesaplamalarda presleme basıncına bağlı ham yoğunlukta değişim tespit edilmiştir. Elde edilen ham yoğunluk değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Basınlara göre ortalama ham yoğunluk değerleri

Basınç (MPa)	Ham Yoğunluk (%)	Ham Yoğunluk (g/cm ³)
500	86,58	6,77
550	90,55	7,09
600	92,45	7,23

Çizelgede görüleceği gibi 500 MPa da %86,58 ham yoğunluk elde edilirken, 550 MPa da %90,55 ve 600 MPa da %92,45 yoğunluklara ulaşılmıştır. Artan presleme basıncı ile kalıp içerisindeki tozlar daha yoğun hale geçerek, gözeneklilik miktarını azaltarak ham yoğunluğun artmasına sebep olmuştur.

5.3. Toz Numunelerin Sinterlenmesi

Preslenen numunelerin yüzeyleri temizlenip çapakları alındıktan sonra numuneler mikro dalga fırında 925°C de 15 dakika süreyle sinterlenmişlerdir. Numuneleri çıkartmak için mikrodalga fırının soğuması beklenilmiştir. Numuneler mikrodalga fırından çıkarıldıktan sonra en, boy, yükseklik ölçüleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve ağırlıkları da hassas tartı ile ölçülmüştür. Elde edilen veriler yardımıyla sinterlenmiş numunelerin yoğunlukları Eşitlik 5.3 'de verilen eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\text{Sinterlenmiş Yoğunluk} = \frac{\text{Sinterlenmiş Parçanın Ağırlığı}}{\text{Sinterlenmiş Parçanın Geometrik Hacmi}} \times 100 \quad (5.3)$$

Çizelge 5.2. Basınlara göre ortalama sinterlenmiş yoğunluk değerleri

Basınç (MPa)	Sinterlenmiş Yoğunluk (%)	Sinterlenmiş Yoğunluk (g/cm ³)
500	92,69	7,25
550	95,56	7,48
600	98,65	7,72

Resim 5.4' de gösterilen SYNOTHERM markalı, 2,45 GHz, 1600°C, 1100 W kapasitedeki laboratuvar tipi mikrodalga fırında gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.4. Synotherm marka DS1500 model mikrodalga fırın

5.4. Kaynak Deney Seti

Deneylerde, Karabük Üniversitesin de bulunun 60 kVA gücünde, BAYKAL SPP60 marka elektronik akım ve zaman kontrollü, pnömatik basma donanımlı nokta direnç kaynak makinesi kullanılmıştır. Elektrot basma kuvveti, kaynak makinesine bağlı olan manometre ile ölçülmüştür. Kaynak zamanı, kaynak akım şiddeti, sıkıştırma ve tutma süreleri makinenin kendi donanımı üzerinden ayarlanmıştır. Birleştirmede kullanılan kaynak deney seti Resim 5.5 'de görülmektedir. Deney seti; kaynak makinesi, elektrotların soğutulması için su devir-daim pompası, hava kaynağı olarak kullanılan kompresörden oluşmaktadır.



Resim 5.5. Kaynak donanımı

5.5. Kaynak Parametreleri

Sinterlenmiş olan toz metal numuneler Çizelge 5.3’ te verilen parametrelerde nokta direnç kaynağı kullanılarak birleştirilmişlerdir.

Çizelge 5.3. Kaynak işleminde kullanılan kaynak parametreleri

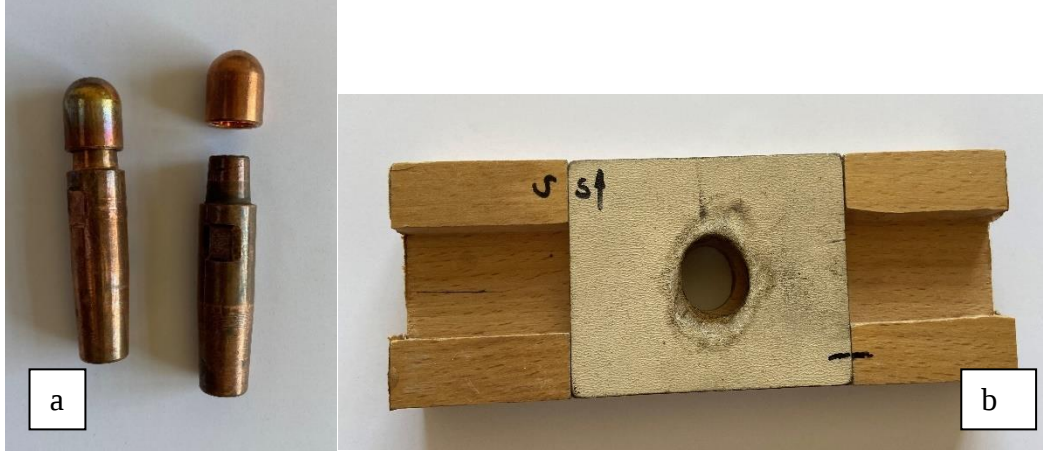
İnme Zamanı (Çevrim)	Sıkıştırma Zamanı (Çevrim)	Kaynak Zamanı (Çevrim)	Kaynak Akımı (kA)	Ara Zaman (Çevrim)	Durma Zamanı (Çevrim)	Elektrod Kuvveti (kN)
10	20	25	7	20	30	5

Kaynak zamanı parametresi 1 saniyenin 0.02 katsayısı ile çarpılarak çevrim olarak ifade edilmiştir. (1çevrim= 0,02 sn)

5.6. Nokta Direnç Kaynağında Kullanılan Elektrotlar

Deneylerde, Karabük Üniversitesin’ de bulunan BAYKAL SPP60 marka modelli kaynak makinesinin üst ve alt çenesinde uç çapı 5,5 mm, küresel uçlu Cu-Cr-Zr alaşımlı, su

soğutmalı elektrotlar kullanılmıştır. Elektrotlar arasındaki mesafe periyodik olarak kontrol edilmiştir. Resim 5.6’da deneyde kullanılan elektrotlar ve kalıp gösterilmiştir.



Resim 5.6. Deneyde kullanılan a) Elektrotlar ve b) Kalıp

5.7. Toz Metal Numunelerin Direnç Kaynağı ile Birleştirilmeleri

Preslenip sinterlenen numuneler daha sonra nokta direnç kaynağı makinesi ile üst üste bindirme şeklinde kaynaklanmıştır. Kaynaklanan numuneler kaynak bölgesinden kesilerek bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler ilk önce 320 ve 1200 mesh’ lik zımpara kâğıdı ile zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem ile numunenin yüzeyi daha görünür hale gelmiştir. Sonra numunelere düzgün, çiziksiz ve yüksek yansıtıcı yüzeylere sahip olacak şekilde 6 ve 3 μm elmas pasta kullanılarak parlatma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemler sonrasında numunelere optik mikroskop ile mikroyapı incelemesi yapılmıştır.. Numunelerin ana metal, kaynak bölgesi ve geçiş bölgesi olmak üzere mekanik testler (Sertlik, Sıyırma Testi) ve mikroyapısal testler yapılmıştır.

Bindirme şeklinde nokta kaynağı yapılan numuneler Resim 5.7’ de verilmektedir. Numunelerde kullanılan cihazlar LEICA DM 205C marka optik mikroskop, Emco Test Duravision 2000 marka sertlik ölçme cihazı (Brinell- 6,25 kg yük-25 mm çaplı bilya) ve INSTRON 3369 universal çekme test cihazı Resim 5.8’de verilmektedir.



Resim 5.7. Bindirme şeklinde nokta kaynağı yapılmış numune



Resim 5.8. a) Optik mikroskop b) Sertlik cihazı c) Çekme cihazı

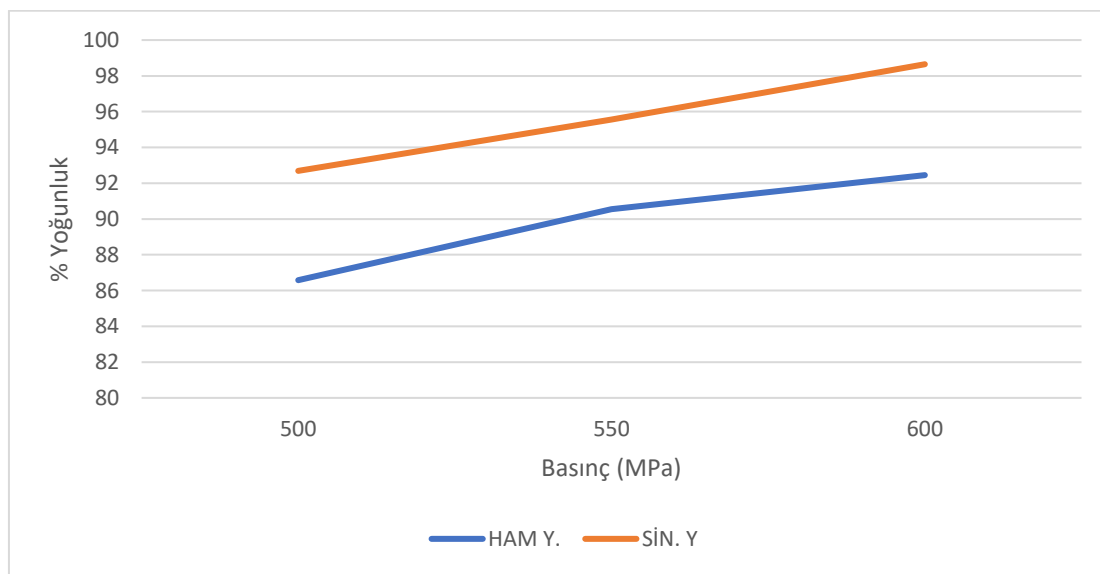
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Toz Metal Numunelerin Preslenme Sonuçları

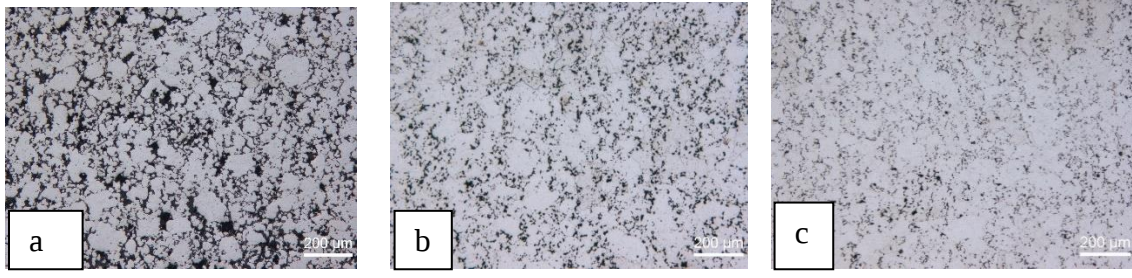
Bu çalışmada en düşük presleme basıncı olan 500 MPa da %86,58 olan ham yoğunluk sinterleme sonrasında %6,5 artış göstererek %92,69'e yükselirken, 550 MPa presleme basıncında sinterleme yoğunluğundaki artış %5,2 artarak %95,56'a, 600 MPa basınçta ise %92,45 olan ham yoğunluk %6,2 artış ile %98,65'e yükselmiştir. Bu sonuçlardan da görüleceği gibi %80'lerin üzerine çıkan yoğunluk da yoğunluk artışı lineer olmaktan çıkıp oranı azalmakla beraber yatay bir seyir sergilemektedir. Bu değerler Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1'de verilmektedir.

Çizelge 6.1. Basınlara göre ortalama yoğunluk değerleri

Basınç (MPa)	Ham Yoğunluk (%)	Sinterlenmiş Yoğunluk (%)
500	86,58	92,69
550	90,55	95,56
600	92,45	98,65



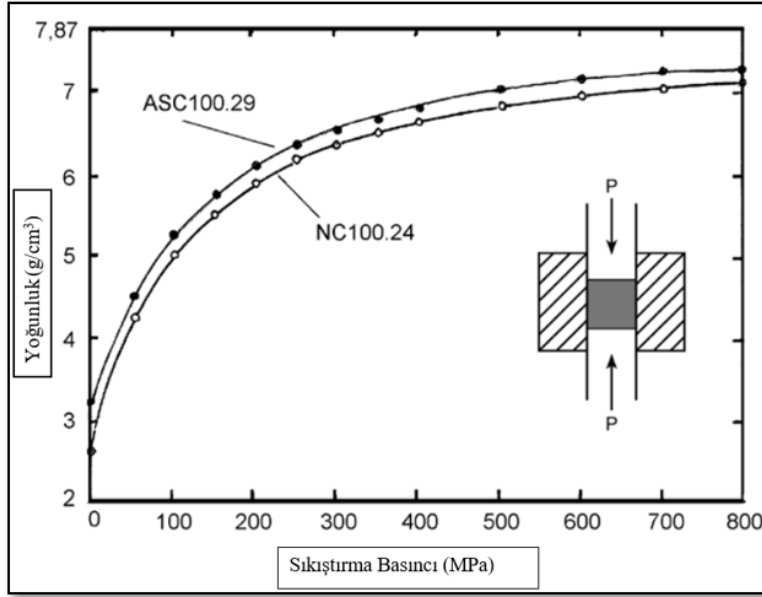
Şekil 6.1. Ham yoğunluk ve sinterleme yoğunluğu



Şekil 6.2. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa Ana metal mikro yapısı

Toz metal malzemeler de presleme basıncı hem ham yoğunluğu hem de sinterleme yoğunluğunu artırmaktadır. Presleme sırasında toz partiküllerin birbirleriyle teması sonucu yoğunlaşma olur. Basınç uygulanmaya devam edildikçe partiküllerde boşlukların küçük boyutlu partiküller tarafından doldurulması ve partikül temas alanlarının artması gerçekleşir. Sinterleme aşamasında ise mekanik olarak temas halindeki partiküllerin arasında boyun oluşumu, boyun bölgesinin büyümesi, gözenek küçülmesi ve gözeneklerin kapalı gözenek haline geçmesi sağlanır. Ayrıca sinterlenmiş yoğunluğun artmasında sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi ve sinterleme atmosferi de etkili olmaktadır. Sonuç olarak presleme basıncı arttıkça gözeneklilik miktarı azalmakta, gözenek boyutu küçülmektedir. Bu durum Şekil 6.2’ de verilen ana metal mikro yapılarında da görülmektedir.

Bu görüntülerde Şekil 6.1 ve Çizelge 6.1’ de ki sonuçları doğrular nitelikte olduğunu göstermektedir.



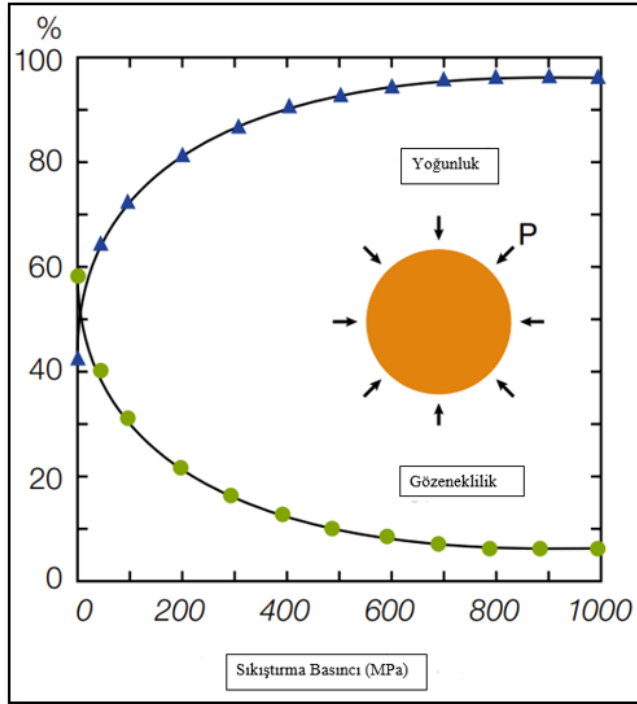
Şekil 6.3. Yoğunluk-Basınç grafiği [60].

Şekil 6.3'teki grafikte de görüldüğü gibi artan presleme basıncı ile yoğunlukların arttığı, düşük basınçlarda yoğunluk artışının hızlı değiştiği ve presleme basıncı arttıkça yoğunluk değişim hızının azaldığı görülmektedir [60].

6.2. Toz Metal Numunelerin Kaynaklı Birleştirilmesi

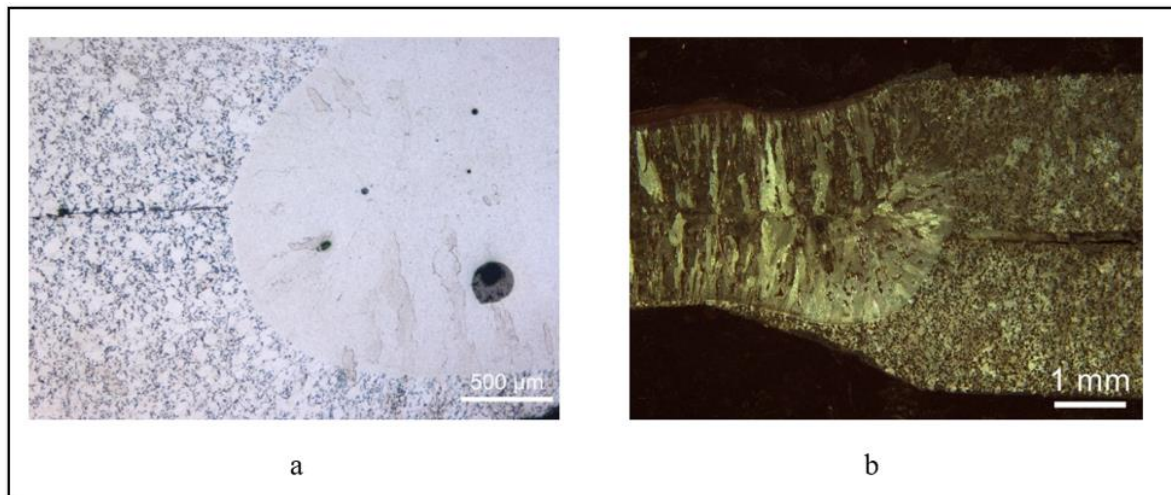
Üç farklı presleme basıncında preslenerek sinterlenmiş numunelerin nokta direnç kaynakları başarıyla gerçekleştirildiği görülmüştür.

Yoğunluk ve gözenek değişiminin birlikte verildiği grafik Şekil 6.4'te verilmiştir. Buradan görülebileceği gibi artan yoğunlukla gözenekliliğin azaldığı açık olarak görülmektedir [60].



Şekil 6.4. Artan basınç ile yoğunluk ve gözenekliliğin değişimi [60].

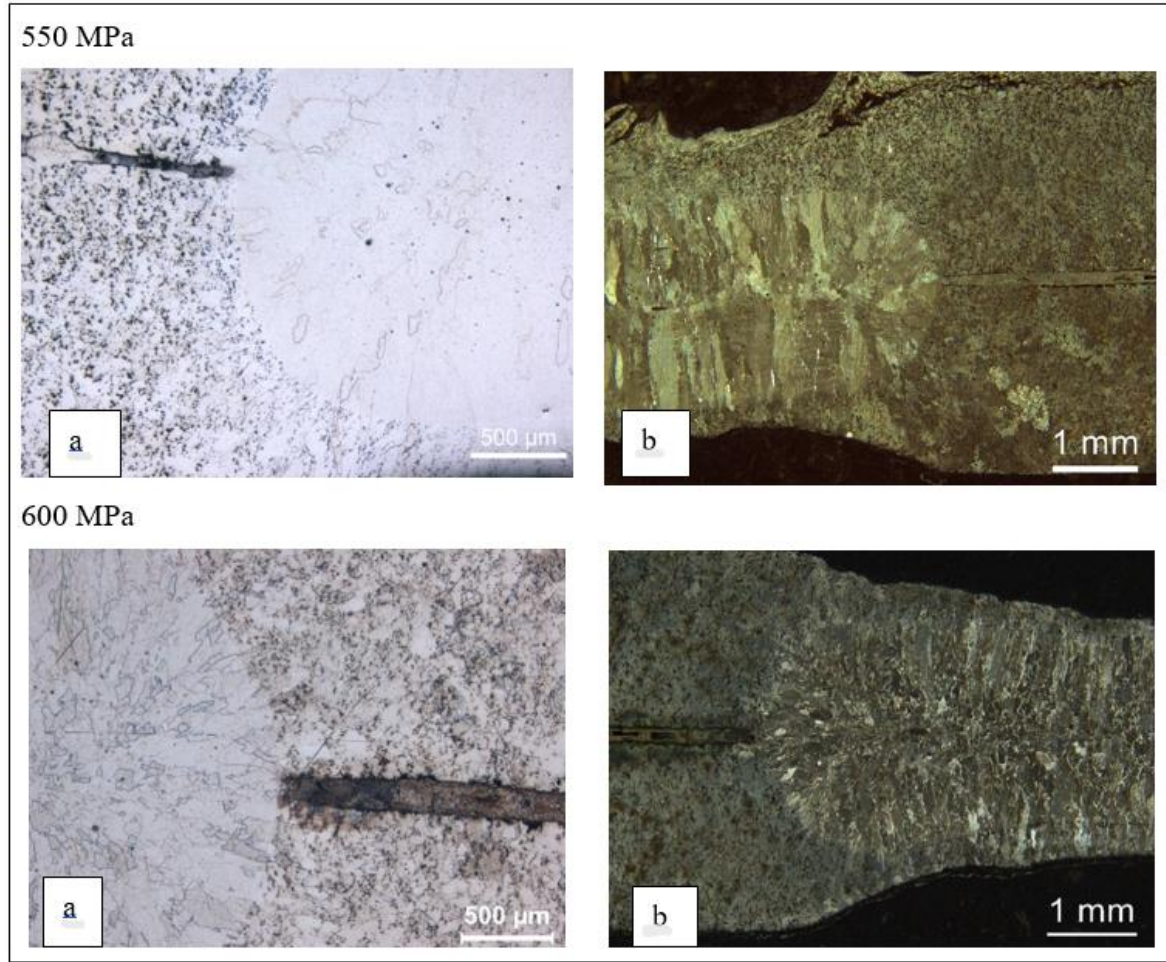
Düşük yoğunluklu 500 MPa’ da preslenen numuneler de gözeneklilik fazla, elektrik iletimi düşüktür ve dış yüzeye kadar tane yapılarında yönlendirmeler olmuştur. Şekil 6.5’de 500 MPa’ da preslenen numunelerin kaynak bölgesinin mikroyapı ve makroyapı görüntüleri verilmektedir.



Şekil 6.5. a) Mikroyapı b) Makroyapı

550 MPa’ da ve 600 MPa’ da preslenen numunelerde çekirdek oluşumu ara yüzeyde sınırlı kalırken çekirdek metalin üst elektrot bölgesine doğru tane yapısında ve yönlendirilmiş tane

yapılarının olduğu gözlenmiştir. Ayrıca 550 MPa’ da preslenen numunelerin kaynak sırasında elektrot baskı kuvvetinin etkisinden olduğu düşünülen kesit küçülmesi gözlemlenmiştir. Bunun kaynak ısıyla kolaylaşan plastik deformasyonun ve gözenekliliğin etkisiyle gerçekleştiği düşünülmektedir. Gözenekliliğin fazla olduğu numunelerde ısı iletimi düşük olduğundan kaynak metali tane yapısının yüksek yoğunluklu numunelerde daha iyi olduğu görülmektedir. Şekil 6.4’ de 550 ve 600 MPa’ da preslenen numunelerin kaynak bölgelerinin mikroyapı ve makroyapı görüntüleri verilmektedir.



Şekil 6.6. a) Mikroyapı b) Makroyapı



Şekil 6.7. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa Kaynak bölgesinin makro görüntüsü

Şekil 6.7’de artan presleme basıncıyla birleşme bölgesindeki punta derinliğinin, kaynak çekirdek çapının ve kaynak çekirdek kalınlığının makro görüntüsü verilmiştir. Artan basınçla punta derinliği azalırken kaynak çekirdek çapı ve kaynak çekirdek kalınlığı artmaktadır.

6.3. Mikroyapısal Sonuçlar

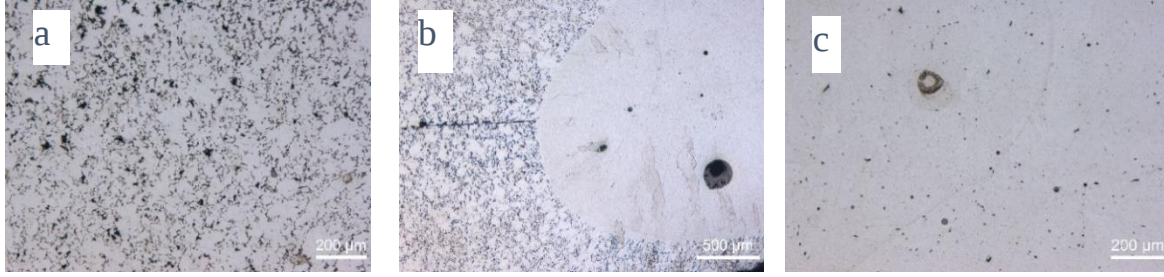
Çalışmada 500,550 ve 600 MPa’ da preslenen numunelerin kaynaklı birleştirmelerin de ana metal, geçiş bölgesi ve kaynak çekirdeğini kapsayan mikroyapı çalışması gerçekleştirilmiş ve göze çarpan hususlara değinilmiştir

Şekil 6.8’de görüldüğü ana metal, geçiş bölgesi ve kaynak çekirdeği olmak üzere üç farklı bölge tespit edilmiştir

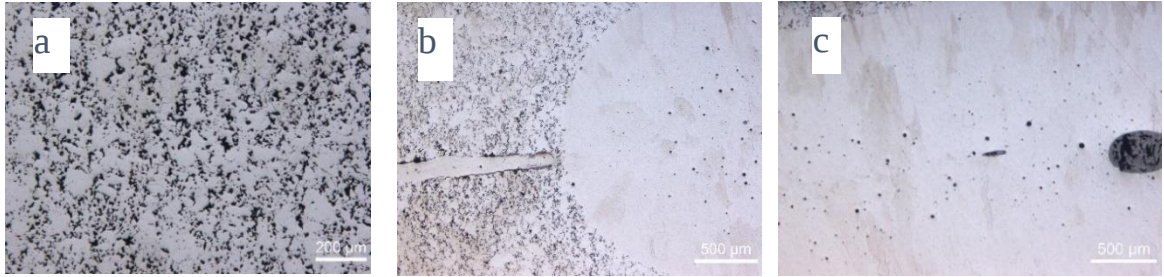
Düşük yoğunluklu 500 MPa’ da preslenen numunelerin gözenekliliği yüksek olduğundan ısı iletimi ve elektrik iletimi düşüktür. Dolayısıyla ısının baskı elektrotları altında yoğunlaşarak kaynak çekirdeğinin oluşması ve numunenin dış yüzeylerine kadar tane yapısında yönlendirilmelerin oluşmasına neden olmuştur.

550 MPa’ da ve 600 MPa’ da preslenen numunelerde çekirdek oluşumu ara yüzeyde sınırlı kalırken çekirdek metalin üst elektrot bölgesine doğru tane yapısında ve yönlenmiş tane yapılarının olduğu gözlenmiştir.

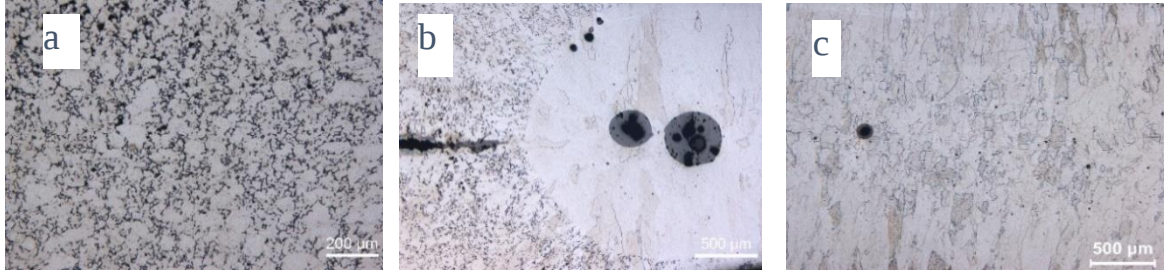
500 MPa



550 MPa



600 MPa

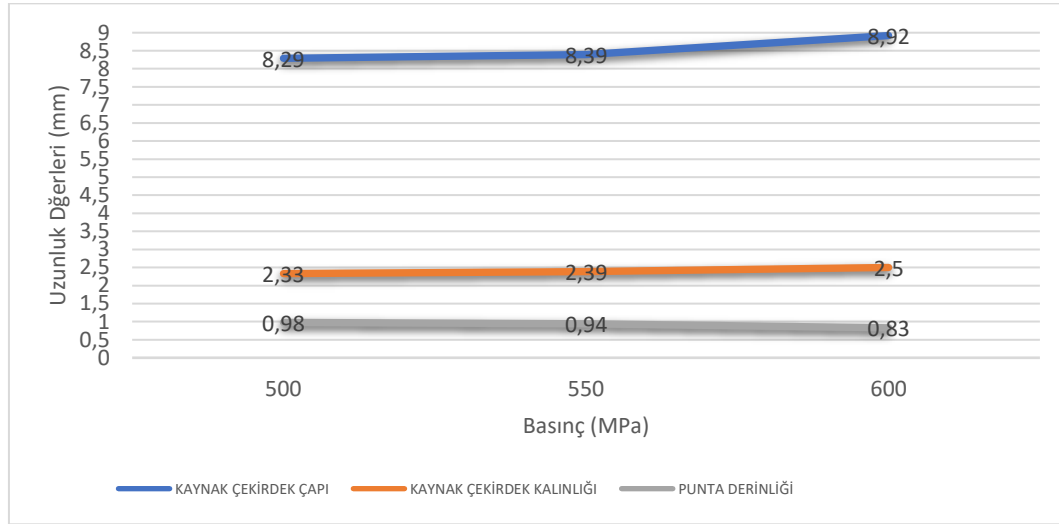


Şekil 6.8. a) Ana metal b) Geçiş bölgesi c) Kaynak çekirdeği

Toz metal numunelerin nokta direnç kaynağı sırasında gözeneklerin akıma karşı gösterdiği dirençten dolayı toz metal numunelerin ısı iletimi düşük, elektrotlar arasındaki parçada ısı yoğunluğunun artması ayrıca düşük basınçlar da gözeneklerin fazla olması sebebiyle nokta kaynak basıncı elektrot çenelerinin malzemeye iz oluşturma derinliğini artırmıştır. Aynı zaman da punta genişliği ve birleşme genişliği gibi değerleri değiştirmiştir. Bu değerler Çizelge 6.2 ve Şekil 6.9’da verilmektedir.

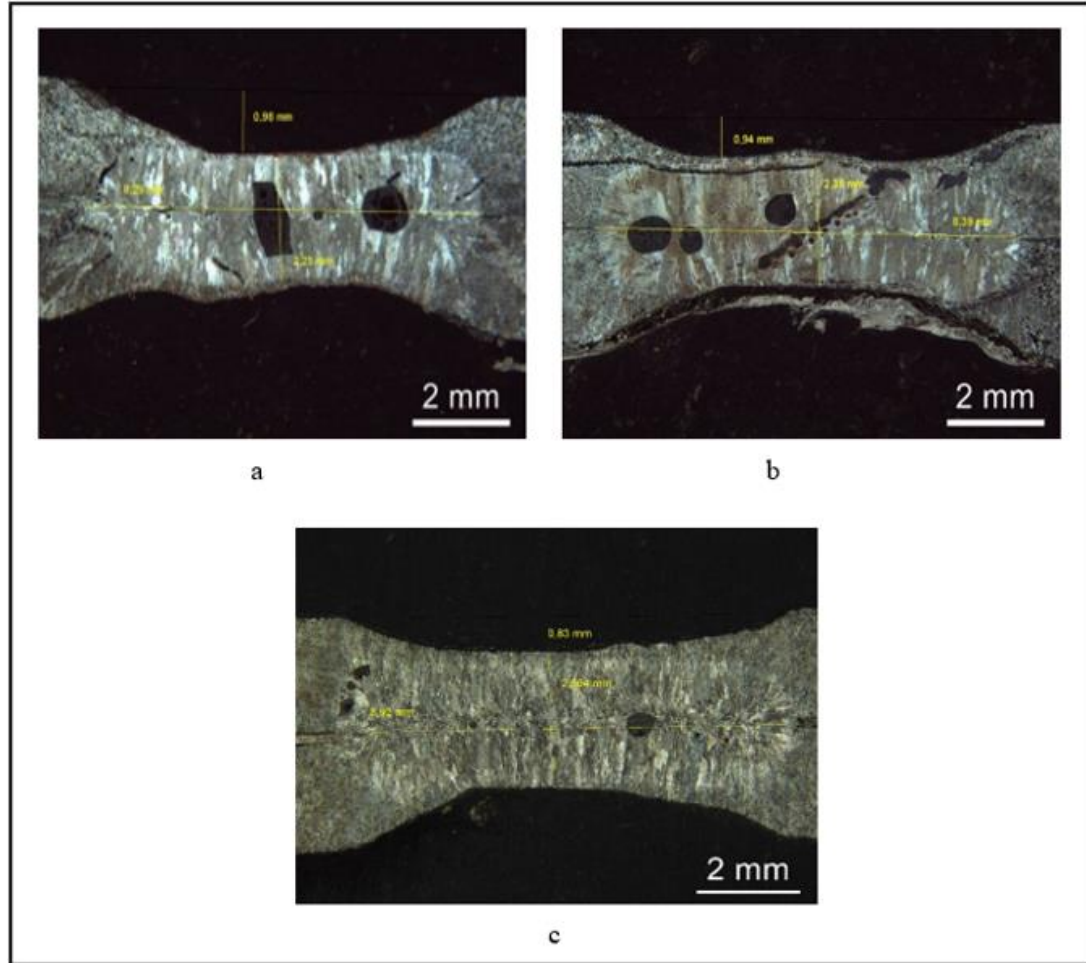
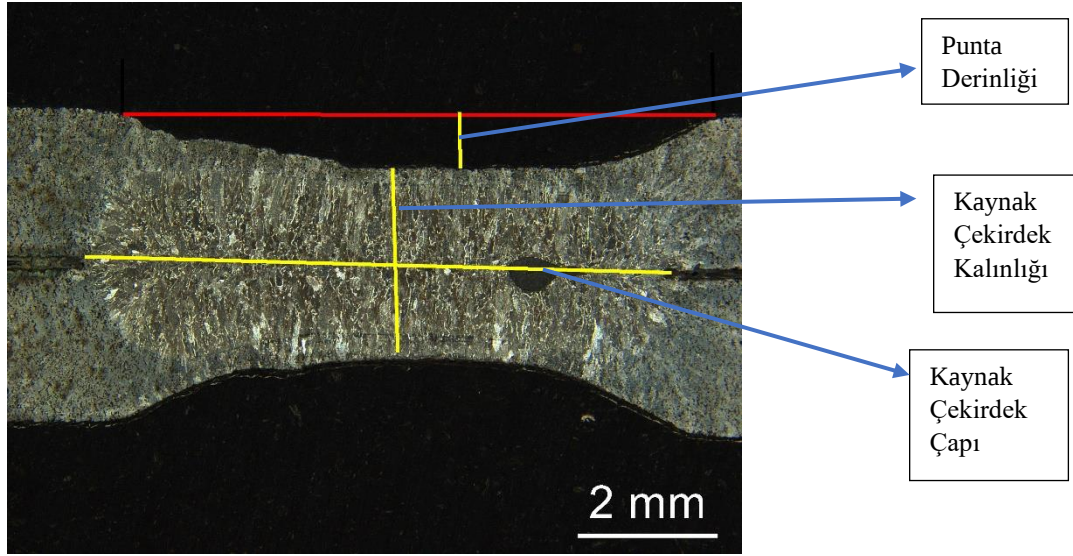
Çizelge 6.2. Kaynak bölgesi inceleme sonuçları

Basınç (MPa)	Kaynak Çekirdek Çapı (mm)	Kaynak Çekirdek Kalınlığı (mm)	Punta Derinliği (mm)
500	8,29	2,33	0,98
550	8,39	2,39	0,94
600	8,92	2,50	0,83



Şekil 6.9. Kaynak bölgesi inceleme grafiği

Artan presleme basıncı gözenekliliği azalttığından dolayı kaynak basıncıyla deformasyon oranı 500 MPa preslenen numunelerde daha yüksek (0,98 mm), 550 de 0,94 mm ve gözenekliliğin en düşük olduğu yüksek presleme basıncı olan 600 MPa da en düşük (0,83 mm) deformasyon miktarı ölçülmüştür.



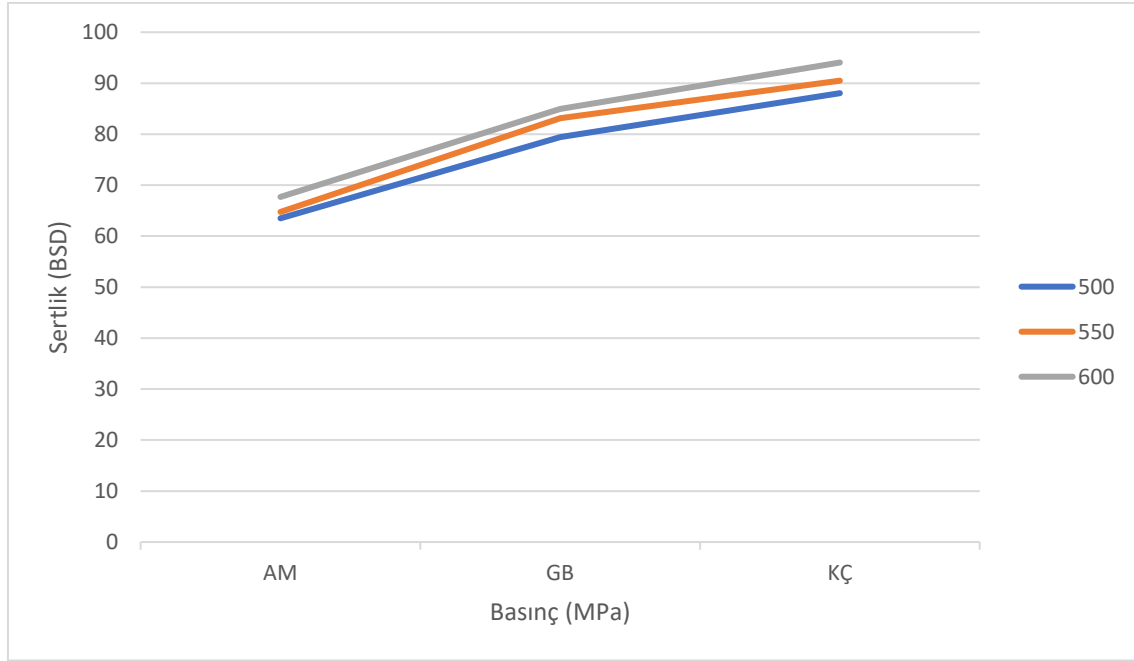
Şekil 6.10. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa Kaynak bölgesi incelemesi

6.4. Sertlik Sonuçları

Toz metal numunelerin gözenekli yapıda olmaları nedeniyle sertlik ölçümleri Brinell sertlik yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Çünkü; Vickers ya da Rockwell gibi sivri uçlu sertlik ölçüm yöntemlerinde gözeneklere veya gözenek üstü bölgelerde sivri uçlu ölçüm yöntemleri hatalı ölçümler vermektedir. Küresel uçlu Brinell sertlik yönteminde ise birden fazla ölçüm alınarak birbirlerine yakın değerdeki üç sertliğin ortalaması alınmıştır. Buna göre toz metal numunelerin esas metal bölgesi 500 MPa' da 63,5 BSD iken 550 MPa' da 64,75'e, 600 MPa' da 67,69'e yükselmiştir. Buda artan basınçla birlikte toz metal malzemelerde artan yoğunluğun sertlik artışına sebep olduğunu göstermektedir. Tüm basınçlar için sertlik değerleri geçiş bölgesi ve kaynak çekirdek metalinde sertlikte artışa yol açtığı Çizelge 6.3'te de görülmektedir. Kaynak çekirdek metalindeki sertlik artışı elektrotlar arası akıma metalin gösterdiği dirençle açığa ısının etkisi ve elektrot baskı kuvvetiyle plastik deformasyon kolaylaşması sonucu yoğun bir çekirdek metali oluşması ile açıklanabilir. Nitekim ana metal yoğunluğu kaynak çekirdek metali sertliğin oluşumunda da yoğunluk artışındakine benzer etki yaparak 500 MPa' dan 550 MPa' a artışta %1,9 iken, 550 MPa' dan 600 MPa' a artış %4,3 sertlik artışı meydana gelmiştir. Çekirdek metalinden geçiş bölgesine doğru yayılan ısı numunelere ikinci sinterleme etkisi yaparak yoğunlaşma ve dolayısı ile sertlik artışına sebep olduğu gözlenmiştir. Sertlik değerlerinde gözlenen değişim Çizelge 6.3' te verilmiştir [31,35].

Çizelge 6.3. Basınçlara göre ortalama sertlik değerleri (BSD)

Basınç (MPa)	Ana metal (BSD)	Geçiş bölgesi (BSD)	Kaynak çekirdeği (BSD)
500	63,50	79,41	88,044
550	64,75	83,12	90,495
600	67,69	84,93	94,053

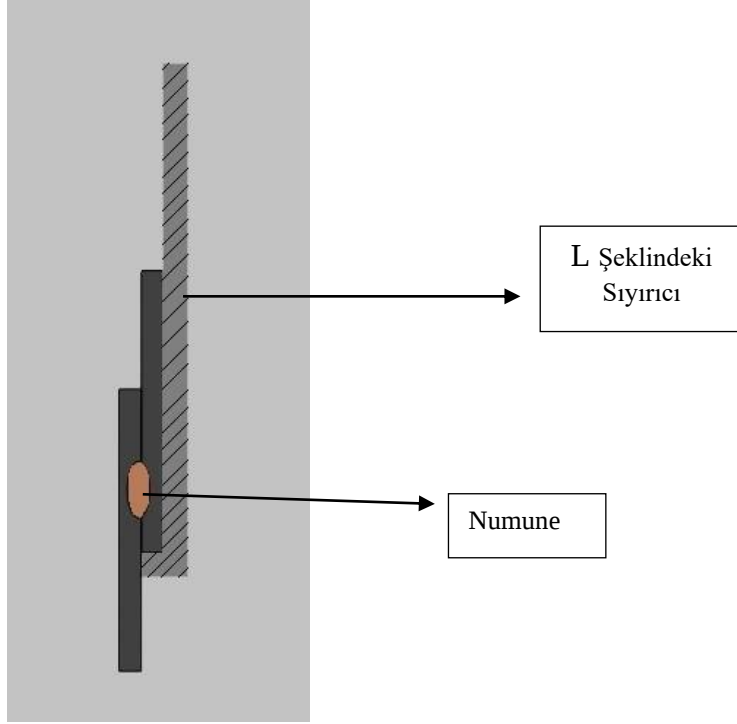


Şekil 6.11. Basınlara göre ortalama sertlik grafiği

6.5. Sıyırma Testi Sonuçları

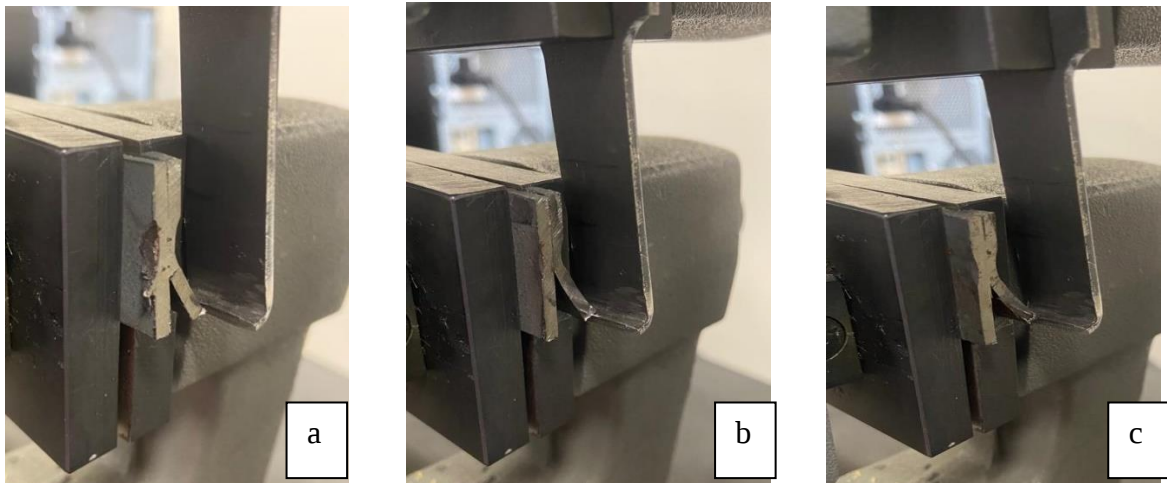
25x25x2 mm boyutlarında olan toz metal malzemeler farklı basınçlarda preslendikten sonra sinterlenmiş ve sinterlenmiş numuneler kaynak birleşme dayanımını belirlemek adına Şekil 6.9 'da görüldüğü gibi sıyırma testine tabi tutulmuşlardır.

Sıyırma testinde numunemizi çekme cihazının alt koluna sabitleyip üst koluna L şeklindeki sıyırma aparatımız takılmıştır. Daha sonra L şeklindeki sıyırma aparatını numunemize takarak çekme işlemi yapılmaya başlandı. Çekme işlemi yavaş bir şekilde gerçekleştirilirken numunenin kaynak bölgesine geldiği noktada kesme işlemi gerçekleşti.

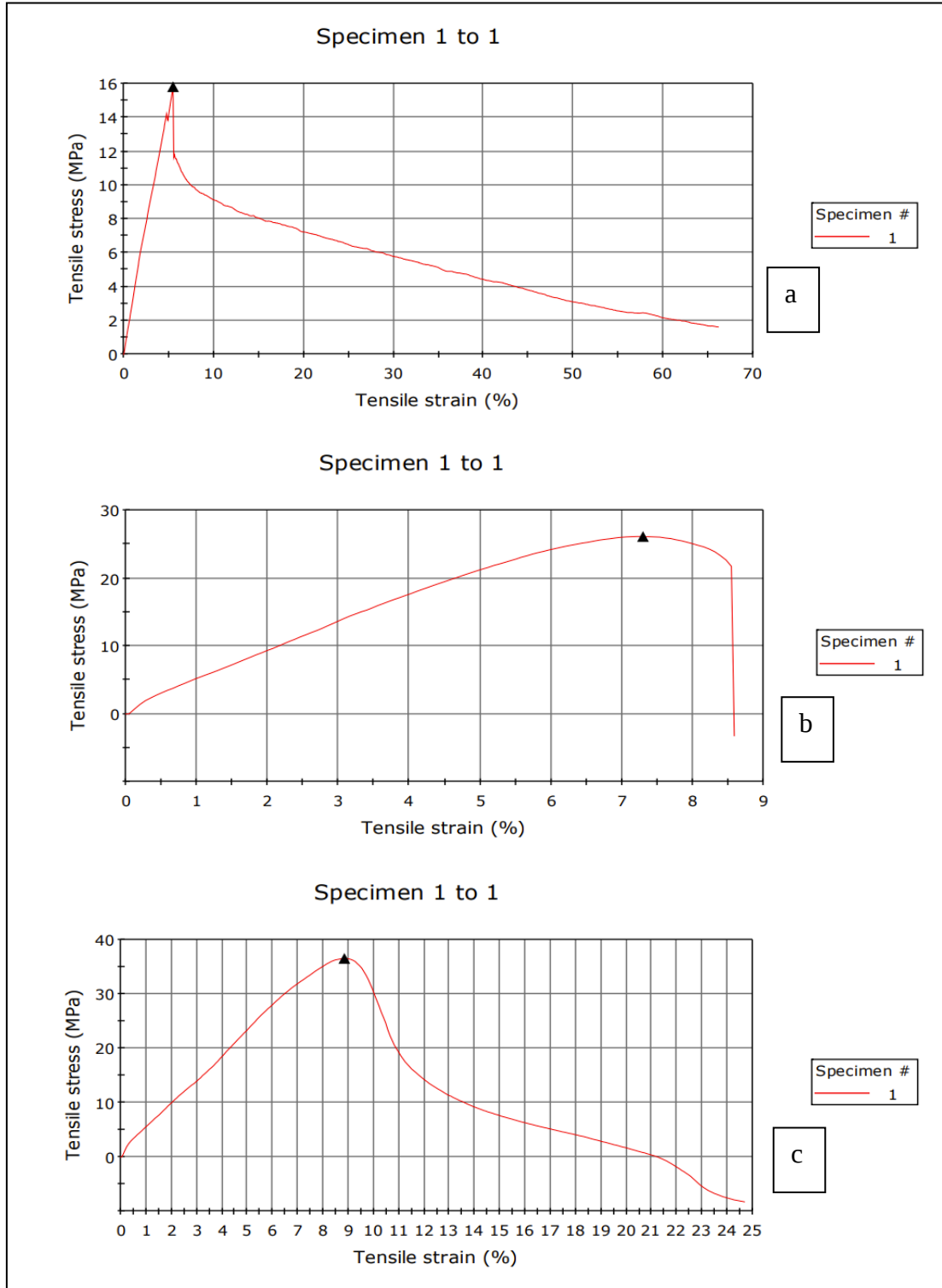


Şekil 6.12. Sıyırma testinin teknik resmi

Şekilde görüldüğü gibi L şeklindeki sıyırma aparatı birleşme numunesini birleşme bölgesinden ayırmaya zorlarken birleşme bölgesinden kopmayıp, hemen birleşme bölgesinin başlangıcından kopmuş olması (esas metalden) birleşme bölgesinin dayanımının esas metal dayanımından yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 6.13. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa



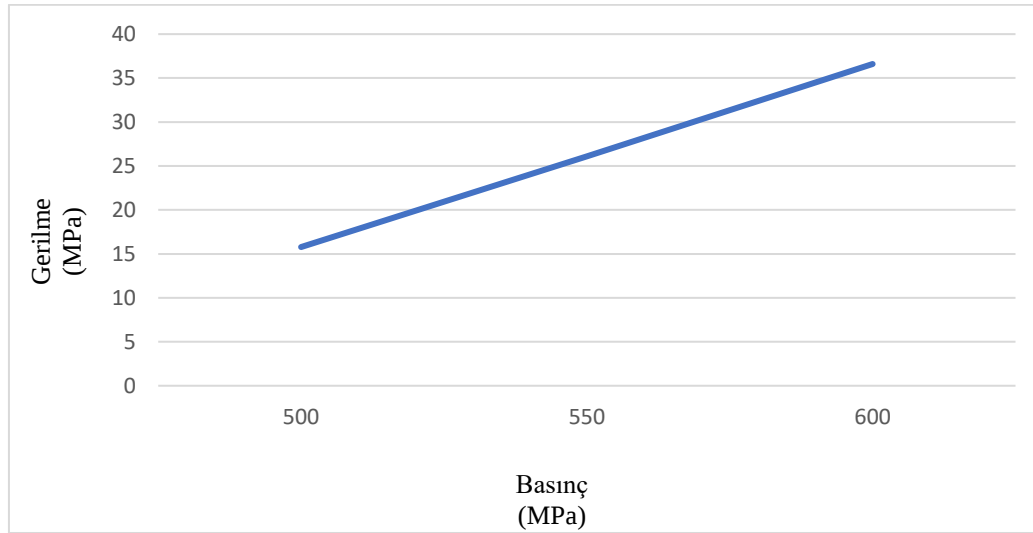
Şekil 6.14. a) 500 MPa b) 550 MPa c) 600 MPa Çekme gerilimi grafikleri

Şekil 6.14' de verilen grafiklerden anlaşılacağı gibi düşük yoğunluklu (500 MPa- %92,6) numunede 15,78 MPa' da ve yaklaşık %6 uzamada koparken, 550 MPa' da %95,56 yoğunlukta 26,09 MPa' da yaklaşık %7,5 uzama ile koptuğu görülmektedir. 600 MPa %98,65 yoğunlukta 36,5 MPa' da ve yaklaşık %9 uzama ile koptuğu görülmektedir. Bu da

artan yoğunluğun numunenin sıyırma dayanımı ve uzamayı artırdığı şeklinde yorumlanmaktadır. Her üç durumda da kaynak bölgesinden kopma görülmemiştir [33,35].

Çizelge 6.4. Sıyırma testi sonuçları

Basınç (MPa)	Maksimum Yük (Sıyırma Yüğü) (N)	Maksimum Çekme Gerilmesi (Sıyırma Gerilimi) (MPa)
500	556,27	15,78
550	787,16	26,09
600	857,19	36,50



Şekil 6.15. Sıyırma testi sonucu elde edilen gerilim-basınç grafiği

Tez sonuçlarında her üç basınçta preslenen numuneler de birleşme noktasından değil birleşme noktası sınırından (ITAB) toz metal malzemede kırıldıkları görülmüştür. Burada 500 MPa da preslenen numunenin 15,78 MPa, 550 MPa da preslenen numunenin 26,09 MPa da ve 600 MPa da preslenen malzemenin 36,58 MPa da kırıldıkları çekme uzama eğrilerinin grafiklerinden de görüldüğü gibi anlaşılmıştır. Bu değerler birleşme dayanımından ziyade toz metal numunelerin artan preslemeyle sıyırma dayanımlarının arttığı şeklinde yorumlanabilir. Çünkü her üç numune de kaynaktan kopmamış ITAB' da esas metalden kopmuştur.

7. SONUÇLAR

Toz metalurjisinin endüstriyel kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kullanım alanının artması toz metal malzemelerin yapı-özellik ilişkilerinin araştırılıp belirlenmesine bağlıdır. Bu sebeple bu çalışmada toz metal levha malzemelerin hem üretimi gerçekleştirilmiş hem de levha malzemelerin daha önce çalışılmamış nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği ve yapısal özelliklerin kaynaklanabilirliğe etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmanın sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Toz metalurjisi yöntemi ile homojen yoğunluk dağılımlı levha malzemelerin üretilbileceği
2. Toz metal Fe malzemeler nokta direnç kaynağı ile birleştirilebildikleri görülmüştür.
3. Toz metal malzemelerin presleme basınçlarının gözeneklilik, ham yoğunluk ve sinterleme yoğunluklarını etkiledikleri görülmüştür.
4. Nokta direnç kaynağı sırasında uygulanan baskı kuvvetinin düşük yoğunluklu numunelerde daha fazla plastik deformasyona sebep olduğu gözlenmiştir.
5. Sertlik değerlerinin artan presleme basıncıyla esas metalde, geçiş bölgesinde ve kaynak metalinde artış gösterdiği, artış oranlarının düşük yoğunluklu numunelerde yüksek yoğunluklu numunelerde daha az olduğu görülmüştür.
6. Birleşme bölgesinin birleşme dayanımının ölçülmesi amacıyla yapılan sıyırma testlerinde tüm numunelerin esas metalden ITAB bölgesinden koptukları görülmüş olup bu değerlerin presleme basıncına göre farklılıklar gösterdiği ve artan presleme basıncıyla sıyırma dayanımlarının arttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Kurt, A. (1996). *Toz Metalden Üretilen Bronz Yatağın Düşük Karbonlu Çeliğe Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Ana Bilim Dalı, Elâzığ, 4-8.
2. Günebakmaz, S. (2007). *Toz Metalurjisi Yöntemi ile İNCONEl 718 Süperalaşımının Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-8.
3. Avcı, H. (2018). *Toz Metal Bakır ve Paslanmaz Çeliğin Mikrodalga Sinterleme ile Birleştirilebilirliği*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-36.
4. Panda, A., Dobránsky, J., Jančík, M., Pandová, I. and Kačalová, M. (2018). Advantages and effectiveness of the powder metallurgy in manufacturing technologies. *Metalurgija*, 57(4), 353-356.
5. Ocak, A. A. (2019). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen AZ91 Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerine Alaşım Elementlerinin Etkisinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, 16-26.
6. Selcuk, C., Bond, S. and Woollin, P. (2010). Joining processes for powder metallurgy parts: a review, Powder Metallurgy. Brunel Innovation Centre, UK: Woodhead Publishing Limited, 53(1), 7-11.
7. Correa, E.O. (2011). Weldability of Iron Based Powder Metal Alloys Using Pulsed GTAW Process. *Arc Welding*. Brazil: Published by InTech, 7(6), 109-111.
8. Almus, Z. (2006). *Nokta Direnç Kaynağında Ara Bağlayıcının Birleşme Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-63.
9. Tezcan, T. (2017). *Elektrik Direnç Kaynağı*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1.
10. Yavuz, B. (2015). *Nokta Direnç Kaynağında Isıl ve Yapısal Analizlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-11.
11. Ülküseven, R.O. (2019). *Farklı Karbür Fazı İçeren Partikül Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 17-22.
12. Uysal, M. (2016). *Mekanik Alaşımlama Süreçleriyle Mos2-Grafit Katı Yağlayıcı Katkılı Fe-C Esaslı Kompresör Parçalarının Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 27-40.

13. Özgün, Ö. (2007). *Toz Metalurjisi ile Üretilen Alaşımli Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 4-25.
14. Kurt, A. (1992). *Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-57.
15. Gökçe, A. (2013). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 7,12,17-25.
16. Bostancıoğlu, S. (2015). *Toz Metalurji Yöntemi ile Tungsten Katot Üretimi ve Sinterlenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-19.
17. Gökçe, A., Fındık, F., Kurt, A.O. (2017). Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri. *Mühendis ve Makine*. 58(686), 21-47.
18. Taşdöğen, H. (2019). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Hazırlanan Çelik Malzemede Mikroyapı ve Darbe Tokluğunun İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 3-16.
19. Ayata, A. (2014). *Toz Metal Alüminyum Malzemelerin Mikrodalga Enerjisi ile Sinterlenebilirliğinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-33.
20. Gölbaş, Z. (2014). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Gözenekli Titanyum Esaslı İmplant Malzemelerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 18-21.
21. Hacıoğlu, T. (2010). *AlB4Cp Kompozitlerinin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 23-31.
22. Ulutaş, A. (2006). *Değişik Oranlardaki Cu, FeCr VE FeMn Alaşımlarının Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 3-4, 19-31.
23. Karaman, Y. (2011). *Toz Metalurjisi Yöntemi ile MgO Takviyeli Al Esaslı Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi FEN Bilimleri Üniversitesi, Kırıkkale, 14-44.
24. Ayyıldız, C. (2008). *Demir (Fe) Esaslı Toz Metal (TM) Parçaların Farklı Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilmesinde Kaynak Bölgesinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 26-50.
25. Hamill. J.A., Jr. (1993). P/N Joining Processes, Materials And Techniques. *Kaynak Günlüğü*, 72(2), 3,4.

26. Gürsel, A. (2010). *Elektrik Ark Kaynaklarından Yayılan Optik Radyasyon Değerlerinin Analizi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 55-62.
27. Erçetin, A. (2015). *Direnç Kaynağında Kullanılan W+Cu+(X) Elektrotunun Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi, Karakterizasyonu ve Mikroışlenebilirliği*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 13-14, 26-38.
28. Bozoğlu, Z. (2015). *Elektro Kivılcım Kaynak Yöntemi ile Demir Esaslı ve Demir Dışı Metallerin Kaynaklanabilirliği*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 16.
29. Çakır, M. (2007). *Toz Metal Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Kaynaklanabilirliği*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi Metal Eğitimi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 30-34.
30. Esendir, E. (2019). *Farklı Metallerin Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6-26, 49-53.
31. Erik, M. (2010). *Farklı Kalınlıklarda Galvaniz Kaplanmış Çelik Sacların Nokta Direnç Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-57.
32. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı. (2012). *Metal Teknolojisi-Elektrik Direnç Kaynağı*. Ankara: T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, 3-5.
33. Aras, S. (2016). *Nokta Direnç Kaynağı Uygulanan Farklı Çeliklerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 3-33.
34. Tekin, G. (2019). *Otomotiv Sektöründe Kullanılan Elektrik Direnç Kaynağına Alternatif Lazer Nokta Kaynağının Mekanik ve Termal Etkisinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 3-9.
35. Ertek Emre, H. (2016). *Tripp800 Çeliğinin Nokta Direnç Kaynak Kabiliyetinin Araştırılması*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 18-24.
36. Aslanlar, S., Ogur, A., Ozsarac, U., Ilhan, E. and Demir, Z. (2007). Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding. *Elsevier*. 28, 2–7.
37. Kang, Z., Ping, Y. (2019). Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. *Elsevier*. 124, 170-198.
38. Hayat, F. (2005). *Çift -Fazlı Çeliklerin Nokta Direnç Kaynağında MHO ile Kaynak Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi*. Yayınlanmamış Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 28-50.

39. Mutlusu, Ö., Ertan, R. (2020). Nokta direnç kaynak yöntemi ile alüminyum ve titanyum alaşımı sacların IF çelik saclarla kaynak kabiliyetinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1003-1013.
40. Kaya, Y. (2012). *Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 25-55.
41. Kocabekir, B. (2006). *Isı Girdisi ve Kaynak Atmosferinin 316L Paslanmaz Çeliklerin Direnç Kaynak Birleştirmelerine Etkisi*. Yayınlanmamış Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 37-49.
42. Aksoy, H.N. (2010). *Alışılmış ve İnverter Tipi MIG/MAG Kaynak Makinaları ile Yapılan Kaynak Dikişlerinin Çeşitli Yönleri ile Karşılaştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 14.
43. Göktaş, M. (2020). *Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilmiş DP1000 Çeliğinin Farklı Yüklerdeki Yorulma Ömrüne Korozi Ortamın Etkilerinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Karabük, 12-28.
44. Akgül, K. (2017). *Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kaynak Elektrot Çeşitlerinin, Sac Kalınlıklarının ve Kaynak Kuvvetinin Kullanılan Kaynak Enerjisi ile Arasındaki İlişkinin Modellenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 4-29.
45. Anık, S. (1983). *Kaynak Teknolojisi El Kitabı*. Ergür Matbaası. Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, 24.
46. Karcı, F. (2008). *Soğuk Deformasyon ve Kaynak Isı Girdisinin AISI 304 Paslanmaz Çelik Direnç Kaynak Kalitesine Etkisi*. Yayınlanmamış Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 37-43.
47. Aydeniz, O. (2010). *Malzeme Bileşimi ve Boyutunun Direnç Kaynağı Kalitesine Etkisinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 54-62.
48. Haga, H., Aoki, K. and Sato, T. (1981). The Mechanisms of Formation of Weld Defects in High-Frequency Electric Resistance Welding. *Welding Research Supplement*. 104-105.
49. İnternet: Miller Handbook for Resistance Spot Welding. (August, 2018). *Guidelines For Resistance Spot Welding*, 10. Web: <https://www.millerwelds.com/-/media/millerelectric/files/pdf/resources/resistance.pdf> Son Erişim Tarihi: 23.12.2022.
50. Wan, X., Wang, Y., Fang, C. (2014). Welding Defects Occurrence and Their Effects on Weld Quality in Resistance Spot Welding of AHSS Steel. *ISI International*, 54(8), 1883–1889.
51. Erman, S. (2019). *Toz Metal Çeliklerde Mekanik Alaşımlamanın Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 48-52.

52. Summerville, C., Compston, P. and Doolan, M. (2019). A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques. *Procedia Manufacturing*, 29, 305-312.
53. İnternet: DPN. (Nisan, 2021). *Çekme Testi nedir?*. Web: <https://dpn.com.tr/cekme-testi-nedir/> Son Erişim Tarihi: 23.12.2021.
54. Tümer, H. (2007). *Optimum Preform And Die Shape Design For Improved Hardness Distribution In Cold Forged Parts*. Unpublished Degree of Master of Science, Bogazıcı University Mechanical Engineering Institute Of Science And Technology, İstanbul, 10.
55. Ben Saoud, F. (2020). *Prediction of Creep Model Parameters of A Low Melting Point Alloy By Using Hardness Test*. Unpublished Master's Thesis, In The Department of Manufacturing Engineering Atılım University, Ankara, 28,29.
56. Al-Khafaji, L. (2020). *The Effect of Welding Methods In The Weldment Design on The Distortions, Hardness And Stresses Generation of Steel Type S355J2C+N*. Unpublished Doctor of Philosophy, University of Turkish Aeronautical Association, Mechanical and Aeronautical Engineering, 21,64.
57. İnternet: Dr. J. A. Brinell. (1900). Sertlik Testleri (hardness tests). *Prof. Dr. Bilsen Beşergil Blog*. Web: <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/sertlik-testleri-hardness-tests.html> Son Erişim Tarihi: 23.12.2021.
58. İnternet: Matmatch. Comparing Hardness Tests: Vickers, Rockwell, Brinell, Mohs, Shore and Knoop. Web: <https://matmatch.com/learn/process/hardness-comparison> Son Erişim Tarihi: 23.12.2021.
59. Çelikadam, M. (2019). *Girdap Akımları Temelli Bir Hata Tespiti Yaklaşımının Gerçek Zamanlı Gerçekleşmesi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 3-6.
60. İnternet: Höganäs Handbook for Sintered Components. (2013). Production of Sintered Components 7(4), 3,10-11. Web: <https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/handbooks---all-documents/handbook-1-material-and-powder-properties-december-2013-0674hog-interactive.pdf> Son Erişim Tarihi: 06.06.2022.



GAZİ GELECEKTİR..