

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR KOMPRESÖR GÖVDESİ İMALATININ  
TOZ METALURJİSİ VE DİFÜZYON KAYNAĞI  
YÖNTEMLERİ UYGULANARAK  
OPTİMİZASYONU**

**Yadullah BABAYEV**

**Ocak, 2007  
İZMİR**

**BİR KOMPRESÖR GÖVDESİ İMALATININ  
TOZ METALURJİSİ VE DİFÜZYON KAYNAĞI  
YÖNTEMLERİ UYGULANARAK  
OPTİMİZASYONU**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi**

**Makina Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon İmalat Anabilim Dalı**

**Yadullah BABAYEV**

**Ocak, 2007**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**Yadullah BABAYEV**, tarafından **Prof. Dr. Süleyman KARADENİZ** yönetiminde hazırlanan “**Bir Kompresör Gövdesi İmalatının Toz Metalurjisi ve Difüzyon Kaynağı Yöntemleri Uygulanarak Optimizasyonu**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Süleyman KARADENİZ

Yönetici

Prof. Dr. Onur SAYMAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Tevfik AKSOY

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Öncelikle bana tüm Doktora eğitimi boyunca yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Süleyman KARADENİZ' e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Sayın Prof. Dr. Karadeniz sadece tez konusu içerisinde değil aynı zamanda her konuda bana gerekli olan her türlü bilgi ve yardımını esirgemiştir.

Tez konumda bilgilerini benden esirgemeyen 2. tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Arif MEMMEDOV'a ve Sayın Prof. Dr. Remzi VAROL'a teşekkür ederim.

Deney numunelerinin üretilmesinde her türlü yardım ve desteğini benden esirgemeyen Azerbaycan Surahani Petrol Makinaları Yapımı Fabrikası bünyesindeki SPLAV LTD.'nin Genel Müdürü Sayın Memmedeli ABİDİNOV'a ve diğer çalışanlarına teşekkür ederim.

SEM analizlerinin yapılması sırasında göstermiş oldukları yardım ve desteklerden dolayı Sayın Prof. Dr. Kazım ÖNEL'e ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Yine bu analizler sırasında benimle birlikte çalışan Sayın Araş. Gör. Esra DOKUMACI'ya teşekkür ederim.

Doktora eğitim süresince hem maddi hem manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli arkadaşlarım Sayın Araş.Gör. Fatih KAHRAMAN'a ve doktora öğrencisi Adalet İBADOV'a teşekkürlerimi sunarım.

Hem numunelerin deneyler için hazırlanması sırasında ve hem de diğer konularda bana göstermiş olduğu tüm destek ve yardımlarından dolayı ağabeyim Sayın Mak. Tek. Faik SOYSAL'a teşekkür ederim. Ayrıca Sayın Mak. Tek. Ahmet YİĞİT'e numunelerin hazırlanması sırasında göstermiş olduğu sabır ve iyi niyet için teşekkür ederim.

Eğitim süresi boyunca hem maddi ve hem de manevi desteğini benden esirgemeyen canım aileme ve özellikle beni sabır ile bekleyen sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm doktora eğitimim boyunca bana çeşitli yardımlarda bulunan ve destek olan adlarını yazamadığım diğer tüm arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Yadullah BABAYEV

# BİR KOMPRESÖR GÖVDESİ İMALATININ TOZ METALURJİSİ VE DİFÜZYON KAYNAĞI YÖNTEMLERİ UYGULANARAK OPTİMİZASYONU

## Öz

Karmaşık şekilli makina parçalarının geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi sırasında imalat zorluğu ve malzeme kaybı gibi olumsuz faktörlerle karşılaşmaktadır. Bu problemlerin çözümü için toz metalürjisi ve difüzyon kaynağı yöntemlerinin kullanılması avantaj sağlamaktadır. Toz metalürjisi son dönemlerde sanayide geniş bir şekilde uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, halen dökme demirden üretilmekte olan döner rotorlu hermetik rotasyon kompresörleri ana elamanlarından olan kompresör gövdesinin imalatının toz metalürjisi ve difüzyon kaynağı yöntemleri uygulanarak, gövde imalatının optimizasyonuna çalışılmıştır. Karmaşık şekle sahip gövde, iki parçaya (çevrelenen ve çevreleyen parça olarak) ayrılmış, çevrelenen parça malzemesi olarak Fe-Cu-C toz metal karışımı ve çevreleyen parça malzemesi olarak da Fe-Zn-C toz metal karışımı kullanılmıştır. Gövdenin toz metalürjisi ve difüzyon kaynağı yöntemleri kullanılarak elde edilmesi; soğuk presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak incelenmiştir. Araştırmada soğuk presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin gövdenin boyutsal özelliklerine, mekanik özelliklerine, iç yapısına ve kaynaklı birleştirmeye etkisi irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** toz metalürjisi, difüzyon kaynağı, kesme mukavemeti

# OPTIMIZATION OF PRODUCTION OF A COMPRESSOR BODY BY USING METHODS OF POWDER METALLURGY AND DIFFUSION WELDING

## ABSTARCT

Different problems such as production difficulties and material loss was occurred during the production of complicated machine parts with conventional methods. For solving of these problems, powder metallurgy and diffusion welding methods are using because of some advantages. Powder metallurgy is recently used widely in industry.

In this study, it was investigate of the optimization of the manufacturing of the bodies which is a main part of rotating rotor hermetik rotation compressors which are produced currently from cast iron by powder metallurgy and diffusion welding methods. The complicated body shape was divided into two parts, as surrounding and surrounded parts. Fe-Cu-C powder metal mixture was used as surrounded part material and Fe-Zn-C powder metal mixture was used as surrounding part material. Production of the body by using powder metallurgy and diffusion welding methods was investigated by various parameters such as cold press compression, sintering temperature and time. During the study, the effects of cold press compression, sintering temperature and time on dimension, mechanical properties, internal structure and joining of the body were examined.

**Key words:** powder metallurgy, diffusion welding, cutting resistance

## İÇİNDEKİLER

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTARCT .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi

### **BÖLÜM BİR– GİRİŞ..... 1**

1.1 Giriş.....	1
1.2 Çalışmanın Amacı .....	3

### **BÖLÜM İKİ– ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR..... 5**

2.1 Kompresörün Konstrüksiyonu ve Kompresör Gövdesinin Analizi .....	5
2.2 Toz Metalürjisi ve Difüzyon Kaynağı Yöntemleri Kullanılarak Gövdenin Elde Edilmesi .....	7
2.3 Toz Metalürjisi .....	9
2.3.1 Toz Metalürjisinin Tanımı.....	9
2.3.2 Toz Metalürjisinin Avantajları .....	12
2.3.3 Toz Metalürjisinin Dezavantajları .....	13
2.3.4 Toz Metal Parçaların Özellikleri .....	13
2.3.5 Toz Üretim Yöntemleri .....	15
2.3.5.1 Atomizasyon .....	15
2.3.5.2 Doğrudan İndirgeme .....	16
2.3.5.3 Öğütme.....	16
2.3.5.4 Elektrokimyasal Yöntemler .....	17
2.3.5.5 Sıvı veya Gazdan Çökeltme.....	17
2.3.6 Toz Metalürjisi Yönteminin Aşamaları .....	17
2.3.6.1 Karıştırma .....	17
2.3.6.2 Presleme Teknikleri .....	18
2.3.6.2.1 Metal Kalıplarda Presleme.....	19

2.3.6.2.2 Metal Tozlarının Haddelenmesi.....	20
2.3.6.2.3 İzostatik Presleme.....	21
2.3.6.2 Sinterleme.....	23
2.3.6.3.1 Sinterleme Süresi, Sıcaklığı ve Atmosferi.....	24
2.3.6.3.2 Sinterleme Fırınları.....	25
2.3.7 Demir Esaslı Toz Malzemeler.....	25
2.4 Difüzyon Kaynağı.....	33
2.4.1 Tanım.....	33
2.4.2 Difüzyon Kaynağı Mekanizması.....	35
2.4.3 Difüzyon Kaynağına Etki Eden Faktörler.....	37
2.4.3.1 Kaynak Sıcaklığı.....	38
2.4.3.2 Kaynak Süresi.....	39
2.4.3.3 Kaynak Basıncı.....	41
2.4.3.4 Kaynak Ortamı.....	43
2.4.3.5 Yüzey Durumu.....	43
2.4.4 Difüzyon Kaynağı Yapılan Malzemeler.....	44
2.4.5 Difüzyon Kaynağı Uygulama Şekilleri ve Alanları.....	45
2.4.6 Toz Metal Malzemelerin Difüzyon Kaynağı.....	47
<b>BÖLÜM ÜÇ– DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>53</b>
3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	53
3.2 Numune Üretme Hazırlık Çalışmaları.....	54
3.2.1 Toz Miktarının Hesaplanması.....	54
3.2.2 Sıkıştırma Kuvvetinin Hesabı.....	55
3.2.3 Toz Karışımının Hazırlanması.....	56
3.2.4 Toz Metal Numunelerin Soğuk Preslenmesi.....	57
3.2.5 Sinterleme ve Difüzyon Kaynağı İşleminin Uygulanması.....	59
3.3 Mekanik Deneyler.....	61
3.3.1 Kesme Mukavemetinin Tayini.....	61
3.3.2 Sertlik Deneyi.....	61
3.3.3 Aşınma Deneyi.....	62



3.4 Metalografik İnceleme .....	63
3.5 SEM (Scanning Electron Microscopy) Analizi.....	63
<b>BÖLÜM DÖRT– DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>64</b>
- 4.1 Boyutsal Değişim .....	64
4.2 Mekanik Deneyler .....	67
4.2.1 Kesme Mukavemetinin Tayini .....	67
4.2.2 Sertlik Muayenesi .....	73
4.2.3 Aşınma Muayenesi .....	81
4.3 Metalografik Muayene .....	88
4.4 SEM (Scanning Electron Microscopy) Analizi.....	101
<b>BÖLÜM BEŞ– SONUÇLAR .....</b>	<b>106</b>
- 5.1 Sonuçlar.....	106
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>111</b>

# BÖLÜM BİR

## GİRİŞ

### 1.1 Giriş

Teknolojik gelişmelere paralel olarak, sanayinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme bilimindeki gelişmeler de artmıştır. Teknolojik çalışmalarda kullanılan hammadde kaynaklarının sınırlı olması ve bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal açılardan yetersizliği, malzeme bilimcilerini yeni malzemeler geliştirmeye zorlamaktadır (Çalgülü, Dikbaş ve Gür, 2006). Malzeme üretimindeki gelişmeler farklı uygulama alanları için farklı malzemeler geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu farklı özellikteki malzemelerden birisi de toz metalürjisi ile üretilen makine parçalarının malzemesidir. Toz metalürjisi, istenilen kimyasal kompozisyonu verecek şekilde karıştırılmış metal tozlarının oda sıcaklığında, üretilen parça şekli ve boyutlarına sahip kalıp içinde sıkıştırılarak şekillendirme ve ardından da yüksek sıcaklıkta sinterleme ile gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir (Meriç, Atik, ve Türüdü, 2005).

Toz metalürjisi, ana imalat yöntemleri olan döküm, plastik şekil verme, kaynak ve talaşlı imalata göre daha farklı bir imalat yöntemidir ve kendine has özellikleri vardır. Bu özellikler, üretimi zor olan alaşımları daha kolay üretme, karmaşık şekilli parçaların imalat kolaylığı, yoğunluk kontrolü ve ekonomiklik gibi özellikleridir. Toz metalürjisi ile üretim, genelde kalite ve maliyet açısından diğer yöntemlerle üretilmeyen parçaların üretiminde uygulama alanı bulur (Babayev, Karadeniz, ve Memmedov, 2005). Toz metalürjisi ile elde edilmesi düşünülen bir parçanın malzemesi ve elde edilecek parça, kalite ve maliyet açısından diğer yöntemlerdekiyle karşılaştırılmalı ve elde edilen sonuca göre toz metalürjisinin uygulanıp, uygulanmamasına karar verilmelidir. Toz metalürjisi teknolojisi, makine ve elemanlarının yapımında istifade edilen önceki teknolojilerden farklıdır. En önemli özelliği, herhangi gerekli özellik ve şekle sahip olan ürünün neredeyse sorunsuz elde edilmesine imkan sağlamasıdır. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların

ekonomik olarak üretilebilmesi toz metalurjisini daha da cazip kılmaktadır (Federçenko ve Pugina, 1980; Radomiselskiy, 1985).

Toz metalürjisi yöntemleriyle çeşitli özelliğe sahip parçalar (ürünler) elde edilebilir. Toz metalürjisi ile üretilen parçaların kalite ve fiyatı, birinci derecede o parçanın yapı taşı olan tozların kimyasal bileşimi, metalürjik yapısı, özellikleri ve kalitesine bağlıdır. Bu yöntemle yeni teknoloji kullanılarak makina parçaları üretilmesi durumunda; ürün kalitesi, ürün maliyeti gibi bir çok farklı açıdan önemli avantajlar sağlanabilir.

Toz malzemeler içerisinde demir esaslı malzemeler önemli bir yere sahiptirler. Bu malzemelerin çeşitlerini artırmak ve uygulama alanlarını genişletmek için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerden en önemlisi, toz metalürjisinde kullanılan malzemelere çeşitli alaşım elementlerinin ilavesi ile malzemelerin alaşımlandırılarak çeşitlilik sağlanmasıdır (Skoroxod, 1995; Zavolotniy, Şevçuk, Begun, Koliniçenko, ve Varçenko, 1994). Daha karmaşık konfigürasyona ve özelliklere sahip olan parçaların üretimi; toz metalurjisinin presleme, pişirme (sinterleme) ve ısıtma işlemlerinden başka ek işlemler de gerektirir. Bu parçaların malzemelerinin fiziksel, mekanik ve kullanım özelliklerinin iyileştirilmesi için malzeme yoğunluğunun uygun şekilde ayarlanması, yeterli alaşımlamanın ve ısıtma işleminin yapılması gereklidir. Bundan başka, ergime sıcaklığı düşük olan metaller sayesinde üretilmiş parçaların gözeneklerinin doldurulmasına da ihtiyaç duyulur.

Günümüzde toz metalurjisinin temel problemlerinden biri sinterleme sırasında partiküller arasında fiziksel bağın kalitesinin yükseltilmesidir. Malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi kalitenin iyileştirilmesi ile ilgilidir (Narva, Laşkareva, Pavlov, ve Bataşev, 1988). Malzemelerin elde edilmesinde birinci derecede önemli olan tozların yüzeylerinin kimyasal olarak temizlik derecesinin yükseltilmesi ve mikro pürüzlülüğünün yok edilmesi, toz bileşiminin yeni yöntemlerle alaşımlandırılmasını gerektirir. Bunun dışında, karmaşık şekle sahip ürünlerin parçalara ayrılarak, bu parçaların ayrı parçalar halinde toz metalürjisi yöntemiyle üretilip, kaynak yöntemleriyle birleştirilerek, ürünün son şekline ve boyutlarına getirilmesi bilimsel ve teknik olarak ilgi çekicidir. Bu üretim yönteminde kimyasal

olarak farklı cins ve gözenekli malzemelerin fırın içerisinde kaynaklanma işlemlerinin tam ve doğru olarak uygulamasını gerçekleştirmek bazı sorunları beraberinde getirmektedir.

Gözeneklilik, malzemenin ısı iletkenlik ve sertleşebilirlik özelliğini değiştirmekte, yapı içerisinde kalan oksit ve empürüteler kaynak işlemi ve kaynak kabiliyetini etkilemektedir. Gözenek miktarının değişmesi ile malzemede ısı transferi de değişmektedir. Isı transferi, doğal olarak kaynak parametrelerini ve özelliklerini etkilemektedir (Meriç ve ark., 2005).

Son zamanlarda üretilen toz malzemelerden bir çeşidi bakır alaşımlı demir esaslı gözenekli malzemedir ve bu toz bileşimine grafit ilave edilerek toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanabilmektedir. Bu malzemeler, özellikle sürtünmenin önemli olduğu yerlerdeki ana elemanların üretiminde kullanılmaktadır. Buna örnek olarak, klima kompresörünün esas elemanlarından biri olan gövde verilebilir. Ancak kompresör gövdesi, karmaşık şekle sahip olduğundan, onu ister soğuk, ister sıcak presleme yöntemleri ile tozlardan kaliteli şekilde elde etmek problemlidir. Bu nedenle gövdenin, bir kaç basit parçaya ayrılıp ve bu parçaların soğuk presleme yöntemiyle üretilerek, daha sonra parçaların birleştirilip, gövdenin oluşturulması sadece fırın içerisinde difüzyon kaynağı ile mümkün olmaktadır.

Kaynak işleminin kaliteli olarak yapılması, her parça için farklı yoğunluğa ve kimyasal bileşime sahip malzemelerin seçilmesi ve üretilmesi için uygulanan teknolojik işlemlere bağlıdır. Bu çalışma, bu konuyu bilimsel olarak araştırma ve değerlendireyi amaçlamaktadır.

### **1.1 Çalışmanın Amacı**

Çalışmada, karmaşık şekle sahip makina parçaları elde etmek için yeni toz malzemelerin hazırlanması, uygun parametreler tespit edilerek fırında uygun kaynak şartlarının tespit edilmesi başlıca amaçtır. Bu amaca uygun olarak aşağıdaki esas problemler belirlenmiş ve çözülmüştür:

— Yeni, farklı yapılarda (bileşimlerde) toz karışımları hazırlanmış, incelenmiş ve onlardan basit şekilli toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen parçaların üretiminde kullanılmıştır.

— Basit şekilli parçalardan karmaşık şekilli toz metalürjisi ile üretilen parçaların elde edilmesi için fırında difüzyon kaynağı uygulanmış, uygun kaynak şartlarının belirlenebilmesi için bir çok farklı parametre kullanılarak deneyler yapılmış, kaynak bölgesinde oluşan iç yapılar incelenmiştir.

Çalışmada, araştırılan problemler teorik ve deneysel bulgulara dayalı olarak irdelenmiştir. Teorik olarak elde edilen sonuçların doğruluğu deneysel çalışmalarla desteklenmiş ve bu amaçla uygun cihaz, makina ve ölçme aletlerinden yararlanılmıştır.

**Bilime katkısı;** Kaynak işlemi için mekanik olarak (ortam sıcaklığında, basınç altında) tozlardan elde edilmiş parçaların kaynak işleminden önceki mekanik etki sonucunda termodinamik denge hali bozulmuş, hatalı kristal kafesler meydana gelmektedir. Bu durum numunlerin sinterleme ve kaynak işlemlerinde aktivitesini artırmaktadır. Bunun yanısıra, dislokasyonların meydana gelmesi ve etki mekanizmaları sayesinde difüzyon işlemi hızlanmaktadır. Zira bu olaylar, difüzyon kaynağı ile birleştirilecek parçaların iç enerjisini yükselten olaylardır ve bu iç enerjisinin yükselmesi difüzyonu ve difüzyon kaynağını kolaylaştırmaktadır (Karadeniz, 1984).

Kaynak bölgesinde iç yapı, fiziksel ve mekanik özellikler araştırılmış, teorik ve pratik sonuçlara varılmıştır. Çeşitli malzemelerin fırında kaynak edilebilirliği bilimsel yönden araştırılmıştır. Bu bilimsel araştırmalar, birleşecek yüzeylerin aktifliğinin yükselmesi, iç parçanın genişmesi, dış parçanın büzülmesi prensibine dayanır.

**Çalışmanın pratik önemi:** Karmaşık şekilli makina parçaları elde etmek için, bu parçalar basit şekilli parçalara ayrılmış ve onların üretimi için çeşitli bileşimde toz karışımları seçilmiştir. Seçilen bu toz karışımlarından parçaların difüzyon kaynağı yöntemiyle birleştirilebilme kabiliyeti araştırılarak bunun pratikliği üzerinde durulmuştur.

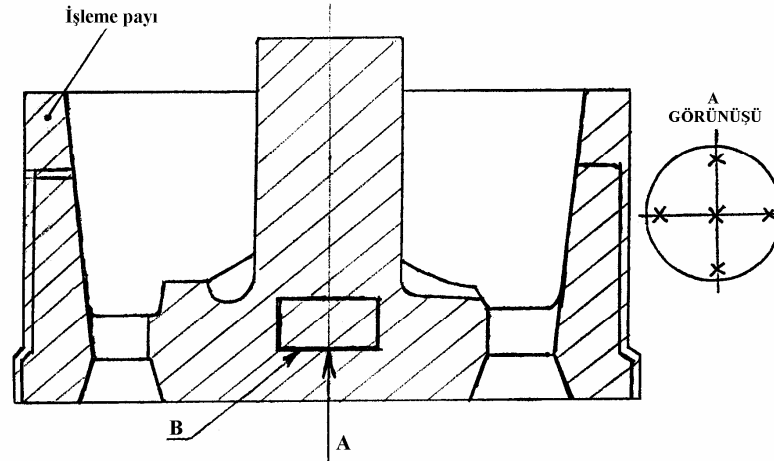
## BÖLÜM İKİ

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

#### 2.1 Kompresörün Konstrüksiyonu ve Kompresör Gövdesinin Analizi

Rotasyon kompresörü düşük sıkıştırma basınçlarının elde edilmesinde kullanılan, küçük boyutlu ve düşük ağırlıklı bir kompresördür. Pistonlu kompresörlerden farklı olarak bu tip kompresörlerde öteleme hareketi yapan elemanlar olmadığı gibi, emme sübabı ve bazılarında püskürtme (vurma) sübabı da bulunmaz. Bu tip kompresörlerin verimliliği diğer tiplere göre daha yüksektir. Levhalı rotorlu, döner rotorlu ve vidalı rotorlu kompresörler, rotasyon tipli kompresörler grubuna girerler (Langrat, Kırlov, ve Yadin, 1974).

Döner rotorlu hermetik rotasyon kompresörler; soğutma cihazları ve klimalar gibi yerlerde kullanılmaktadırlar. Rotasyon kompresörünün en karmaşık elemanlarından birisi gövdesidir. Gövdenin ana kısmı kompresör kapağının üst bölümüne sabitlenecek şekilde preslenir. Bu eleman hem gövde, hem de üst yatak görevini yerine getirmektedir ve buna silindir ve yatak monte edilmektedir. Günümüzde bu tür kompresörlerin gövde malzemesi olarak “dökme demir” kullanılmaktadır. Kullanılan dökme demirin kimyasal bileşimi aşağıdaki şekildedir: % 2,8-3,8 C; %1,5-2,8 Si; %1,0≥Mn; %1,0≥P; %1,0≥S. Gövdenin sertliği 1500-2100 N/mm<sup>2</sup>, dayanımı ise  $\sigma \geq 200 \text{ N/mm}^2$  'dır (Şekil 2.1). Bu malzeme lamel grafitli dökme demir olup, dağlamadan önceki yapısında üzeri pullu levha şekilli grafitler vardır. Bu grafitlerin yapı içerisinde büyüklükleri 25 ile 300 µm arasındadır.



Şekil 2.1 Dökme demirden üretilmekte olan kompresör gövdesi

Dökme demirden elde edilen gövdenin  $\text{HNO}_3$ 'ün alkolde %4 karışımı ile dağlanmasından sonraki yapısı, ferrit ve perlitten oluşmaktadır. Şekil 2.1'de görülen B yüzeyi; sürtünen, çalışma yüzeyi olduğundan bu yüzeyin yapısının genelde perlitten oluşması istenmektedir. B yüzeyinde sementit meydana gelmesine izin verilmez. Sementitin diğer yüzeylerde 1 mm derinlikte olmasına izin verilebilir.

Yukarıdaki açıklamalar ışığında, gövdenin döküm yöntemiyle üretilmesi esnasında, dökümün yapısında sementitin miktarı ve boyutu değişken olur. Sementit yüksek sertlik meydana getirir. Sürtünme halinde silindirin (veya diğer parçaların) aşınma ile dağılması hızlanır. Bunun yanında, dökümde malzeme sarfiyatı fazla olur ve teknolojik bakımdan üretim ekonomik olmaz.

Bu nedenle, son dönemlerde gövdenin toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesine başlanmıştır. Bu yöntemle üretilen gövdeler kalite ve özellikleri bakımından dökme demirden üretilmiş gövdelerden çok farklı değildir. Ancak maliyet açısından dökme demirden üretilenlere göre daha ekonomiktir. Bu yöntemin dezavantajı, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen gövdenin preslenmesi esnasında bazı kritik bölgelerde hataların (çatlakların) oluşmasıdır. Eğer bu hatalar önlenebilirse, sinterleme sonrası istenen teknik özelliklere sahip gövdenin üretimi gerçekleştirilebilir. Gövdenin toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesindeki esas sorun gövdenin yüksekliği boyunca bir kısım kritik bölgelerinin olmasıdır (TU 16-591-007-80).

Yukarıda verilenler dikkate alınır, gövdenin toz metalürjisi yöntemiyle imal edilmesi; hem teknik, hem de ekonomik yönden avantajlı olarak güncelliğini korumaktadır. Gövdenin üretiminde kullanılan pres kalıpların zorluklarını ortadan kaldırmak için, gövde iki parçalı olarak hazırlanıp, bu iki parçanın fırında kaynak ile birleştirilmesi gerekmektedir. Bu da, toz metalürjisi alanında yeni teknik-bilimsel araştırmaları gerekli kılmaktadır.

## **2.2 Toz Metalürjisi ve Difüzyon Kaynağı Yöntemleri Kullanılarak Gövdenin Elde Edilmesi**

Toz metalürjisi yönteminin uygulanması ile, bir çok makine parçasının, örneğin klima kompresörü parçalarının üretilmesi teknolojisi basitleştirilmiş olur. Bu parçalardan biri de kompresörün karmaşık şekle sahip olan gövdesidir ve bu gövdenin parçalarının toz karışımından pres kalıpta soğuk preslemeyle kolaylıkla elde edilmesidir.

Ancak, kompresör gövdesi halen de dökme demirden elde edilmektedir ve döküm işlemi sırasında çok sayıda ön ve son işlem yapılmaktadır. Bu üretim yöntemiyle dökme demirden üretilen gövdenin %60'ı döküm sonrası talaşlı imalatla talaş olarak hurdaya atılmaktadır. Bu sebeple gövdenin toz metalürjisi yöntemiyle elde edilmesi önem kazanmakta ve önemli bir bilimsel araştırma gerektirmektedir.

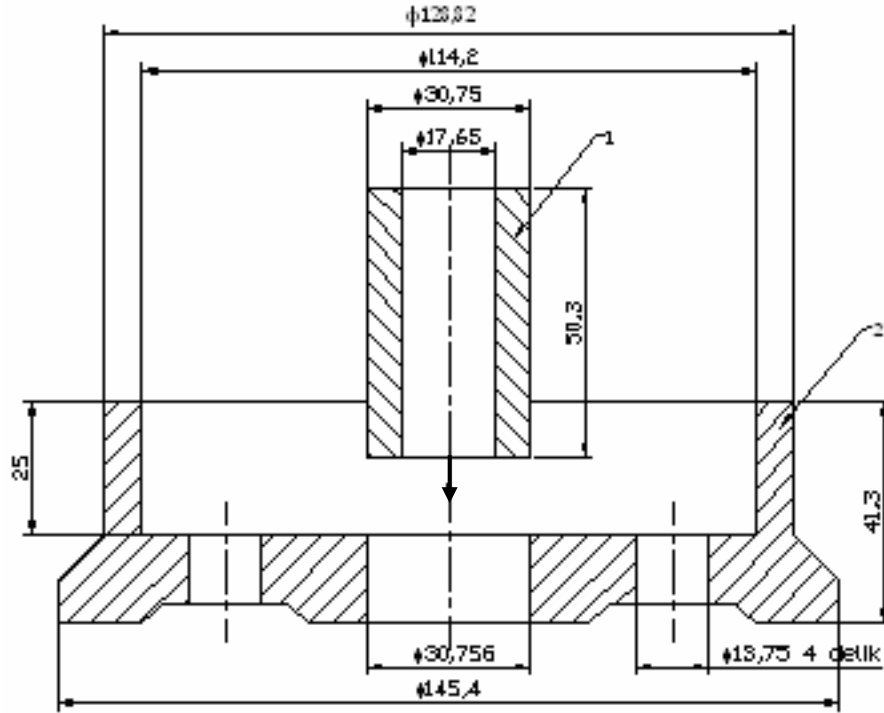
Gövdenin karmaşık şekli (presleme yönündeki süreksizlik bölgeleri, koni şeklindeki çıkıntılar, serlik kaburgaları ve b.), gövdenin üretilmesini zorlaştırır ve pres kalıbının gücünün yüksek olması gerekir. Diğer taraftan bu durum üretilen parçanın yapısının homojen olmasının engeller ve bu da parçanın mukavemet değerlerini düşürür.

Gövdenin toz metalürjisi yöntemiyle elde edilmesini basitleştirmek için, teknik çözüm olarak, gövdenin iki parçalı olarak yapılması önerilir. Gövdenin bölünme şekli parçaların “çevreleyen”-“çevrelenen” olarak ortaya çıkmasını sağlar.

Toz metalürjisi ve difüzyon kaynağı yöntemleri kullanılarak kompresör gövdesinin imalatında, gövdenin çevreleyen (1) ve çevrelenen (2) parçaları soğuk



preslemeyle, ham mukavemet kazandırılarak elde edilir (Şekil 2.2). Kazandırılmış ham mukavemet sayesinde soğuk preslenmiş toz metal parçalar, taşıma ve parçaların birbirine montajı sırasında dağılmazlar. Soğuk preslemeyle toz malzemeden elde edilecek olan gövdenin iki parçasının ölçüleri ve bunların sinterleme ve kaynak işlemine uygun olarak hazırlanmış montaj resmi Şekil 2.2’de verilmiştir. Burada, kaynak işlemini gerçekleştirebilmek için çevrelenen ve çevreleyen parçaların toz karışımları farklı karışımlara sahip olarak seçilir. Kaynak işlemi sırasında çevrelenen parçanın hacimsel olarak büyümesi ve çevreleyen parçanın ise hacimsel olarak büzülmesi sağlanır. Bu şekilde birleştirilecek parçaların temas yüzeylerinde bir basınç oluşması sağlanmış olur. Toz metal karışımı içerisinde bulunan ve ergime sıcaklığı ana malzemenin ergime sıcaklığının altında olan elementler (Cu, Zn ve b.) sinterleme ve difüzyon kaynağı sırasında kaynaklı birleşimin meydana gelmesinde önemli role sahiptirler.



Şekil 2.2 Sinterleme ve kaynaklama için preslenmiş toz malzemeden üretilmiş gövdenin montaj resmi ve ölçüleri: 1- çevrelenen; 2-çevreleyen parça.

Difüzyon kaynağı için çevrelenen parçanın dış çapı ile çevreleyen parçanın iç çapı arasında 50-60  $\mu\text{m}$  boşluk olması gerekmektedir. Çaplar arasındaki farklılık toleransı

bu aralığın altında olduğu zaman soğuk preslenmiş numunelerin montajı sırasında problemler yaşanmaktadır. Daha büyük değerlerde olduğu zaman ise, sinterleme ve difüzyon kaynağı işlemi sırasında birleşme bölgelerinde yeterli difüzyon oluşmamaktadır ve birleşme hatalı olmaktadır.

## 2.3 Toz Metalürjisi

### 2.3.1 Toz Metalürjisinin Tanımı

Geleneksel yöntemlerle üretilen geleneksel malzemelerden istenilen bütün özelliklerin birlikte kazanılması zor olduğu için, malzeme bilimciler günlük yaşantımızı kolaylaştıracak daha üstün özelliklere sahip ve daha ekonomik malzeme üretme arayışı içerisine girmişlerdir. Belirli bir uygulama için malzemedan beklenen değişik fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler, malzemeyi oluşturan bu özelliklere sahip bileşenler tarafından sağlanır. Bu nedenle gelişmiş malzemelere olan ihtiyaçların artmasına bağlı olarak, metal esaslı tozlar, günümüz koşullarında daha da önem kazanmaktadır (Ozan, Çalığıülü, Taşkın, Gür, Dikbaş ve Çay, 2006).

Parçanın şekil ve boyutlarına uygun olarak metal esaslı tozları presleyip,  $0.75-0.86T_m$  ( $T_m$ : ergime sıcaklığı) sıcaklık aralığında vakum veya koruyucu gaz atmosferinde sinterlenmesi ile üretime **toz metalürjisi** adı verilir (Şükürov, 2002). Bu yöntemde, istenilen kimyasal kompozisyonu verecek şekilde karıştırılmış metal tozların, üretilecek parça şekli ve boyutlarına sahip, kalıplar içerisinde sıkıştırılarak şekillendirilmesi ve bu işlemi takip eden yüksek sıcaklıkta koruyucu atmosfer altında sinterlenmesi ile parçalar üretilmektedir (Atik, Meriç ve Yavuz, 2002). Bu yöntem döküm, talaşlı imalat ve plastik şekil verme, kaynak gibi imal usulleri arasında tarihsel olarak neredeyse en eski yöntem olan döküm yöntemi kadar eski; uygulama açısından ise bu yöntemlerden daha yenidir. Toz metalürjisi ile elde edilen parçalar gözenekli ve kompakt olmak üzere iki çeşittir. Son işlemden sonra malzemede %10-30 arasında gözenek mevcutsa, buna gözenekli, %1-3 arasında gözenek varsa bu ürüne kompakt malzeme denilir (Avcı, 1993; Bishop, 1998).

Dökümdeki oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyonu, alaşımı oluşturan elementlerin yüksek yoğunluk farkından dolayı alaşım güçlükleri gibi pek çok sorun, toz metalürjisi yöntemi ile parça imalatında ortadan kalkar (Avcı, 1993).

Toz metalürjisi, bir imalat yöntemi olmanın ötesinde aynı zamanda önemli bir malzeme ve yarı mamul üretim yöntemidir. Mendeleev'in periyodik cetvelinde metal olarak sayabileceğimiz 86 civarında elementten günümüzde yaklaşık 8000 kadar alaşım üretilebilmektedir. Halbuki bu 86 elementten ikili, üçlü, dörtlü, veya çoklu kombinasyonlar ile  $7,7 \times 10^{25}$  tür malzeme üretmek mümkündür. Bu ise düşünce sınırlarını da aşan çok önemli bir imkandır. Bu imkan toz metalürjisi yönteminde mekanik alaşımlama ile kullanılabilir hale gelmektedir (Avcı, 1993).

1990 yılına kadar toz metal kompozitler, elektrik kontakları ve elektodların üretilmesinde ve bakır, titan ve grafit tozlarından gözenekli yatak ve filtre yapımında kullanılırdı. Demir ve çelik toz metal parçalar 1940 yılının ortalarında otomotiv sektöründe ortaya çıkmıştır. O zamandan beri toz metalürjisi, endüstride önemli ölçüde ekonomik olan bir sektör haline gelmiştir. Gelişmiş mekanik performans, artan mikroyapı kontrolü, düşük malzeme kaybı ve daha düşük üretim maliyeti sebebiyle, modern toz metalürjisi üretim yöntemi geleneksel metal işleme yöntemlerinden daha üstün yere sahiptir. Malzeme ve üretim maliyetlerinin düşürülmesinin yanında karışık şekilli ve diğer yöntemlerle üretilmesi zor olan parçaların üretilmesinde büyük kolaylık sağlayan toz metal tekniği ile elde edilen parçaların kullanım alanları gittikçe artmaktadır (Varol ve Sarıtaş, 1996). Otomobil motor dişlileri ve kamları demir tozlarından presleme ve sinterlemeyle ekonomik olarak toz metalürjisi ile üretilmektedir. Toz metalürjisi yöntemi ile yüksek üretim hızlarında, istenilen boyutsal ölçülerde ve özelliklerde parçalar ekonomik olarak üretilebilmektedir. (German, 1997; Bishop, 1998; Mates, 1999, Çetinkaya ve ark., 2004; Çavdar ve ark., 2006).

Belirlenen oranlarda dikkatlice karıştırılan metal tozları, oda sıcaklığında hassas kalıplarda sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi oda sıcaklığında, bazen da daha yüksek sıcaklıklarda yapılır. Ancak, sıcakta sıkıştırma imkanı, kalıp matrisi malzemesinin sıkıştırma sıcaklığındaki dayanım değerleri ile sınırlanmıştır. Elde edilen

mühendislik ürünü, toz tanecikleri arasındaki metalürjik bağların sağlanabilmesi için bir fırın içinde kontrollü sıcaklıklarda, gerekirse koruyucu bir atmosferde sinterlenir (Meriç ve ark., 2005; Çavdar ve ark. 2006). Sinterleme denilen ısı işlem, ergimenin yerini tutmakta ve kullanılan metal tozunun ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Sinterlenen tozlar 1 ila 4 mikron gibi oldukça küçük boyutlara kadar inebilen metal tanelerinden oluşur (Meriç, Atik, ve Türdü, 2005). Sinterleme ile elde edilen parçalara bazan son şekillerini vermek için son bir işlem uygulandığı gibi, sinterleme buna gerek bırakmayacak şekilde de yapılabilir.

Sinterlenmiş parçalar, istenilen mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine sahiptirler. Genel olarak sinterlemeden sonra ilave bir işleme gerek duyulmaz. Üretimde kullanılan hammadde yaklaşık olarak %100 değerlendirilmiş olup, imalat girdileri minimum düzeye indirilir. Daha fazla hassasiyet veya mukavemete gerek duyulduğunda, parçalara daha sonra ısı işlem ve kalibrasyon işlemleri de uygulanabilir. Toz metalürjisi yöntemi düşük enerji tüketimine ve yüksek üretim hızına sahip olduğu için, zamanla sürekli gelişmekte ve bir çok alanda geleneksel metal şekillendirme yöntemlerinin yerini almaktadır (German, 1997).

Toz metal parçaların çekme mukavemetleri genel olarak 150-450 N/mm<sup>2</sup> olup, uzama değerleri %2 ile %5 arasındadır. Bu özellikleriyle gri dökme demir ile mukayese edilebilirler. Fakat istenildiğinde 1200 N/mm<sup>2</sup>'ye kadar mukavemet ve %20 gibi bir uzama elde edilebilir. Tablo 2.1'de toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen bazı malzemelerin mekanik özellikler verilmiştir (Tozmetal kataloğu).

Tablo 2.1 Bazı toz metal malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)
Demir	100-276	2-15
Çelik	130-490	0,5-3,5
Bakırlı çelik	140-614	1,0-2,5
Isıl işlemlili alaşımlı çelikler	200-1200	1,5-10,5
Bronz	55-124	1-2,5

Bugün çok çeşitli ve özellikle sanayinin kullanımına sunulmuş olan demir esaslı ve demir dışı, alaşımlı çelik tozları, yoğunluk, sinterleme sıcaklığı, çift sinterleme, sinter dövme ve çeşitli ısıl işlemler uygulanarak tam yoğun malzemelerinkine çok yakın veya eşdeğer fiziksel özelliklerde toz metal parçalar üretilebilmektedir (Meriç ve ark., 2005).

### ***2.3.2 Toz Metalürjisinin Avantajları***

İşleme operasyonlarının kalkması veya asgariye inmesi, hurda miktarının kalkması veya asgariye inmesi, enerjiden tasarruf, çok hassas tolerans elde edilebilmesi, çok geniş alaşım sistemlerinin elde edilebilmesi, çok iyi yüzey kalitesi elde edilebilmesi, ısıl işlem uygulamak suretiyle yüksek dayanımlı ve aşınmaya dayanıklı malzeme imali, kendinden yağlama ve filtrasyon için kontrollü gözenek elde edebilmesi, normal ve yüksek miktarlarda parça üretimine uygunluğu toz metalürjisi yönteminin avantajları olarak sayılabilir (Sudhakar, 2000; Meriç ve ark., 2005).

Bazı metallerin ergime sıcaklıklarının çok yüksek olması ve bu sıcaklıklara geleneksel üretim yöntemlerinde ulaşamaması, süper alaşım ve sert metaller gibi önemli malzemelerin toz metalürjisi yöntemi ile üretilmesi toz metalürjisi yöntemini zorunlu kılan başlıca nedenlerdir. Malzeme kullanım oranında (verimde) % 100'lere ulaşılabilmesi sayesinde hammadde kayıplarının en az düzeye indirilebilmesi, aynı parçadan çok sayıda üretim söz konusu olduğunda en iyi uygulanabilen bir yöntem olması, boyut kontrolünün iyi ve şekil karmaşıklığının sorun yaratması toz metalürjisinin en bariz avantajlarıdır (Yılmaz, Varol ve Ünlü, 2005).

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen parçalar, geleneksel yöntemlerle imal edilen ürünlerle karşılaştırıldığında aşağıda sıralanan pek çok potansiyel avantajlara sahip olurlar.

- Toz metal kullanılarak üretilen ürünlerde seri haldeki kütle üretimleri için büyük imkanlar mevcuttur.

- Toz metalürjisinde diğer üretim metotlarında mümkün olmayan, metal ve metal dışı malzemelerin bir arada kullanılabilirliği, zengin ürün çeşitliliği ve esnekliğe sahip olma imkanları söz konusudur.
- Toz metalürjisi yöntemi, makina parçaları için gereken en son boyut ve tolerans ölçülerinde üretilebilme imkanını da ekonomik olarak sağlayabilmektedir.
- Toz metalürjisinde hammaddenin nisbeten daha kolay ve ucuz elde edilebilme imkanı söz konusudur.
- Toz metalürjisinde diğer yöntemlerle üretilen parçalara oranla, bir ikinci işlem ihtiyacının gerekliliği nisbeten daha azdır.
- Toz metalürjisinde farklı ergime sıcaklıklarına sahip ayrı ayrı malzemelerden elde edilen farklı boyutlardaki tozların, değişik oranlardaki karışımı ile üretilen kontrollü gözenek yapısına sahip parçaların üretilebilmesi mümkündür.
- Toz metalürjisi özellikle talaşlı imalat yöntemine oranla büyük üretim kapasitesine sahiptir.
- Toz metalürjisinde parçalar, mükemmel aşınma direnci ve sürtünme katsayısına sahip özellikte üretilebilirler.
- Toz metalürjisi ile üretilen parçalar titreşim ve gürültüyü emici özelliğe sahiptir.
- Diğer işleme ve imalat yöntemlerinde mümkün olmayan geometrik yapıyı toz metalürjisi ile çok kolay elde etme imkanı vardır (Akdoğan ve Sarıtaş, 2002).

### ***2.3.3 Toz Metalürjisinin Dezavantajları***

Toz metalürjisiyle üretimin dezavantajları ise sadece küçük parçaların üretimi, parçaları kalıptan çıkarma güçlüğü, parça kesiti boyunca özelliklerin değişim göstermesi, yüksek yatırım maliyeti ve yüksek kalıp fiyatlarıdır (Bishop, 1998).

### ***2.3.4 Toz Metal Parçaların Özellikleri***

Toz metal ürünlerin özellikleri toz tanelerinin şekli, boyutu, bileşimi, yağlayıcı tipi, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi çok sayıda faktöre bağlı

olarak değişmektedir. Tozlara katılan yağlayıcılar, kalıp içerisindeki toz yüksekliği, sıkıştırma hızı ve gerilme dağılımı tozların sıkıştırılma işlemini önemli ölçüde etkilediğinden, üretilen parçanın özellikleri de bu etkenlere bağlıdır. Tozların sıkıştırılması ile elde edilen ham mukavemet tozların yerleşerek kenetlenmesi plastik deformasyon sonucu meydana gelir. Sıkıştırma sırasında başlangıçta gevşek bir şekilde bulunan tozlar, yeniden yerleşir ve sıkı bir yerleşme elde edilir. Uygulanan basınç daha da artarsa, taneler arasında temas alanı artar ve taneler daha fazla plastik deformasyona uğrarlar. Sonuç olarak ham mukavemet tozlar arasındaki temas alanına bağlı olarak değişir, temas alanı arttıkça mukavemet artar (Aksoy ve Ünal, 2004). Bu yöntemle elde edilen ürünlerin yoğunlukları geniş bir aralıkta değişmektedir. Genellikle mekanik özellikler yoğunluğa bağlı olarak, yoğunluk arttıkça, yükselme göstermektedir. Yüksek kapasiteli presler ve izostatik presleme yöntemi kullanılarak dövme ürünlerinin özelliklerine yakın, yüksek yoğunluğa sahip parçalar üretilebilir (Tunay, Varol ve Yılmaz, 2002; Yılmaz ve ark. 2005).

Toz metal parçalardaki gözenek miktarı, dağılımı, tipi, büyüklüğü ve şekli mekanik özelliklere etki etmektedir. Gözenekliliğin miktarı düştükçe toz metal parçaların mekanik özellikleri iyileşmektedir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş gözenek miktarı fazla olan makina parçalarının toklukları ve mukavemetleri yeteri değerde olmamaktadır. Bu malzemelerin mukavemetleri dökme demirlerin mukavemeti ile aynı değer mertebesinde olmaktadır. Bu sebeple makina parçası olarak kullanıldıklarında çelikler kadar dayanıklılığa sahip değildirler (Douib, Mellanby & Moon, 1989; Tunay ve ark., 2002).

Gözeneklilik oranı %18-60 arasında olan toz metal parçalar *düşük yoğunluklu* (çok gözenekli) parçalar olarak tanımlanır. %30-60 gözeneklilikteki parçalardan genellikle metalik filitreler üretilir. Saf demir, paslanmaz çelik veya bronz esaslı imal edilebilen bu filitreler, hava, su, yağ veya yakıt devrelerinde kullanılır. %18-50 gözeneklilikteki parçalar ise genellikle uygun yağ emdirilerek kendinden yağlamalı yataklar olarak kullanılırlar (Meriç ve ark., 2005).

Hacminin %10-20 kısmı gözenekli olan toz metal parçalar, orta yoğunluklu parçalar olarak bilinen ve yatak özelliği istenmeyen orta dayanımlı parçalardır.

Bunlara örnek olarak otomotiv amortisör pistonları, mil kılavuzları, yağ pompa rotor ve dişlileri ile benzeri makine parçaları gösterilebilir (Meriç ve ark., 2005).

Yüksek yoğunluklu parçalarda (az gözenekli) gözenek oranı %10'dan azdır ve dayanımı yüksek olan parçalardır. Dişliler, kavramalar, kamalar, kilit parçaları gibi çok çeşitli makine parçaları bu malzemelerden imal edilebilmektedir (German, 1997).

### **2.3.5 Toz Üretim Yöntemleri**

Hemen hemen bütün malzemeler toz haline getirilebilir, ancak tozları üretmek için seçilen yöntemler malzeme özelliklerine göre değişir. Metal malzeme üretimi açısından, ortalama boyutları birkaç mikrondan birkaç yüz mikrona kadar parçalanmış partiküller toz olarak tanımlanır. Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden dentritik şekle kadar değişmektedir. Üretim yöntemine bağlı olarak tozun yüzey durumu da farklılık göstermektedir. Birçok metal tozu üretim metodu vardır. Bunların içerisinde en çok kullanılanları mekaniksel, kimyasal, elektrolitik ve atomizasyon teknikleridir (Avcı, 1993; Mates, 1999). Toz üretimi teknikleri: atomizasyon, doğrudan indirgeme, öğütme, elektroliz ve sıvı veya gazdan çökeltme olarak sınıflandırılabilir (Sarıtış, 1994).

#### **2.3.5.1 Atomizasyon**

Atomizasyon yaygın olarak kullanılan bir metal tozu üretim yöntemidir. Günümüzde atomizasyon yöntemiyle metal tozu üretimi önemli yere sahiptir. İki akışkan atomizasyonu olarak da adlandırılan su ve gaz atomizasyonu ucuz ve yüksek kapasitede toz üretimi için tercih edilmektedir (Onur ve Arslan, 1996). Bu yöntemin üretim tekniği; bir sıvı metalin pota dibindeki bir delikten akması sırasında, üzerine basınçlı gaz veya sıvı gönderilmesi ile ergimiş metalin çok ince parçalara ayrılarak katılaştırılmasıdır (Kurgan, 2004). Günümüzde üretilen metal tozlarının % 80 'i atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Sıvı metalin su jeti ile parçalanması "suyla atomizasyon" gaz jeti ile parçalanması "gazla atomizasyon" ve santrifüj kuvvetle parçalanması "santrifüj atomizasyon" olarak bilinir. Bunların içerisinde su atomizasyonu en yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Upadhyaya, 1996).



### 2.3.5.2 Doğrudan İndirgeme

1965 yılına kadar kimyasal indirgeme yöntemi en çok metal tozu üretme yöntemi idi. Demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobaltın oksitlerinden indirgeme yoluyla tozlarının üretilmesi çok bilinen endüstriyel bir yöntemdir. Bu yöntemde toz haline öğütülen oksitler indirgeyici atmosfer altında uygun sıcaklıklara ısıtılarak indirgenirler. En ucuz indirgeyici ortam karbondur, ancak hidrojen de bu amaçla kullanılmaktadır. 1900 yılında İsviçre’de geliştirilen Höganäs metoduna göre; magnetit ( $Fe_3O_4$ ), kok, kireç taşı karışımı  $1260^{\circ}C$  de 68 saat bekletilerek demir tozu üretilmektedir. Elde edilen demir tozları bu sıcaklıkta birbirlerine kaynak oluşturarak kekleşirler. Ancak, soğutulduktan sonra öğütülerek istenilen toz büyüklüğüne kırılmaları kolaydır. Tozlar sünger görünüşünde olduklarından “Sünger Demir” olarak bilinirler (Saritaş, 1995).

### 2.3.5.3 Öğütme

Malzemelerin öğütülmesi, toz metalurjisi sanayisinde önemli ve ekonomik bir metottur. Malzemeler sert ve kırılğan veya yumuşak ve sünek olabilir. Mekanik öğütme, oksit tozlarının üretiminde en çok kullanılan yöntemdir. İndirgenmiş atomize veya elektrolitik tozlar, boyut küçültmesi için öğütülmektedir. Toz metal sanayiinde öğütme ile boyut küçültülebilir, şekil değiştirilebilir, katı hal alaşımlama yapılabilir (mekanik alaşımlama) ve çeşitli tozlar karıştırılabilir (Saritaş, 1996).

Öğütme en çok bilyalı değirmenlerde yapılmaktadır. Öğütülecek malzeme, içinde büyük çaplı sert ve aşınmaya dirençli bilyaların bulunduğu kaba, önceden iri kırılmış olarak yerleştirilir. Kap dönerek veya titreştirilerek bilyalar harekete geçirilir. Bilyaların çarpışması sırasında tozların ne hal alacağı parçacığın özelliğine bağlıdır. Yüksek enerjili bir öğütme işlemi olan 1960’larda Benjamin ve arkadaşları tarafından geliştirilen mekanik alaşımlama yöntemiyle, kontrollü mikroyapıya sahip ve ince tane boyutlu tozlardan oluşan kompozit metal tozlarının üretimi yaygın olarak yapılmaktadır (Ünlü, Yılmaz ve Kurgan, 2006).

#### 2.3.5.4 Elektrokimyasal Yöntemler

Bu yöntemlerde metal tozu üretimi, sulu çözeltilerden veya sıvı tuz banyosundan metallerin elektroliz yöntemi ile ayrıştırılmasıyla yapılmaktadır. Sulu solüsyonlarının elektrolizi özellikle Cu, Fe, Ni, Co, Zn, S ve Pb tozlarının üretilmesi için uygundur. Bu yöntemle tozlar doğrudan veya elektrotta birikmiş gevrek kütle öğütülmek suretiyle dolaylı olarak elde edilebilir. Prosesi etkileyen ana parametreler; ortamdaki metal iyonlarının konsantrasyonu, elektrodun iletkenliği, sıcaklık, gerilim değeri ve akım yoğunluğu, sıvı banyonun kinetiği ve tane büyümesini engellemeye yönelik olarak çekirdeklenme için partikül ilavesi sıralanabilir. Bu yöntemle yüksek safiyette gözenekli tozlar, değişik toz boyutlarında imal edilebilmektedir. Çok popüler olmamakla birlikte bakırda olduğu üzere benzer şekilde demir tozları  $FeSO_4$  ve  $FeCl_2$  solüsyonlarından üretilmektedir. Elektrolitik yöntemle üretilen tozların sıkıştırılabilirlikleri ve presleme sonrası dayanımları yüksek olmaktadır (Kurt, 2006).

#### 2.3.5.5 Sıvı veya Gazdan Çökeltme

Hidro–metalurji olarak da bilinen bu yöntemde, çökeltme bir sıvı veya tuz çözeltisinden yapılmaktadır. Bu yöntemde, çözeltilerden önce bir hidroksit çökeltmekte, daha sonra bu hidroksit ısıtılarak parçalanmaktadır. Günümüzde bakır, nikel, kobalt tozları hidro–metalurji yöntemiyle üretilir (Ünlü ve ark. 2006).

### 2.3.6 Toz Metalürjisi Yönteminin Aşamaları

#### 2.3.6.1 Karıştırma

Metalik tozlar, yağlayıcılar ve isteğe bağlı alaşım elementleri ile homojen bir karışım elde etmek için karıştırılırlar. Karışım içerisine genellikle %0,5 ile %1,5 arası yağlayıcı eklenir. Metalik sterat ve parafin en çok kullanılan yağlayıcılardır. Yağlayıcı kullanımının amacı, toz taneleri arasındaki ve toz taneleri ile kalıp ve takım yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi azaltmak olmakla birlikte tozların sıkıştırılması sırasında kolay kaymalarını sağlamaktır. Sürtünmenin azalması

sıkıştırılan toz metal parçaların kalıptan kolayca çıkmasına yardımcı olur (Kurgan, 2004).

### 2.3.6.2 Presleme Teknikleri

Metal tozlarından parça üretebilmek için tozları parçanın şekline göre preslemek (biçimlendirmek) ve tozlar arasında mekanik bağ oluşturmak gereklidir. Presleme yöntemleri parçaya şeklini verir, fakat gerekli parça mukavemeti ancak sinterleme işleminden sonra oluşur. Preslenmiş mukavemet değerinin (ham mukavemet), parçanın taşınabilmesi için gerekli mukavemet değerinin üzerinde olması yeterlidir. Metal tozları kalıp içerisinde şekillendirildiklerinde tozun serbest olarak kalıp boşluğunu çok iyi ve tam olarak doldurması arzu edilirken, aynı zamanda kalıp içinde soğuk olarak preslendiğinde teorik yoğunluğa yaklaşılması arzu edilmektedir. Preslemede ulaşılan yoğunluk toz metalürjisi yöntemiyle imal edilen parçaların mekanik özelliklerini birinci derecede etkiler.

Malzeme ne kadar yumşak ise preslenebilirliği o kadar yüksektir. Preslenebilirlik toz tanelerinin preslemede kendi aralarındaki ve tanelerle kalıp arasındaki sürtünmeye de bağlıdır.

Kalıpta presleme işleminin üç temel aşaması vardır:

- Kalıp boşluğuna saptanan miktarlarda metal tozunun doldurulması,
- Zimbalar yardımıyla basınçla tozun sıkıştırılması,
- Şekillendirilmiş parçanın kalıptan çıkarılması.

Preslemede toz üzerine uygulanan basınç yaklaşık olarak 3-8 ton/cm<sup>2</sup> sınırları arasında değişir. Basınç mekanik veya hidrolik preslerle yapılmaktadır. Bu perslerin başlıca özellikleri tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2 Mekanik ve hidrolik preslerin genel özellikleri.

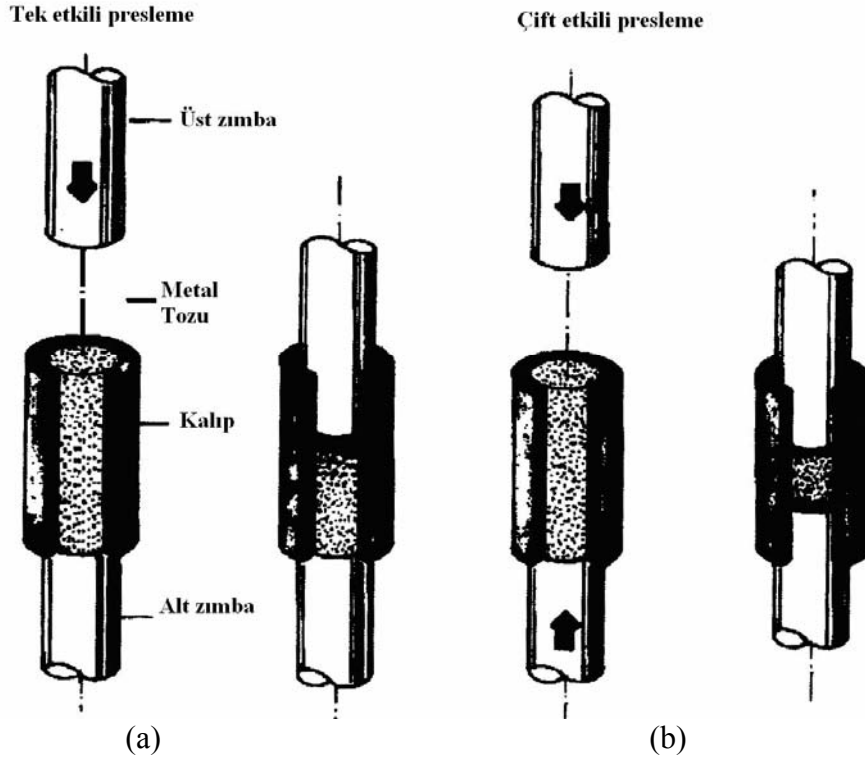
Pres Çeşidi	Presleme Yüğü (ton)	Presleme Hızı (Strok/dak)	Özellikleri
Mekanik presler	10-150	6-150	-Yüksek çalışma hızı - Dizayn esnekliğı - Çalışmada basitlik ve esneklik - Göreceli olarak düşük tesis ve işletme giderleri
Hidrolik presler	5000	20	- Yüksek presleme gerektiren karmaşık şekilli parçaların preslenmesinde kullanılır.

Presleme işlemi soğuk veya ılık olarak gerçekleştirilebilir. Otomasyona çok uygun olduklarından, en çok soğuk basınçlı biçimlendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Başlıca basınçlı biçimlendirme yöntemleri metal kalıplarda presleme, haddeleme, izostatik presleme ile kalıplamadır (Avcı, 1993).

#### 2.3.6.2.1 Metal Kalıplarda Presleme.

Metal kalıplarda presleme işlemi çok yaygın kullanılan bir yöntemdir ve konvensiyonel yöntem olarak düşünülmektedir. Bu yöntem rijit kalıplar ve özel mekanik veya hidrolik presler gerektirmektedir. Birbirini takip eden presleme aşamalarıyla %90'lara varan yoğunluk değerleri elde edilmektedir. Tozlar bir metal kalıba dolduruldukları zaman belirli bir yoğunluk değerine sahip olurlar. Bu görünür yoğunluk, toz şekline, tane büyüklüğüne ve dağılımına, katkı maddelerine ve kısmen de kalıp şekline bağlıdır. Basıncın uygulanmasıyla yoğunluk artışı 3 kademe oluşur. Birinci kademe tozlar yer değiştirerek daha yoğun bir paketleme oluştururlar. Basıncın artırılmasıyla ikinci kademe tozlarda önce elastik ve daha sonra plastik şekil değiştirme oluşur. Basıncın çok yüksek değerlere çıkması halinde yoğunluk artışının üçüncü kademesine geçilebilir. Bu kademe gevrek tozlar kırılarak daha küçük tozları oluştururlar. Kalıp duvarlarının tozlardan çizilmemesi ve aşınmaması için çok sert olması gereklidir. Bu amaçla, günümüzde genellikle sert metal kalıplar kullanılmaktadır.

Preslemede kullanılan karakteristik pres elemanları üst zımba, alt zımba ve sabitlenmiş kalıptan oluşmaktadır. Sabit kalıpta presleme tek etkili ve çift etkili olmak üzere iki şekilde yapılır (şekil 2.3). Tek etkili preslemede alt zımba ve kalıp hareket etmezken, üst zımba hareket ederek gerekli sıkıştırmayı gerçekleştirmektedir. Çift etkili preslemede ise kalıp haraketsizdir. Üst zımba ve alt zımba sırasıyla (aynı anda) aşağıya ve yukarıya doğru hareket ederek metal tozunu sıkıştırarak şekillendirirler (Upadhyaya, 1996).

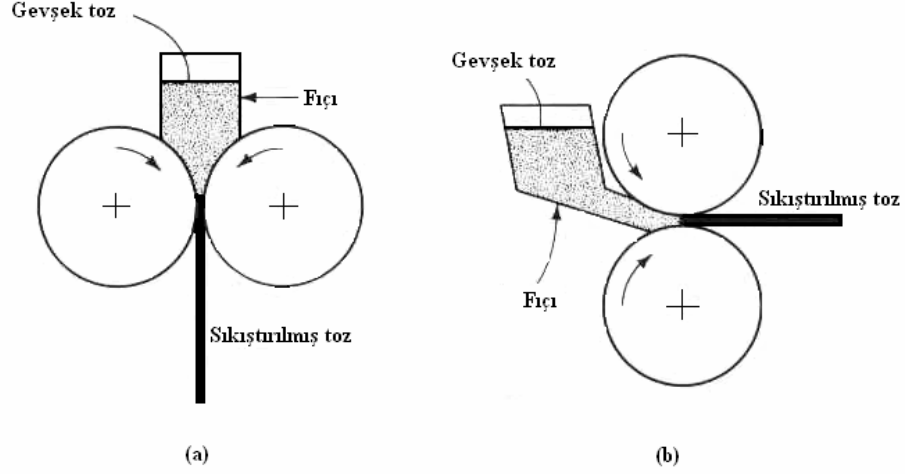


Şekil 2.3 Metal kalıpta presleme (a) Tek etkili presleme, (b) Çift etkili presleme

#### 2.3.6.2.2 Metal Tozlarının Haddelenmesi.

Bu yöntem çubuk, levha ve şerit gibi basit geometrik şekle sahip parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi tozlar bir besleyiciden haddelerin arasına akıtılarak sıkıştırılabilirler ve böylece sürekli biçimlendirme gerçekleştirilebilir. Haddeler arası mesafe istenilen sıkıştırmayı sağlayacak şekilde ayarlanır. Yatay ve düşey olmak üzere iki pozisyonda haddelikle tozlar sürekli olarak sıkıştırılabilirler. İstenildiği takdirde ikili, üçlü sandöviç haddelikle mümkündür. Hadde silindirlere sonra yerleştirilecek bir fırınla sürekli pişirme ve

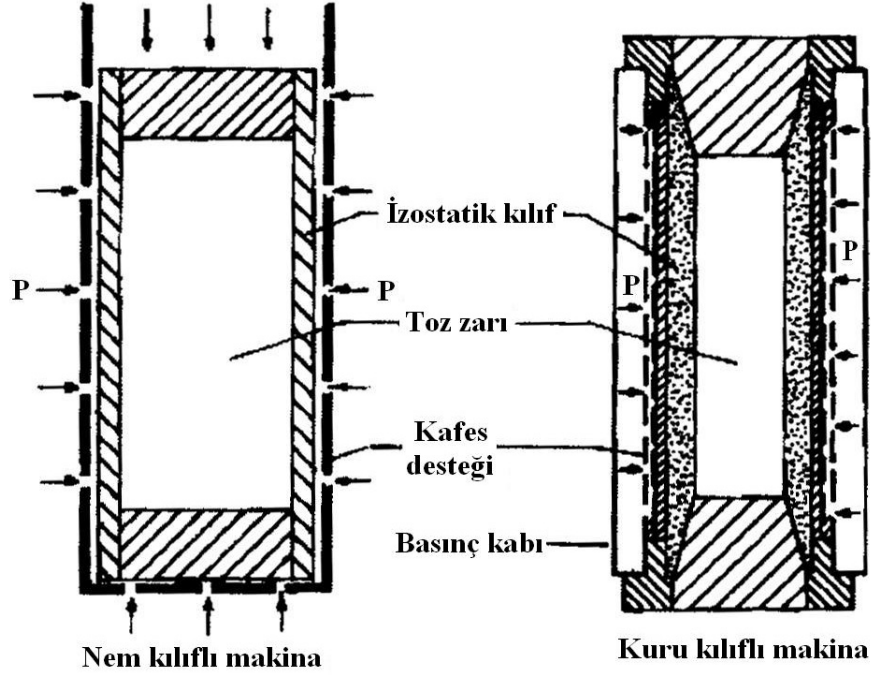
onu takiben sıcak haddeleme işlemleri kullanılarak sac malzeme üretilebilir (Upadhyaya, 1996).



Şekil 2.4 Metal tozlarının haddelenme şekilleri (a) dikey pozisyonda ve (b) yatay pozisyonda.

#### 2.3.6.2.3 İzostatik Presleme.

İzostatik presleme, tozların bir hidrolik basınç altında preslenmesidir. Presleme genellikle bir yağ veya su içinde ve oda sıcaklığında soğuk olarak yapılır. Parçanın şeklinde esnek bir kalıp hazırlanır (Şekil 2.5) ve içi tozla doldurulur. İçindeki hava boşaltılır ve gerekli sızdırmazlık sağlandıktan sonra basınç kazanına atılır. İzostatik preslemede kalıp sürtünmeleri olmadığından ve basınç her yönde eşit olduğundan yoğunluk dağılımı ve mekanik özellikler izotropiktir. Yöntemin dezavantajları hasas boyutsal tolerans elde edilememesi ve yavaş olmasıdır. Bununla birlikte 700 N/mm<sup>2</sup>'ye kadar basınçlarda ve 1200°C'ye kadar sıcaklıklarda izostatik presleme ile her türlü refrakter metal ve seramik biçimlendirilebilir. Süper alaşımlı uçak türbini diskleri ve takım çeliği kütükleri başlıca örneklerdir.



Şekil 2.5 Nem ve kuru kılıflı izostatik presleme

İzostatik preslemenin avantajlarını aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

- Preslenmiş parçalarda uniform yoğunluk,
- Yüksek ham yoğunluk, aynı presleme değerinde metal kalıpla preslemeye göre %5-15 oranında daha yüksek yoğunluk değeri elde edilebilmektedir,
- Yüksek ham mukavemet ve iyi kullanma özellikleri,
- Azaltılmış iç gerilmeler,
- Bağlayıcı veya yağlayıcı kullanmadan kompakt toz parça olanağı,
- Yüksek uniform yoğunluk ve boyun kesit alanına oranı büyük olan veya karmaşık şekilli kompakt parçaların üretim olanağı,
- Kompozit yapıların kolayca elde edilebilmesi,
- Lastik veya plastik kalıplar kullanıldığından düşük aparat maliyeti,
- Düşük malzeme ve bitirme işlemi maliyeti.

Dezavantajları ise,

- Rijit metal kalıpla preslemeye göre daha düşük boyutsal kontrol,
- İzostatik olarak preslenmiş kompakt parçaların yüzeyleri daha az pürüzsüzdür,

- c) İzostatik preslemede kullanılan esnek kalıplar, rijit çelik veya karbür kalıplara göre daha kısa ömre sahiptirler.

### 2.3.6.3 Sinterleme

Sinterleme toz metalürjisinde uygulanan bir ısıl işlemdir. Yani metalik ve seramik tozları veya preslenmiş tozları ana tozun ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutmaktır. Çoğu durumda sinterleme, karışık şekilli bileşiklerden küresel gereçler üretilen endüstriyel toz metalürjisi yönteminin son basamağını oluşturur. Sinterleme yüksek sıcaklıklarda toz partükülerinin birleştiği ısıl bir yöntem olup, ana toz malzemesinin ergime sıcaklığının altında yapılmasına rağmen, sıvı faz sinterlemesi de söz konusu olabilir. Sinterleme, bir toz kümesine uygulanarak ve istenilen şekildeki tozların boyutlarını ve gözenekliliğin geometrisini değiştirerek tozların mukavemetli bir şekilde birleşmesini sağlamak için yapılır. Bu yöntemler temelde katı durumlarda ele alınır ve denge durumunda atomik seviyede aktivasyonla kütle transferi ile incelenir (Salak, 1995; Somunkiran ve Özel, 2006).

Sinterleme sırasında kullanılan toz karışımı, tek çeşit malzemedен oluşursa buna tek bileşenli sistem, birden fazla malzemedен oluşursa buna da çok bileşenli sistem adı verilir. Tek bileşenli tozların sinterlenmesinde sinterleme sıcaklığı yaklaşık olarak  $T_s=0,8T_m$  olarak alınabilir (Burada  $T_s$  : sinterleme sıcaklığı ve  $T_m$ : ergime sıcaklığıdır). Çok bileşenli tozlarda ise bileşenlerden birinin ergime sıcaklığının hemen altında veya üstünde alınabilir (Avcı, 1993). Tek bileşenli tozlarda katı hal difüzyonu söz konusu iken, çok bileşenlerde seçilen sıcaklığa göre katı veya sıvı hal difüzyonu meydana gelmektedir.

Sinterleme esnasında seçilen sıcaklığa bağlı olarak taneler arası bağ oluşumu adhezyon, yüzeysel ve hacimsel difüzyon yolları ile gerçekleşmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak sinterleme esnasında aşağıdaki iki temel değişiklik meydana gelmektedir:

- Taneler arası temas oluşumu ve temas yüzeyinin büyümesi,
- Gözeneklerin azalması ve hacimsel olarak küçülmeleridir.



Yukarıda saydığımız bu temel oluşumlar (iki temel oluşum) tek bileşenli ve çok bileşenli sistemlere göre farklılıklar göstermektedirler.

### 2.3.6.3.1 Sinterleme Süresi, Sıcaklığı ve Atmosferi.

Sinterlemede, üretilecek parçanın özelliklerine göre sinterleme sıcaklığı ve süresinin belirlenmesi gerekir. Parçalardaki düşük yoğunluk ve dayanımın esas nedeni düşük sinterleme sıcaklığı ve süresininin seçilmesidir. Bu sıcaklık ve süre genellikle deneysel olarak saptanır. Sinterleme sıcaklığı tozun (toz bileşeninin) ergime sıcaklığına mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Ancak sinterleme süresi için bir değer vermek zordur. Tablo 2.3’de bazı metal ve alaşımları için sinterleme sıcaklıkları ve süreleri verilmektedir.

Tablo 2.3 Bazı metal ve alaşımlarının sinterleme sıcaklıkları ve süreleri (Avcı, 1993)

Toz Malzemesi	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (Dakika)
Bronzlar	760-870	10-20
Pirinçler	843-898	10-45
Bakır	843-898	12-45
Çelik, Karbonlu çelikler	1010-1148	8-45
Paslanmaz Çelikler	1010-1148	30-45
Tungsten Karbürler	1426-1482	20-30
Ferrit	1204-1482	10-600
Molibden	2054	120
Tungsten	2343	480
Tantal	2398	480

Sinterleme sırasında yüksek sıcaklıklara ulaşıldığından, bu sıcaklıklarda toz malzemenin havadaki bir takım gazlarla reaksiyona girmesi söz konusu olmaktadır. Bu nedenle sinterleme işlemi koruyucu atmosfer altında gerçekleştirilir. Koruyucu atmosfer olarak koruyucu gazlar veya vakum kullanılmaktadır. Sinterlemede en çok kullanılan koruyucu atmosfer Hidrojen, parçalanmış amonyak ( $2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2$ ),

yanmış amonyak, ekzotermik gaz, temizlenmiş ekzotermik gaz, endotermik gaz ve vakum atmosferidir.

#### *2.3.6.3.2 Sinterleme Fırınları.*

Sanayide çeşitli tipte sinterleme fırınları vardır. Bu fırınlar elektrik direnç veya indüksiyon ısıtıcısı olan özel tip fırınlar veya yakıt olarak gaz veya sıvı yakıtın kullanıldığı fırınlardır (Ştetnberts, 1991; Laktek ve Leonteva, 1990).

Hafif metallere hazırlanmış toz metallere sinterlenmesinde, elektrik direnç fırınları kullanılmaktadır. Bu fırınların duvarlarına yerleştirilmiş, genellikle nikromdan veya tungstenden yapılmış yüksek elektrik direncine sahip elementten akım geçirildiğinde fazla miktarda ısı açığa çıkar. Bu ısı iş parçasının imalat sıcaklığına kadar ısıtılmasında kullanılır. Elektrik direnç fırınında alevin olmaması metal kaybını önemli ölçüde düşürür. Bu fırınlarda işlem soygaz atmosferi altında veya vakum altında gerçekleştirilerek, oksijene ilgisi fazla olan metallere ısıtılması esnasında meydana gelen oksitlenme ortadan kaldırılır (Skorokod, Solenin, 1984; Radomiselskiy, Serdyuk ve Şerban, 1985).

İndüksiyon fırınları zengin perspektife sahiptir. İmal edilecek iş parçası, bakır borudan yapılmış indüktörün içerisine yerleştirilir ve sistemden yüksek frekanslı akım geçirilir. Bunun sonucunda indüktör içerisine yerleştirilmiş iş parçasında indüksiyon akımı (girdap akımı) meydana gelir. Sonuçta iş parçası istenilen sıcaklığa kadar ısıtılmış olur. Bakır indüktörün ergimesini önlemek için bakır boru içerisinden su geçirilir. İndüktöre verilecek akım frekansı iş parçasının boyutuna göre değişir. İş parçasının çapı büyüdükçe akımın frekansı düşer. Örneğin, iş parçasının çapı 50-180 mm arasında ise akımın frekansı 8000 Hz'den 50 Hz'e kadar düşmektedir. Akımın frekansı arttıkça nüfuz etme derinliği azalır. Bundan dolayı çok kalın iş parçalarının ısıtılmasında düşük frekanslı akım kullanılmaktadır (Meskin, 1984; Ermakev, 1991).

#### *2.3.7 Demir Esaslı Toz Malzemeler*

Toz parçaların imal edilmesinde kullanılan malzemeler büyük öneme sahiptir. Uygulamada %60 oranında demir esaslı toz malzemeler kullanılmaktadır. Bu

malzemeler çeşitli tozlardan ve toz karışımlarından elde edilmektedir. Bununla ilgili pek çok araştırma yapılmıştır. Makine elemanları ve cihazları demir esaslı malzemelerden, pirinçten, bronzdan, alüminyumdan ve onların alaşımlarından yapılmaktadırlar (Radomıselıkiy, 1985; Şükürov, 2002; Ermakov ve Vyazinkov, 1980; Şteynberq, 1981). Demir esaslı toz metal malzemeler otomotiv endüstrisinde yüksek aşınma dayanımlı motor ve şanzıman sisteminde, geniş uygulama alanı bulmaktadır.

Günümüzde toz metalürjisi yöntemiyle çeşitli isimde ve şekilde, basit ve karmaşık makine elemanları üretilmektedir. Aynı zamanda klima üretiminde de bu tip elemanların üretim uygulamaları vardır. Yapılmış pek çok deney, demir esaslı toz konstrüksiyon malzemelerinin yüksek dayanıklılığa ve yoğunluğa sahip olduğunu göstermiştir. Bu malzemelerin aynı zamanda da döküm ve haddelemeyle elde edilmiş uygun elemanların özelliklerine yakın özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Hazırlanan toz malzemelerin daha spesifik özelliklere sahip olması için birincil tozların iyi seçilmesi gerekir ve onların elde edilmesi için yeni yöntemlerden yararlanılması gerekir. Demir tozunun kullanımı giderek daha geniş alana yayılmaktadır (Federçenko, Françeviç ve Radomıselıkiy, 1985).

Konstrüksiyon malzemelerinin yoğunluğunu artırma yöntemleri de çok çeşitlidir. Bu yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Bir kaç defaya presleme ve sinterleme,
- Hidrostatik ve izostatik presleme,
- Sıcak presleme,
- Tozların yayılması (haddeleme) ile presleme,
- Sıvı metalle implante etme,
- Darbeli presleme,
- Gözenekli iş parçasını sıcak dövme,
- Metal kalıpta presleme,
- Sıvı metalle emdirme,
- Sıvı metal fazda sinterleme.

Bazı konstrüksiyon malzemelerinin elde edilmesi için yüksek basınçlara ihtiyaç duyulur. Bu ise sıkıştırma kalıbının daha çabuk aşınmasına ve hasara uğramasına neden olur (Radomıselkiy, Peçentkovskiy, ve Serdyug, 1990; Federçenko, 1985; Roman, 1982).

Aşınmaya çalışan sinterlenmiş demir esaslı konstrüksiyon malzemelerinden üretilen parçalar makine ve cihaz yapımında geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bu parçaların hazırlandığı malzemeler, yüksek dayanımla birlikte, yüksek sertliğe ve aşınmaya karşı dayanıklılığa sahip olmalıdırlar. Bunların yanında düşük sürtünme katsayısına da sahip olmalıdırlar (Dorodiev, 1992, 1999).

Bazı bilimsel çalışmalarda, az yükte (gerilmelerin önemli olmadığı yerler) ve orta yükte yüklenmiş (orta değerlerde gerilmelerin etkili olduğu yerlerde) demir esaslı konstrüksiyon elemanları hakkında üretim teknolojileri araştırılmıştır. Bu malzemelerden imal edilen parçalar bir ve iki defa preslenip sinterlenmektedirler. Burada uygulanan işlem parametreleri:  $P_1 = 700 - 800 \text{ N/mm}^2$ ;  $P_2 = 1000 \text{ N/mm}^2$  ve  $T_1 = 800^\circ \text{C}$ ;  $T_2 = 1050 - 1100^\circ \text{C}$ ;  $t = 7200 \text{ saniye}$  değerindedirler. Koruyucu ortam olarak endogaz ( $\text{CH}_4 + [\%3.8\text{N}_2 + \text{O}_2] = \%20 \text{ CO} + \%40 \text{ H}_2 + \%40 [\%3.8 \text{ N}_2]$ ) ortamı kullanılır ve bu gaza  $\%0.5-1$  doğal metan gazı ilave edilir (Dorodiev, Marinenko ve Ustimenko, 1986; Bondarenko, 1993).

Toz metalürjisinin en önemli amaçlarından birisi üretim işleminde yeni, değişmez yapıya sahip malzemenin elde edilmesidir. Çeşitli dönel makine elemanları, toz metalürjisi yöntemleri kullanılarak demir tozlarından üretilmektedir. Burada numuneler,  $600 \text{ N/mm}^2$  basınç altında preslenmekte ve  $1150^\circ \text{C}$ 'de hidrojen atmosferi altında sinterlenmektedir. Sinterlemeden sonra gözeneklilik oranı  $\%18-25$  olmaktadır.

Değişmez yapılı malzemelerde, perlit ve ferritin yüzdesi eşit olur. Değişken yapılı malzemelerde perlitin, ferritin, serbest garfitin ve serbest yapılı sementitin yüzdesi aynı değildir. Demir esaslı toz metal parçalara, mekanik özellikleri iyileştirmek amacı ile değişik ilaveler yapılmaktadır. Bu ilaveler mekanik özelliklerin yanı sıra parçaların işlenebilirlik özelliklerini de etkiler. İşlenebilirlik özelliklerini geliştirmek

için toz karışımına sık sık Pb, Bi, Te, S, P, CaO, MoS<sub>2</sub> ve MnS gibi ilaveler yapılmaktadır. Düşük miktarlarda kullanılan bu alaşım elementleri, toz metalürjisi ile üretilen malzemelerin işlenebilirlik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Alaşımlama amacıyla en çok kullanılan alaşım elementlerinden birisi kromdur (Cr). Kromlu malzeme, genellikle %30-50 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; %2-6 NH<sub>4</sub>Cl ve %45-65 ferrokrom içerir. Preslenmiş numuneleri difüzyonla kromlamak yüzeyde yüksek sertlik ve dayanım oluşturduğu gibi, korozyon direnci yüksek olan toz malzemelerin elde edilmesine de olanak sağlar. Bu tür malzemeler, döküm için kalıplar ve plastik malzemelerin preslenmesinde kullanılmaktadır (Federçenko, 1985; Bilgi Kitapçığı, 1984).

Zhang ve Sandstron (2004) yaptıkları çalışmada Fe esaslı toz metal malzemeyi %3,2 Mn, %1,2 Si ve %0,35 C'la alaşımlandırmışlar ve ayrıca sinterleme sıcaklığını ve sinterleme süresini değiştirerek bu toz metal karışımının mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapılan inceleme sonucunda sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresinin artmasıyla toz metal malzemenin çekme dayanımının ve sertlik değerinin yükseldiği belirlenmiştir. Kompaktlar (preslenerek elde edilen parçalar) 1100°C, 1150°C ve 1200°C sıcaklıklarda sinterlendikleri zaman, artan sinterleme süresinin her 30 dakikası için çekme dayanımının en az 80 N/mm<sup>2</sup> arttığı bu çalışmada tespit edilmiştir. Sertlik değeri ise; 1150°C sinterleme sıcaklığında, 30 dakikalık sinterleme süresi için 263HV iken, sinterleme süresi 60 dakikaya çıktığında sertlik değeri 283HV ve 90 dakikaya çıktığında 300HV olmuştur. (Zhang ve Sandstron, 2004).

En fazla kullanım alanı bulan malzemelerden biri de gözenekli demir esaslı alaşımı bakır ve pirinçle karıştırarak yüksek dayanıma sahip toz metal parçaların imal edildiği malzemelerdir. Çeliklerin sinterlenmesinde sıvı faza çabuk geçerek şekillenen alaşım elementi bakırdır. Toz metalürjisinde bakır sertliği yükseltmek ve sinterlemede sıvı faz oluşturmak için kullanılır. Çelik toz metal malzemelerde çekme dayanımı; artan yoğunluk ve bakır ilavesiyle artar. Bu tür malzemelerin çekme dayanımı 600-1000 N/mm<sup>2</sup> arasındadır. Ancak bu değer malzemenin bileşimi ve ısıl işlemine bağlıdır. Düşük miktarlarda bakır ilavesi katı eriyik sertleşmesiyle mukavemeti yükseltirken, yüksek miktarlardaki bakır ilavesi sıvı faz sinterlenmesinin neden olduğu daha hızlı yoğunluk artışı ve homojenizasyon gerçekleştirir ve bu sayede mukavemet artışı sağlar (Upadhyaya, 2001).

Saf demir tozlarından üretilen parçalar genellikle sinterleme sırasında büzülür ve bu tozlara % 1–3 oranında bakır ilavesi sinterlenme sırasındaki büzülme telafi eder (German, 1997). Yüksek bakır içeriği, ham yoğunluğa ve bakırın ilavesine bağlı olarak tane boyutlarını artırır. Bakır miktarı nihai üründe arzu edilen miktara bağlı olarak %1 ile % 8 arasında değişmektedir.

Zhang ve ark.'ları (2004) sıvı faz sinterlemesi sırasında bakırın ergime sıcaklığının üzerine çıkıldığı sıcaklıklarda, Fe esaslı toz metal malzemeye ilave edilen bakır miktarının toz metal malzemedeki meydana getirdiği boyut artışı ile ilgili bir modelleme çalışması yapmışlardır. Çalışmada bakır miktarının artmasıyla orantılı olarak sinterlenmiş parçada doğrusal olarak artan bir boyut artışı olduğu tespit edilmiştir. Lawcock ve Devies yaptıkları çalışmada 1150°C'de yapılan sinterleme sırasında maksimum hacimsel büyümenin %8 Cu miktarında sağlandığını bildirmişlerdir. Wanibe ve ark. ise maksimum hacimsel artışın 1150°C sinterleme sıcaklığında ve toz karışımının %10 Cu içermesi durumunda sağlandığını bulmuşlardır. Demir ve bakır tozlarının ısıtılma sıcaklıkları, tane boyutu, tane şekli, tane boyut dağılımı, tozlardan elde edilen kompaktların (preslenerek elde edilen parçaların) ham yoğunluğu, tozların saflık derecesi, tozların karıştırılma derecesi ve demir tozu tanelerinin yüzeyindeki mikrogözenekler gibi faktörler hacimsel büyümeye etki etmektedirler. (Zhang, Sandström ve Wang, 2004).

Gülsoy ve ark.'ları (1997) parçalanmış amonyak atmosferi altında 1225°C sinterleme sıcaklığında, 30 dakika sinterleme süresinde toz metalürjisi ile üretilen Fe-Cu kompaktlarında, %2 ila %3,5 arasında değişen bakırın kompakt parçaların mekanik özelliklerine etkisini incelemişler ve %2 bakır içeren kompaktta kopma mukavemeti değeri 183 N/mm<sup>2</sup>, çentik darbe enerjisi değeri 18,632 Joule, sertlik değeri ise 57,5 HRF iken, %3,5 bakır oranında kopma mukavemetini 209 N/mm<sup>2</sup>, çentik darbe enerjisini 13,729 Joule ve sertlik değerini 67 HRF olarak tespit etmişlerdir. Buradan da görüleceği üzere artan bakır miktarıyla birlikte demir esaslı toz metal kompaktlarının çekme mukavemeti ve sertlik değerleri artmakta, çentik darbe enerjisi ise düşmektedir (Gülsoy ve ark., 1997).

Babayev ve ark.'ları (2005) %3 bakır içeren demir esaslı toz metal malzemelerin 1150°C sinterleme sıcaklığı, 45 dakika sinterleme süresi, koruyucu endotermik gaz atmosferinde ve değişik soğuk presleme basınçlarında elde edilmiş malzemelerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacıların yapmış oldukları incelemeler sonucunda, sürtünme katsayısı ve aşınma kayıplarının soğuk presleme basıncı değerinin, 400 N/mm<sup>2</sup>'dan 700 N/mm<sup>2</sup>'a çıktığında düştüğünü tespit etmişlerdir (Babayev ve ark., 2005).

Yüksek dayanım istenilen demir esaslı çelik malzemelerin toz metalurjisi ile üretiminde, karbon çoğunlukla kullanılan alaşım elementi olup, sertliği artırmaktadır. İnce grafit, demir tozları ile karıştırıldığında sinterleme sırasında hızlı bir şekilde demir içerisinde çözünmektedir (Yılmaz, 2005).

Gülsoy ve Salman (1996) %3 bakır katkılı demir tozuna karbon ilavesinin etkisini incelemişler ve karbonsuz numunelerde sertlik değeri yaklaşık 30 HRB iken, %1,25 karbon ilaveli numunelerde sertliğin 70 HRB değerine çıktığını bulmuşlardır (Gülsoy ve diğerleri, 1999). Gülsoy ve Salman demir-bakır toz karışımlarına farklı miktarlarda karbon ilaveleri yaparak sabit sıcaklık ve sinterleme sürelerinde karbonun çekme dayanımı ve çentik darbe dayanımı üzerine etkilerini incelemişler ve artan karbon ilavesiyle kopma mukavemeti değerleri artarken, darbe enerjisinde düşüş olduğunu tespit etmişlerdir. Karbonsuz numunelerde kopma mukavemeti 216 N/mm<sup>2</sup>, darbe enerjisi 16 Joule iken, %1,25 karbon oranında kopma mukavemeti 392 MPa, darbe enerjisi 8,5 Joule olmuştur (Gülsoy ve Salman, 1996; Yılmaz, 2006).

Çetinkaya ve ark.'ları (2004) ön alaşımlı demir tozu ve bakır katkılı demir tozu kompaktlarına karbon katkısının sinterleme sonrası özelliklere etkisini araştırmışlardır. %3 bakır ilave edilen demir tozuna ağırlıkça %1'e kadar değişik oranlarda karbon ilave edilerek, karışımlar 500 N/mm<sup>2</sup> basınç altında çift etkili preste sıkıştırılmışlardır. Çalışmada %3 bakır içeren demir tozundan üretilen numunelerin karbon içeriği arttıkça sertliklerinin de arttığı tespit edilmiştir. Numunelerde artan karbon miktarı ile sertlik değerlerinin artmasının sebebi, ilave edilen karbonun sinterleme sırasında ostenit tanelerine difüzyonu ve soğuma sırasında perlit oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Perlit,  $\alpha + Fe_3C$  fazlarından meydana

geldiğinden, yapıda bulunan sementit sertlik artışına neden olmuştur. Ayrıca sinterleme sıcaklığı bakırın ergime noktasının üzerinde yapıldığı için, bakırın sıvılaşması sonucu sıvı faz sinterlemesi gerçekleşmiştir. Burada, toz karışımına eklenen bakır, ferritik tane sınırlarında bulunurken, artan karbon miktarı ile sinterleme sonrası soğuma sırasında oluşan perlit içerisine doğru yayılmaktadır (Çetinkaya, Cumbul ve Oktay, 2004).

Yılmaz (2005), 1200°C sinterleme sıcaklığı, 30 dakika sinterleme süresinde ve parçalanmış amonyak atmosferinde farklı oranlarda tozlar karıştırılarak toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş kompakt parçaların mekanik özelliklerine presleme basıncı değişiminin etkisini incelemiştir. Araştırmacı incelemelerinde aşağıda sıralanan bulgulara erişmiştir;

- Farklı toz karışım oranlarında ve farklı basınçlarda sıkıştırılan Fe-Cu-C toz metal kompakt malzemelerde presleme basıncı artışına paralel olarak sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değerleri artmakta olup, presleme basıncı arttıkça yoğunluk değerlerindeki artış yavaşlamaktadır. Sinterleme öncesi ve sonrası numunelerin yoğunluk değerleri arasındaki fark oldukça azdır.
- Kompakt malzemenin sertlik değerleri, içerisindeki bakır ve karbon miktarı arttıkça artmaktadır. Üretilen kompakt malzemelerin çekme mukavemet değerleri, presleme basıncının artması ve karışım içerisindeki bakır ve karbon miktarının belirli bir orana kadar yükselmesiyle artmakta ve bakır ve karbon miktarlarının belirli bir değerinden sonra azalmaktadır (Yılmaz, 2005).

Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen demir esaslı molibden, nikel, bakır ve karbon ilaveli toz karışımları yüksek mukavemet ve tokluk sağlanması amacıyla geliştirilmiştir. Somunkıran ve Çelik (1999) toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Fe esaslı (Ni, Mo ve C ilaveli) toz karışımına Cu (%3, 4, 5, 6 ve 7 oranlarında Cu ilave ederek) katkısıyla üretilen kompaktların 1120°C'de parçalanmış amonyak atmosferinde sinterlenmesi sonrası mekanik özelliklerini incelemişler ve artan bakır miktarı ile birlikte basma mukavemetinin 560,8 N/mm<sup>2</sup>'den 620,2 N/mm<sup>2</sup>'ye yükseldiğini saptamışlardır. Ayrıca artan bakır miktarı ile sertlik değerinin 87,4 HRB'den 92,6 HRB'ye yükseldiğini tespit etmişlerdir (Somunkıran ve Çelik, 1999).



Somunkıran ve Özel (2006), toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Fe esaslı (Ni, Mo ve Cu ilaveli) toz karışımında, farklı sinterlenme sıcaklıklarının, aşınma direncine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada  $600 \text{ N/mm}^2$  basınç altında preslenen numuneler argon gazı atmosferinde  $1000^\circ\text{C}$ ,  $1050^\circ\text{C}$ ,  $1100^\circ\text{C}$ ,  $1150^\circ\text{C}$  ve  $1200^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda 30 dakikalık sürelerde sinterlenmiştir. Fe esaslı toz karışımında sinterleme sıcaklığının artmasıyla sertlik değerinde artış ve aşınma miktarında azalma olmuştur. Sıvı fazın oluşması ile ergiyen bakırın taneler arasında sıvı faz oluşturması, Cu'nun bağlayıcılık görevi görmesi ve tane içlerine doğru difüzyonu ile taneler arası bağı güçlendirmesiyle, aşındırıcıya karşı malzemeyi daha dayanıklı hale getirmiştir (Somunkıran ve Özel, 2006).

Meapace ve ark.'ları (2002) Demir esaslı toz metal parçalara bakır infiltrasyonunun mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Burada değişik miktarlardaki (%5, %10 ve %15) bakır tozlarının, yoğunlukları  $6,7 \text{ g/cm}^3$  ve  $7 \text{ g/cm}^3$  olan, Fe esaslı toz metal malzemelerin özelliklerine etkisi incelenmiştir. Artan bakır miktarıyla demir esaslı toz metal malzemenin yoğunluk ve sertlik değerlerinde artış tespit edilmiştir. Ayrıca artan bakır oranıyla birlikte Fe esaslı toz metal malzemede sinterleme sırasında hacimsel genişleme yüzdesi de artmaktadır (Meapace, Molinari, Bortolotti ve Costa, 2002).

Demir-bakır, demir-karbon, demir-bakır-karbon karışımları çok kullanılan bazı toz metal malzemelerdir. Bunların dışında metal dışı malzemeler (örneğin; oksitler, karbürler v. s.) metal tozlarla birlikte kullanılabilir (Yılmaz, Ünlü ve Varol, 2005).

Sinterleme ile elde edilen toz malzemelerden hazırlanmış elemanlar, örneğin; dişli çarklar, gövdeler v.b. sanayinin bir çok alanında kullanılmaktadır. Dişli çarkların ve gövdelerin toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesi işçilik harcamalarını düşürmektedir. Bu harcamalar, yaklaşık olarak %58 civarındadır (Ançiderov, 1987; Ermansev, 1975).

Bütün bu araştırmalar, yüksek verimli üretim yöntemleriyle toz malzemeleri elde etmek, yukarıda gösterilen teknolojik yöntemler, tekrar preslemeler ve sinterlemeler, saf metalle emdirme, pahalı alaşım elementleriyle alaşımlama v.b. bir çok üretim için

istenen talepleri karşıladığını göstermektedir. Bu amaçla tekniğin gelişimi açısından yeni, yüksek verimliliğe sahip yöntemler bulmak, malzeme bilimi için en önemli problemdir. Örneğin, klima kompresörü gövdesini toz malzemelerden difüzyon kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak ile elde etmek, yukarıda sıralanan problemlerden birisidir. Bu problemin çözümü ise toz malzemelerin yapı ve özelliklerinin uygunlukları belirlendikten sonra elde edilebilmektedir.

## **2.4 Difüzyon Kaynağı**

### **2.4.1 Tanım**

Difüzyon kaynağı bir katı hal kaynağıdır. Katı hal kaynağı malzemelerde boyutsal ve metalürjik dönüşümlerin meydana gelmediği bir birleştirme yöntemidir. Burada meydana gelen birleşme temas yüzeylerine uygulanan yüksek sıcaklıklardaki basınç sayesinde sağlanır. Bu işlem ideal olarak makroskopik deformasyona, ergimeye veya parçaların karşılıklı hareketine yol açmaz. Burada katı dolgu metali kullanarak veya kullanmadan birleştirilen parçaların temas yüzeyleri arasında difüzyon oluşturulur. Birleşmenin temel mekanizmasını katı hal difüzyonu oluşturmaktır. Eğer malzemelerin ara yüzeylerinde uygulanan sıcaklıkla eriyen bir tabaka kullanılmışsa, bu halde sıvı faz difüzyonu kaynağı meydana gelir (Dixon, 1984; Kurt ve ark., 1998; Ozan ve ark. 2006).

Kristal yapıya sahip malzemelerin atomları arasındaki çekim kuvveti, kohezyon kuvvetini meydana getirir. Normal olarak her bir atom, kristal içinde üzerine etki eden kuvvetlerin bileşkesinin sıfır olduğu dengeli durumda bulunur. Katı malzemeler, dış kuvvetlerin etkisi altında kalırsa, atomların dengeli durumları bozulur. Malzeme kristallerindeki atomlarda, dış kuvvetin etkisiyle bir kuvvet oluşur. Bunun sonucu olarak atomlar arasında çeki kuvveti, atomların birbirinden uzaklaşma miktarları ile orantılı olarak büyür (Salehi, 1990).

Farklı iki katının yüzeyleri arasında oluşan çekim kuvvetine ise adhezyon kuvveti denir. Aynı anda farklı iki katının bir araya getirilmesi, yüzeyler arasında bağ oluştururken, aynı cins katı yüzeyler arasında kohezyon, farklı cins yüzeyler arasında adhezyon birleşmeyi sağlar. Kohezyon ve adhezyon işi serbest yüzey enerjisinin bir

fonksiyonudur. Ayrıca iki gevrek malzeme veya bir gevrek bir sünek malzemeden oluşan bir bağlantı için adhezyon işi, bağlantı kuvvetinin bir ölçüsüdür. Adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin meydana gelebilmesi için, bağlantı uygulanacak malzeme yüzeylerinin atomlar arası bağın oluşabileceği bir yakınlıkta birbirlerine yakınlaştırılmaları gerekir (Pakdil, 2001).

Birleştirilecek parçaların yüzey temasını sağlamak ve atomik difüzyon için kimyasal potansiyel farkı oluşturmak amacıyla uygulanan basınç değeri malzemenin makro deformasyon değerinin altında olmalıdır. Temas alanında basınca bağlı mikro deformasyon değeri arttıkça difüzyon hızı artmaktadır (Kurt ve ark., 1998).

Difüzyon kaynağı ile birleştirme işlemine başlayabilmek için, iki malzeme yüzeylerinin yabancı maddelerden ve makro pürüzlülüklerden arındırılmış bir şekilde temas haline getirilmesi gerekir. Atomik difüzyonun başlangıcında yüzey pürüzleri ve oksit gibi yüzey atıkları bir engel oluşturmaktadır. Bu nedenle yüzey, atomik geçişe engel olan oksitlerden arındırılmış olmalıdır. İki yüzey arasında bağ oluştuktan sonra, sıcaklık yardımıyla difüzyon başlar ve yüzeylerin arakesitindeki boşluklar doldurulur. Birleşmenin sağlıklı olabilmesi için koruyucu bir atmosferde difüzyon kaynağının yapılması gerekir.

Katı hal kaynağı aynı zamanda ergitme kaynağında kırılğan intermetalik yapı oluşturabilen farklı malzemelerin kaynağını kolaylaştırmaktadır. Bu bileşiklerin oluşum miktarı katı hal kaynağında ergitme kaynağına göre oldukça azdır. Katı hal kaynağında, daha uygun birleşme yüzeyleri olduğundan, kırılğan intermetalik bileşimlerin oluşumu ayrıca azalmaktadır.

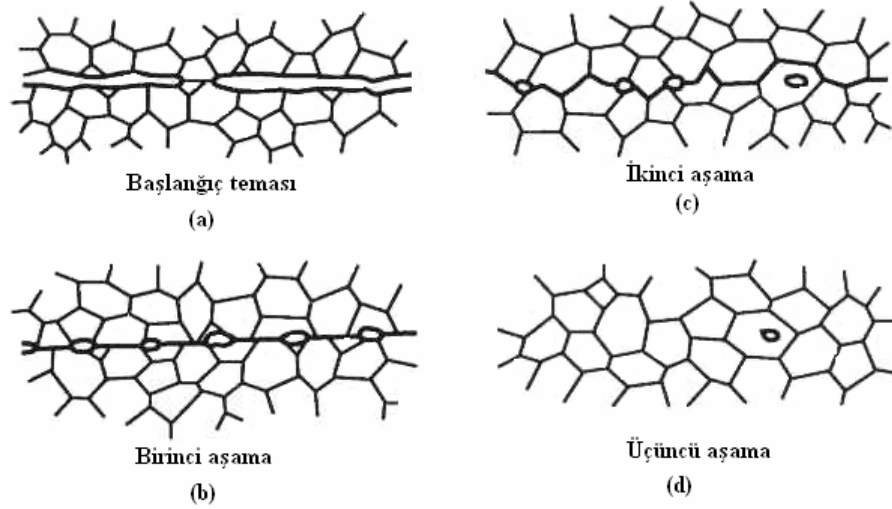
Büyük boyutlu parçaların kaynağında difüzyon kaynağının ergitme kaynağı yerine kullanılması zorluk çıkarmaktadır. Buna neden olan en önemli etkenler maliyet ve geometrik sınırlamalardır. Ancak, yüksek sıcaklıktan kaçınma veya malzemelerin ergitme kaynağına uygun olmaması veyahut da ergimenin tolere edilmediği mühendislik uygulamalarında, yüksek maliyet gözardı edilebilir. Difüzyon kaynağının başlıca avantajları, en aza indirgenmiş distorsiyon ve kalıntı gerilmeler içermesi, kaynak sonrası işlemlerin azalması, geniş ve ulaşılmaz alanlarda birleşme yeteneğidir (Ananthanarayanan, 1988).

Difüzyon kaynağı birçok malzemenin kaynağı için, özellikle geleneksel ergitme kaynağı işlemlerinin yetersiz kaldığı veya uygulanamadığı durumlarda kullanılan etkili bir birleştirme yöntemidir.

#### 2.4.2 Difüzyon Kaynağı Mekanizması

Difüzyon kaynağıyla ilgili birbirinden farklı bir çok model ileri sürülmüştür. Bunun nedeni ise sınırlı bir süre için basınçla ısının birlikte uygulanmasıyla bağ oluşturma mekanizmalarının oldukça karmaşık olmasıdır. Bu konu bir çok çalışmada detaylı olarak incelenmiş ve tartışılmıştır.

Bu konuda ilk teorik yaklaşım 1944 yılında Kinzel tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra 1965 yılında Gerken ve Owezarski üç safhalı bir mekanizma ileri sürmüşlerdir. Bu üç aşamalı mekanizma şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması (a) yüzey pürüzlerinin başlangıç teması, (b) birinci aşama mikro deformasyonu ve sınır bağ düzeni, (c) ikinci aşama tane sınırı göçü ve gözeneklerin yok edilmesi, (d) üçüncü aşama hacim difüzyonu ve gözeneklerin elimine edilmesi (Mahoney & Bampton, 1984).

Birleştirilecek yüzeylerin birbirlerine teması sağlanıp, kaynak için gerekli sıcaklık ve zamana ulaşılması ile yüzeyler arasında temas alanı artar. Kaynağın birinci aşamasında, yüzeydeki pürüzlülüklerde akma ve sürünme mekanizmaları ile ara yüzeyde büyük bir alanda temas sağlanır. Bu aşamanın sonunda birleşme genelde tane sınırlarında meydana gelir. Basıncın etkisiyle yüzeydeki oksitler kırılarak,

oksitlerin kırılmış olan noktalarından atom akışı başlar. İkinci aşamada, difüzyon mikro deformasyondan daha önemlidir. Bir çok gözenek bu aşamada tane sınırı difüzyonu sonucunda yok olur. Gözenekler tane sınırı göçü ile birleşme yerinden tane sınırı içine geçer ve tane içinde oluşur. Birleşme sınırı hareket ederek geride kalan gözenekler tanelerin içerisinde kalır ve burada tane sınırı ile temaslarını kaybederler. Difüzyon işlemi bu gibi boşlukları küçülterek ortadan kaldırmaya yardımcı olur. Üçüncü aşama, birleşmenin tamamlandığı, birleştirilecek parçalar arasında atomik bağın tamamlandığı aşamadır. İkinci aşama sonunda tane sınırlarında yok edilemeyen tane içine taşınan gözenekler bu aşamada hacim difüzyonu ile büyük oranda yok edilir (Mahoney & Bampton, 1984).

Sonrakı yıllarda Schwartz, King ve Owczarski birbirlerinininkiyle aynı olan bir model geliştirerek kendi modellerinin son safhalarıyla, Gerken ve Owczarski modelinin ilk safhasını birleştirmişlerdir. Bu modele göre ilk safhayı, birleştirilecek yüzeylerde basınç altında ilk temas ve sürtünme meydana getirmektedir. Burada bağlantı ara kesitinde esas itibarıyla boşluklar tane sınırı olarak tanımlanmıştır. İkinci safhada, birinci aşamada yok edilemeyen ara kesit boşlukları difüzyon yoluyla yok edilmekte ve ara kesit tane sınırları daha düşük bir enerji seviyesine, yani ara kesit düzlemi dışına göçmektedirler. Buradaki hakim mekanizma tane sınırı difüzyonudur. Son safha ise, tane sınırı içindeki boşlukların hacim difüzyonu ile doldurulmasıdır (Salehi, 1990).

Cline'ye göre difüzyon kaynağı iki kademedен oluşur: (1) metal-metal teması yaklaşması sonucu mikroskopik plastik deformasyon ve (2) kaynakta difüzyonun tamamlanması ve bunun neticesinde ara yüzeylerin yok olması. Cline en önemli difüzyon kaynağı parametreleri (değişkenleri) olarak yüzey şartları, zaman, sıcaklık, basınç ve kullanılan ara malzeme olarak sıralamıştır (Ananthanarayanan, 1988).

Ludeman difüzyon kaynağı yönteminde gerekli basamakları şöyle sıralamaktadır: (1) oksit tabakasının yüzeyden uzaklaştırılması ve temiz yüzeylerin yeniden kirlenmesinin engellenmesi, (2) birbirine temas eden yüzeylerin yeterli yüksek mekanik güç ve sıcaklık altında yüzeylerin eşleştirilmesi, (3) difüzyon sayesinde kaynak çizgisi (ara yüzeyi) boyunca gözeneklerin yok edilmesi. Ludeman

kontak/film teorisi ve enerji bariyer teorisinin birbiriyle örtüşmesinin bunun kanıtı olduğunu düşünmektedir. Difüzyon kaynağının gerçekleşmesi için, birleştirilecek metaller arasında bağ oluşabilmesi için yüzey atıklardan temizlenmelidir (Ananthanarayanan, 1988).

Araştırmacılar, difüzyon kaynağında başlangıç safhasında plastik mikro deformasyon konusunda, birleşecek yüzeylerin büyük bir kısmının temas etmesi gerektiği konusunda, yüzeyden kaynaklanan etkenler konusunda ve ara yüzey mekanizmalarının etkili olduğu konusunda hemfikirlerdir. Sıvı faz kütle transferi, ancak yüksek sıcaklıklarda çalışıldığı zaman söz konusudur.

Difüzyon kaynağı konusunda, King ve Owczarski, Garmon ve arkadaşları, White ve Allen, Derby ve Wallach, Hilling ve Ridley, Mahara, Enjo gibi araştırmacılar teorik çalışmalar yapmışlardır. Bu yapılan çalışmalar, pratik çalışmalara uyum sağlamışlardır. Mekanizmalar ve modellerdeki ilişkiler her bir mekanizmanın boşluğu doldurmasına farklı bir şekilde etki ettiği farz edilerek geliştirilmiştir. Araştırmacıların çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda, difüzyon kaynağı mekanizması aşağıdaki şekilde gerçekleştirilebilir (Pakdil, 2001):

- a) Yük altında mikro plastik deformasyon,
- b) Sürünme deformasyonu,
- c) Difüzyon,
- d) Yeniden kristalleşme ve tane sınırı göçüdür.

#### ***2.4.3 Difüzyon Kaynağına Etki Eden Faktörler***

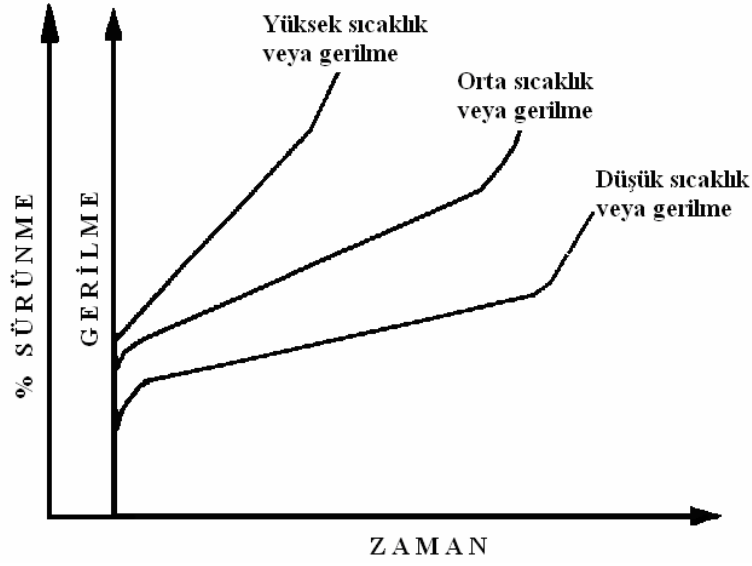
Sıcaklık, zaman, basınç, yüzey pürüzlülüğü ve kaynak atmosferi gibi parametreler difüzyon kaynağını önemli ölçüde etkilemektedir. Artan sıcaklıkla malzemelerin akma gerilmeleri azaldığından, plastik deformasyon ve yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır. Böylece hem birleştirilecek malzemelerde temas alanı artar ve hem de yüksek sıcaklıktan dolayı atomların hareketi kolaylaşır.

### 2.4.3.1 Kaynak Sıcaklığı

Sıcaklık difüzyon kaynağının en önemli parametresidir. Difüzyon parametreleri ve sürünme doğrudan sıcaklığa bağlıdır. Artan sıcaklıkla malzemelerin akma mukavemeti değerleri azaldığından, hem ilk plastik deformasyon ve hem de yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır. Kaynak sıcaklığının yükselmesi genellikle katı hal birleşme süreci içerisinde aşağıda sıralanan olaylara yardımcı olur.

- 1) Yüzey pürüzleri deformasyonunun kolaylaşmasına ve daha iyi metal-metal teması sayesinde daha yüksek sıcaklıklarda düşük akma dayanımlarına,
- 2) Artan difüzyona,
- 3) Yüzeyi yabancı maddelerden arındırmaya,
- 4) Yüzey üzerinde oksit tabakasını dağıtma eğiliminin yükselmesine.

Pratikte, difüzyon kaynak sıcaklığı genellikle ergime sıcaklığının (0,5-0,8) katı mertebesinde olacak şekilde belirlenmektedir ( $T_{ka}=(0,5-0,8)T_m$  Burada;  $T_{ka}$ : kaynak sıcaklığı,  $T_m$ : ergime sıcaklığıdır). Bu sıcaklığın altına inildiği takdirde optimum süper plastiklik meydana gelmektedir. Süper plastiklikte düşük sıcaklık nedeniyle difüzyon gerçekleşmediği için malzeme sadece plastik şekil değişimine uğrayarak, kaynağın gerçekleşmesi engellenmektedir. Ancak yüksek kaynak sıcaklığının da dezavantajları vardır. Yüksek sıcaklık; metalin ömrünü azaltır, iş parçasının yüzey oksidasyonunun ivmesini artırır ve hızlı tane irileşmesi meydana getirir (Orhan, Aksoy ve Eroglu, 1999; Ozan ve ark. 2006). Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine etkisi Şekil 2.7'deki grafikte verilmiştir.

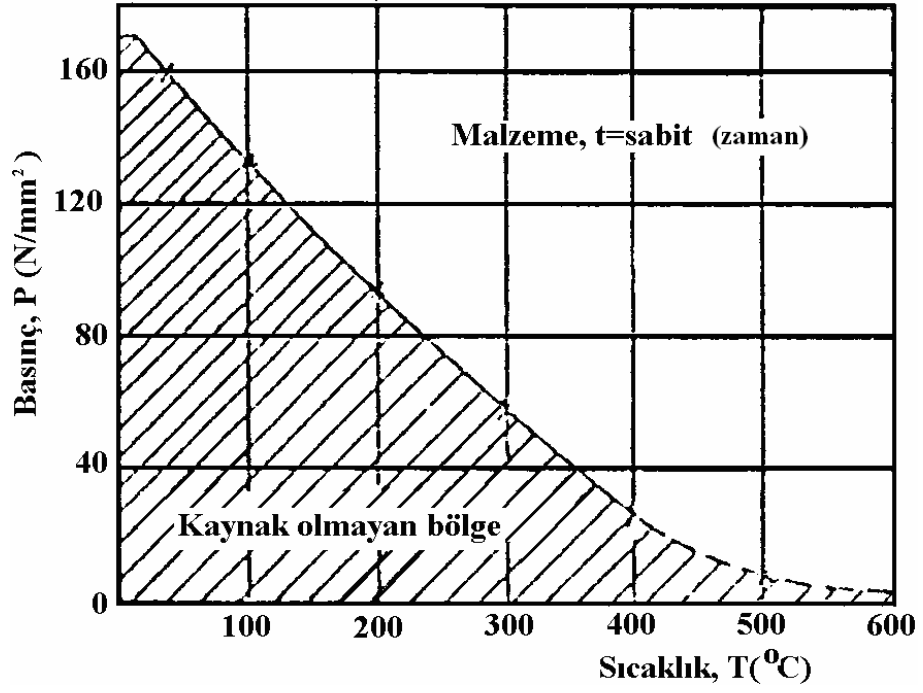


Şekil 2.7 Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine etkisi  
(Pakdil, 2001)

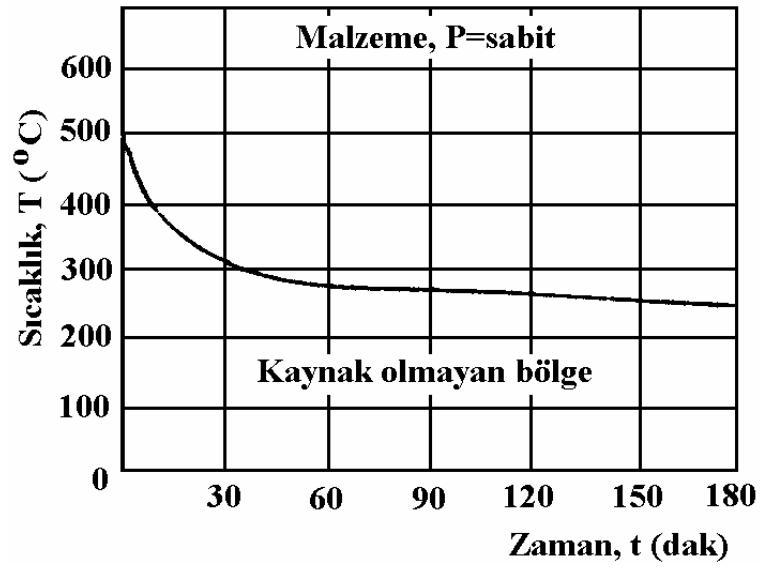
#### 2.4.3.2 Kaynak Süresi

Kaynak süresi genellikle ara yüzeydeki difüzyonu engellemeyecek şekilde karşılıklı kimyasal bağların meydana gelmesini sağlayacak şekilde seçilir. Difüzyon kaynağı süresi, uygulanan sıcaklık ve basınca göre değişir. Kaynak süresi, kaynak sıcaklığı ve kaynak basıncı artırılarak kısaltılabilir (Karadeniz, 1984). Kaynak sıcaklığı, basıncı, süresi ve kaynağı yapılacak malzemenin kaynak olabilmeye etkisini gösteren grafikler şekil 2.8, 2.9 ve 2.10'da şekillerde verilmiştir. Ayrıca birleştirilecek yüzeylerin temizliği de kaynak süresini etkiler. Eğer birleştirilecek yüzeyler kirli ve sıcaklık düşük ise kaynak süresi uzamaktadır. Kaynak sıcaklığı  $T_{ka} = (0,5 \div 0,8)T_m$  alındığında kaynak süresi 100 dakikaya kadar uzayabilmektedir. İyi bir birleştirme sağlayabilmek için, uygun kaynak süresininin seçilmesi önemlidir. Kaynak süresi kısa tutulduğunda iyi bir birleşme elde edilmezken, kaynak süresinin gereğinden uzun tutulması da metaller arası bileşik oluşumuna ve tane büyümesine neden olmaktadır. Sabit basınç ve sıcaklıkta kaynak süresinin uzun tutulması bağlantı mukavemetini bir noktaya kadar artırdığı araştırmacılar tarafından ortaya çıkarılmıştır (Kurt, 1997; Pakdil, 2001; Dutta, Chen, Peterson & Shultz, 2001).

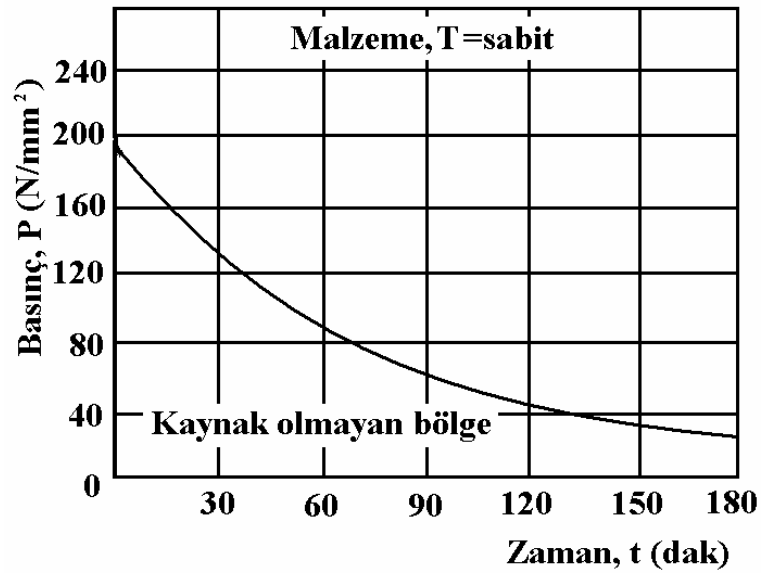




Şekil 2.8 Difüzyon kaynağında basınç ve sıcaklığın kaynak olabilmeye etkisi (Karadeniz, 1984).



Şekil 2.9 Difüzyon kaynağında sıcaklık ve sürenin kaynak olabilmeye etkisi (Karadeniz, 1984).



Şekil 2.10 Difüzyon kaynağında basınç ve sürenin kaynak olabilmeye etkisi (Karadeniz, 1984)

Difüzyon işlemlerinde difüzyon mesafesi  $x$ 'in kaynak mesafesi ile değişimi aşağıdaki formülde ifade edilmektedir (William & Callister, 2003):

$$x = C(D \cdot t)^{1/2}$$

Burada;

$x$  : difüzyon mesafesi

$D$  :  $T$  sıcaklığında difüzyon mesafesi

$t$  : zaman

$C$  : sabit katsayı

#### 2.4.3.3 Kaynak Basıncı

Birleştirilecek yüzeyler arasında temasın sağlanması ve atomik difüzyon için kimyasal potansiyel farkı oluşturmada basınç gereklidir. Uygulanan basınç, parçaların makro deformasyonunun altında olmalıdır. Uygulanan basınçla, yüzey pürüzlerinin plastik akışı kolaylaştırılırken, yüzeyde çözünemeyen oksit filmleri kırılarak iki temas yüzeyi arasında atom akışı sağlanır (Kurt, 1997).

Kaynak sırasında uygulanan basıncın difüzyon kaynağına etki şekilleri aşağıda verilmiştir:

- a) Çözülmesi mümkün olmayan yüzey oksitlerini kırar ve metalin metale temas alanını genişletir,
- b) Birleştirilecek yüzeyleri birbirilerine atomlar arası mesafede yaklaştırarak, atomlar arası çekim kuvvetini faaliyete geçirir,
- c) Difüzyon için kimyasal potansiyel farkı oluşturur,
- d) Yüzey pürüzlerinin plastik deformasyonuna yardım eder.

Tüm bunların yanında uygulanan basıncın olumsuz etkilere yol açmaması için aşağıda sıralanan bazı hususlara dikkat edilmesi gerekir:

- a) Kaynak basıncı birleştirilecek parçaların plastik hacim deformasyonunu en aza indirmek için, akma mukavemetinin altında tutulur,
- b) Uygulanan basınç izostatiktir. Araştırmacılar basıncın uygulanma hızının kaynak deformasyonu ve mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olmadığını bildirmişlerdir,
- c) Uygulanan basınç, yüzey pürüzlerinin sürünme hızını ve plastik deformasyonunu arttıracak kadar büyük, kaynak edilecek parçaların makroskopik deformasyonuna yol açmayacak kadar küçük seçilmelidir (Pakdil, 2001).

Kaynak basıncı her malzeme için farklılık gösterir. Literatürde çeşitli malzemeler için uygulanan kaynak basıncı değerleri  $27 \text{ N/mm}^2$  ile  $41 \text{ N/mm}^2$  arasında verilmektedir. Daha düşük basınçlarda da birleşmenin sağlanması mümkündür. Movchan ve Pedan bronz çeliğe  $16-17 \text{ N/mm}^2$  basınçta birleştirmişlerdir. Kurt ise toz metal bronz düşük karbonlu çeliğe  $15 \text{ N/mm}^2$  sabit basınç değerinde difüzyon kaynağı ile birleştirmiştir (Kurt, 1997).

#### 2.4.3.4 Kaynak Ortamı

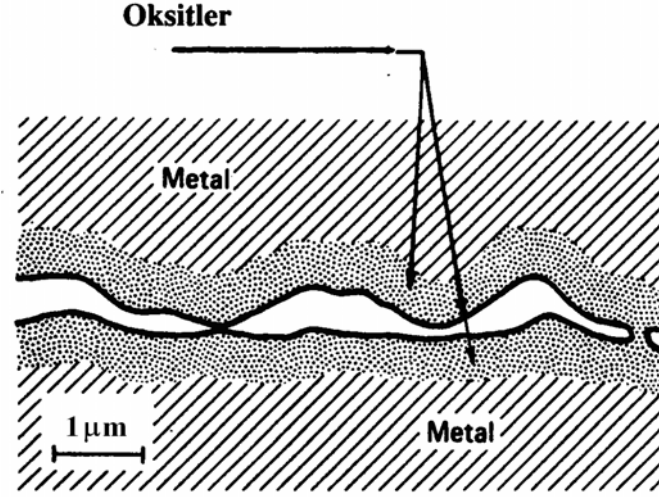
Difüzyon kaynağında en önemli problem yüksek sıcaklık nedeniyle kaynak sırasında yüzeylerin oksitlenmesidir. Bu amaçla kaynak işlemi vakum altında veya soy gaz atmosferinde gerçekleştirilir.

Soygaz olarak argon, azot, helyum gazlarından herhangi birisi kullanılır. Oksijen miktarını en aza indirmeye yardım eden hidrojenin redükleyici bir atmosfer olduğu düşünülebilir. Ancak Hidrojen Titanyum, Zirkonyum, Hafniyum ve Tantal alaşımlarında hidrür oluşturduğundan koruyucu atmosfer olarak hidrojen tercih edilmez.

Soygazlar, atmosferdeki oksijenin etkisini belli bir dereceye kadar azalttığından, kararlı oksitlere sahip metallerde vakum kullanılmaktadır.  $1,3 \times 10^{-3}$  Pa'dan daha fazla vakum oksit filmlerinin kalkmasını sağlayabilmektedir. Pratikte  $1,3 \times 10^{-2}$  ila  $1,3 \times 10^{-5}$  Pa arasındaki vakum değerlerinde difüzyon kaynağı yapılmaktadır.

#### 2.4.3.5 Yüzey Durumu

Yüzey pürüzlülüğü, yüzey filmleri ve yüzey aralıkları difüzyon kaynağı kalitesine etki eden faktörlerdir. Yüzey pürüzleri genellikle kaynağın birinci aşamasında birleşmeye olumsuz yönde etki eder. Pürüzlülük yüzeyler arasında tam temasa ulaşmak için gereken süreyi etkiler. Genelde her metal yükseklik ve dalga boyu küçük olan yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Difüzyon kaynağında özellikle dalga boyu uzun olan pürüzler önemlidir. Bu durumda boşlukların yok edilmesi için, hem çok yönlü basınç uygulanması ve hem de uzun kaynak süresine gereksinim ortaya çıkmaktadır. Çünkü difüzyon, sıcaklık ve zamana bağlıdır. Şekil 2.11'de yüzey pürüzlülüğü, oksit tabakası ve uygulanan basınç ile kırılan oksit tabakası görülmektedir (Kurt, 1997).



Şekil 2.11 Metal yüzey pürüzlülüğü ve kırılmış oksit tabakası (Kurt, 1997)

Etkili bir kaynak için engelleyici yüzey filmleri genellikle oksit tabakalarıdır. Yüzeylerin oksitten korunması için kaynak ortamı vakum veya indirgeyici olmalıdır. Oksit filmlerinin bozulup dağılması iki şekilde olur. Birincisi, kaynak sırasında metal içinde oksitlerin ergimesi şeklinde, ikincisi ise oksit filmlerinin toparlanması veya yuvarlaklaşmasıdır. Oksit filmleri titanyum, tantal, zirkonyum ve diğer arayer elementleri içerisinde son derece iyi eriyebilir. Eğer, oksit tabakası metal içerisinde çözünemiyorsa, bozulma (kırılma) hareketi oksitin yuvarlaklaşması şeklinde olur.

Yağ, gres, toz gibi artıklar da oksit tabakasıyla aynı etkiye sahiptirler. Dolayısıyla kaynaktan önce yüzeyden uzaklaştırılmaları gerekir. Oksit filmlerinin yüzeyden uzaklaştırılması için, kimyasal dağlama ve asitle dağlama yöntemleri kullanılır. Diğer artıklar 300°C'ye kadar sıcaklıkta kurutulmak suretiyle yüzeyden uzaklaştırılır.

#### **2.4.4 Difüzyon Kaynağı Yapılan Malzemeler**

Günümüzde difüzyon kaynağı veya difüzyon birleşmesi adı altında çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Farklı metallerin veya farklı malzemelerin birleştirilme tekniklerinin yaklaşık %40'ı difüzyon kaynağı ile yapılmaktadır. Bu yöntem en çok Titanyum ve alaşımları, Zirkonyum ve alaşımları ve Nikel esaslı alaşımlarda uygulanmaktadır. Difüzyon kaynağının Karbon, Bor, Alüminyum Oksit, Silisyum Karbür gibi malzemelerin birleştirilmesinde de uygun bir yöntem olduğu kabul

edilmektedir. Benzer olmayan metal ve alaşımlarında, kaynak sonrası birleşme bölgesinde kırılğan intermetalik faz oluşuyor, ya da yeniden ergime ile malzeme gevrekleşiyorsa, veyahut ta dayanım azalırsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilir (Ceyhun, Uzkut ve Şahin, 1996). Difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş malzemelerin yaklaşık %20'ni titanyum ve alaşımları oluşturmaktadır. Bunun sebebi yüksek sıcaklıklarda basınç uygulandığı taktirde titanyumun kendi oksidi de dahil, yüzey atıklarını kolayca çözmesidir. Difüzyon kaynağı açısından titanyumun kullanılma nedenlerinden diğerleri de birleştirilecek yüzeylerin temizlemeye ihtiyaç göstermemesi ve titanyumun ergitme kaynağına çok yatkın olmamasıdır. Tablo 2.4'de difüzyon kaynağı uygulanan bazı malzemeler verilmiştir (Kurt ve ark., 1998).

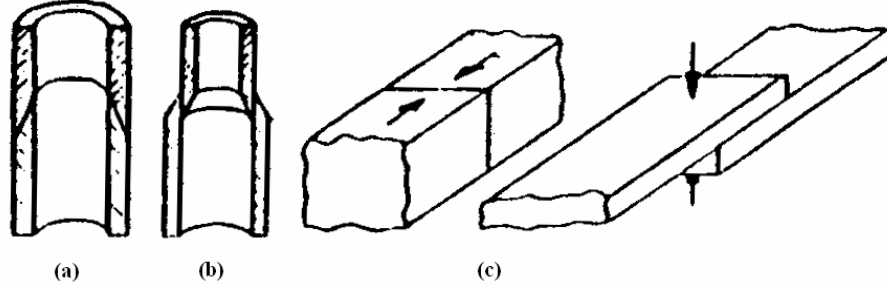
Tablo 2.4 Difüzyon kaynağı ile birleştirilen bazı malzemeler

Aynı Tip Malzemeler	Farklı Tip Malzemeler
Ti ve alaşımları	Ti-Çelik
Be	Ti-Be
Ni esaslı süper alaşımlar	Ti-B
Çelikler	Ti-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Al alaşımları	Al-Ni
Au	Al-Ta
Cu	Al-Çelik
Nb	Cu-Çelik
Co	Ni alaşımları-Çelik
Mo	ZrC-ZrB <sub>2</sub>
Ta	ZrN- ZrB <sub>2</sub>
ZrC	ZrN-ZrC

#### 2.4.5 Difüzyon Kaynağı Uygulama Şekilleri ve Alanları

Difüzyon kaynağı, konstrüksiyona uygun olarak alın, bindirme ve konik birleştirme olarak üç şekilde uygulanabilir (Şekil 2.12). Alın ve bindirme şeklindeki birleştirmeler düz yüzeyli parçalara uygulanırken, konik birleştirmeler ise silindirik parçalara uygulanır. Silindirik şekilli parçalara da bindirme şeklinde difüzyon

kaynağı ile birleştirmeler yapılabilir. Bu gibi durumlarda parçalar arasında farklı genleşmeler sonucu oluşacak gerilmelerden dolayı uygulanan basıncın iyi ayarlanması gerekir. Ayrıca, özel önlemler veya değişik biçimler vererek çok karışık birleştirme yüzeylerine sahip parçalar da difüzyon kaynağı ile kaynak yapılabilir.



Şekil 2.12 Difüzyon kaynak işleminin uygulanış şekilleri (a) konik yüzeyler, (b) Silindirik yüzeyler, (c) Düz yüzeyler (alın ve bindirme şeklinde) (Ceyhun, ve ark., 1997).

Difüzyon kaynağı genel mühendislik, uzay ve havacılık sanayii, savunma sanayii ve nükleer sanayii alanlarında geniş uygulama alanı bulmuştur. Yöntemin yüksek verime sahip olmasına karşın, yaygın olarak kullanılamaması yatırım maliyetinin yüksek olmasındandır. Genel mühendislik alanında difüzyon kaynağı, kaynak çatlaması ve gevrek metaller arası yapıların oluşması tehlikesinin bulunduğu durumlarda kullanılır. Havacılık sanayinde difüzyon kaynağı, daha ucuz, daha verimli, daha hafif ve difüzyona daha yatkın parçaların üretimini mümkün kılarak, bu sanayinin gelişmesine yardımcı olmaktadır. Difüzyon kaynağının silah sanayindeki uygulamalarında diğer tekniklerle daha ekonomik ve entegre olarak üretilemeyen yapı ve elemanları üretmektir. Örneğin, hidrojen mevcudiyetinin problem olduğu, martenzitik yapıdaki kaynaklı bağlantılarda, geleneksel kaynak yöntemleri yerine difüzyon kaynağı uygulanmaktadır. Difüzyon kaynağı nükleer alanda reaktör parçalarının yapımında, özellikle yakıt sistemlerinde kullanılmaktadır. Uzay ve havacılıkta difüzyon kaynağının uygulanması yakın yıllarda geliştirilmiştir (Ceyhun, ve ark., 1996; Pakdil, 2001).

#### **2.4.6 Toz Metal Malzemelerin Difüzyon Kaynağı**

Karmaşık şekle sahip bir ürünün elde edilmesi, bazen büyük boyutlardaki hammaddeden fazla sayıda imalat işlemlerinin yardımıyla gerçekleştirilir, bazen de toz metalürjisi yöntemi yardımıyla elde edilir. Toz metalürjisi yönteminde presleme, sinterleme ve az sayıda mekanik imalat gereklidir. Bu tip karmaşık şekilli elemanlar iki veya daha fazla parçalı üretilerek birleştirilirler. Elemanın bütün olarak hazırlanması sırasında, büyük boyutlu presler, pres kalıpları ve başka bir çok teknik ve ekonomik zorluklarla karşılaşmaktadır (Ordenko, 1987). Karmaşık şekilli makina elemanlarının hazırlanması ve onların parçalarının kaynak yöntemiyle birleştirilmesi, kaynak yöntemine, lehim veya kaynak malzemesine, ana malzemenin özelliklerine ve ürünün teknolojik özelliklerine bağlıdır.

Birleştirilecek parçaların malzemesi kimyasal olarak farklı bileşime sahip olduğu takdirde ve gözenekli malzemelerden hazırlandığı durumlarda, kaynak işleminde önemli zorluklar ortaya çıkmaktadır. Toz metalürjisi yöntemiyle elde edilen parçaların kaynak işlemi fırında gerçekleştirildiğinde, malzeme bileşiminin öyle seçilmesi gerekir ki, sinterleme sırasında kaliteli kaynaklı birleştirme elde edilsin ve ürünün dayanımına göre konstrüktif gereksinimleri sağlansın (Demyanenko ve Polikov, 1998).

Toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen malzemeler haddeleme, döküm gibi geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen malzemelere göre bazı değişik ve avantajlı özelliklere sahiptir. Bu avantajlar, üretimi zor olan alaşımları daha kolay üretme, karmaşık şekilli parçaların imalat kolaylığı, yoğunluk kontrolü ve ekonomiklik gibi avantajlarıdır. Bununla birlikte toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen malzemelerin kaynağı veya birleştirilmeleri, hadde veya diğer üretim yöntemleri ile üretilmiş malzemelerin kaynağından biraz farklı olmaktadır. Preslenmiş toz malzemelerin sinterleme ile kaynaklanmasında ergiyen malzemenin büzülme ve ısıl genişleme ölçüleri tam olarak tayin edilmelidir. Bunun dışında elemanların montajı için gerekli toleranslar dikkate alınmalıdır. Bu toleransların en uygun değeri esas ve ergiyen metallere bağlıdır.



Toz metalürjisi yöntemiyle elde edilen parçaların kaynaklanabilirliğini etkileyen bir çok fiziksel özellik mevcuttur. Bu parçaların kaynaklanabilirliğini etkileyen en önemli özellik gözenekliliktir. Gözenek hacmi ve izafi yoğunluk, kaynak işlemini ve karakterini etkilemektedir. Gözeneğe bağlı olarak toz metalürjisi yöntemiyle elde edilen parçaların ısı iletkenlik, ısı genleşme ve sertleşebilirlik gibi özellikleri etkilenmekte ve yapı içerisinde kalan oksit ve empürütelerden dolayı kaynak işlemi ve karakteristiği etkilenmektedir. Toz metalürjisi yöntemiyle elde edilen parçalardaki gözeneklilik miktarı, ısı transferini ve dolayısıyla kaynak parametrelerini değiştirmektedir. Malzemenin gözenek miktarındaki değişimin ısı iletkenliği değiştirmesinin bir sonucu olarak sertleşebilirlik özelliği de değişmektedir. Çünkü gözenekler ısı yalıtkanlık yaparak ısı transferini yavaşlatmaktadırlar. Böylece kaynak işlemi sırasında ve sonrasında malzemenin soğuma hızı azalmakta ve bunun sonucu sertleşme eğilimi azalmaktadır (Ateş, Durgutlu, Kurt ve Karacif, 2005). Kaynak arkı ile ergitme kaynağında, kaynak arkı ile ısınan parçalar genişir ve soğuma sonunda tekrar eski boyutlarına geri döner. Ayrıca, kaynak esnasında, ergimiş ilave metalin gözeneklere filtrasyonu sonucu gözeneklilik oranı düşer (Kurt, Gülenç ve Türker, 1996).

Toz metalürjisi yöntemiyle elde edilen parçaların kaynakla birleştirilmelerinde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar tasarım, malzeme seçimi ve birleştirme tekniğidir. Öncelikle birleştirme yapılacak parçalardaki amaçların ne olduğuna karar verilmiş olması gerekir. Bunlar dayanım, boyut sınırları, çevresel faktörler, görünüm ve ekonomiklidir. Birçok metalik malzemenin birleştirilmesinde olduğu gibi toz metal parçaların birleştirilmelerinde de ergitmeli ve ergitmesiz kaynak teknikleri kullanılmaktadır. Düşük yoğunluklu ( $<6,5 \text{ g/cm}^3$ ) toz metal parçaların kaynağında ergitmeli birleştirme yöntemleri kullanılırken, orta ve yüksek yoğunluklu toz metal parçaların kaynağında ( $>7,0 \text{ g/cm}^3$ ) ergitmeli kaynak yöntemleri tercih edilmektedir (Ateş ve ark., 2002).

Ergitme ve nokta kaynağı ile toz metalürjisi ile elde edilen malzemeler kaynak edildiğinde toz parçacıklarının iyi özellikleri (örneğin mekanik mukavemet değerleri) değişerek, yok olmaktadır. Bu nedenle toz metalürjisi ile elde edilen malzemelerin kaynağında bu yöntemlerin kullanılması uygun değildir. Ayrıca ergitme kaynağı

yöntemlerinin kullanılması durumunda gözenekli yapı çeşitli kaynak problemleri oluşturmaktadır. Kaynak işlemi sırasında sinterlenmiş metalin ergime bölgesinde gözeneklerin tamamen ortadan kalkması, kaynak dikişinde büyük boşlukların oluşma riskini artırmaktadır. Özellikle toz metalürjisi ile elde edilmiş iki parçanın kaynaklanmasında bu risk daha önemli duruma gelmektedir. Bu durumda, ortadan kalkan gözeneklerin oluşturduğu hacimsel boşluk oluşumunu engellemek için, özel dolgu malzemelerinin kullanılması gerekmektedir (Varol, Tunay, Tüfekçi, 2002). Yapılan deneyler bu tip malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinin daha uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir. Pratikte, toz metalürjisi ile üretilen parçaların kaynağı hakkında pek fazla bilimsel çalışma yapılmamıştır. Kaynaklı bir toz metalürjisi ile üretilen parçanın yapısı ve özelliklerinin bilinmesi, bu malzemelerin kaynağında büyük önem arz eder.

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş malzemelerin difüzyon kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi, oluşturulacak malzeme çiftinin difüzyon kaynağı davranışlarının anlaşılması açısından çok önemlidir (Ozan ve diğerleri, 2006). Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen parçaların kaynağında, kaynak bölgesinde bulunan gözenek içerisinde kalma ihtimali olan bazı elementlerin ve partiküllerin elimine edilmesi için tedbir alınmalıdır. Bu partiküller; yağlayıcı kalıntıları, soğutma sıvısı, talaş kaldırmada kullanılan soğutucu, solusyon kalıntıları, serbest haldeki grafit veya kalıcı kütleler olabilir. Sayılan bütün bu kalıntıların kaynak bölgesine girmesini önlemek gerekmektedir (Kurt ve ark., 1996).

Genellikle, farklı yapıları malzemelerin difüzyon kaynağı işleminde, birleştirilecek parçaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin farklılığı (ısı geçirgenliği, elastisite modülü, dayanım ve özellikle ısıl genleşmesi) bütün yüzey boyunca kaynak oluşumuna imkan vermez. Kaynaklı birleştirmede gerilme yığılmaları oluşmaya başlar ve çatlaklar meydana gelir (Nikolaev ve Vinokurov, 1990; Vinokurov ve Qriqoryan, 1984; Makarov, 1981; Nikolaev, Kurkin ve Vinakurov, 1983).

Toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen gözenekli parçaların fırında kaynağı koruyucu gaz atmosferinde yapıldığından birleşme bölgesinde kaliteli dikiş elde edilir. Kimyasal olarak farklı cins ve gözenekli malzemelerin kaynaklanma

özelliklerinden birisi de sıvı fazda kaynağı yapılan parça elementlerinin, karşılıklı olarak parçalar içine difüzyonudur. Birleştirme işleminin tam olarak gerçekleştirilebilmesi, esasen preslenmiş numunelerin ölçülerinin değişmesine bağlıdır. Bu iki süreçte gerçekleşir; sıvı fazda oturma ve hacimsel olarak büyüme. Kaynaklanacak parçaların fırında sinterlenmeden sonra genişmesi veya büzülmesi difüzyon katsayısına bağlıdır. Eğer, ergime sıcaklığı düşük olan bileşenin difüzyon katsayısı ergime sıcaklığı yüksek olan bileşenin difüzyon katsayısından yüksek olursa, genişleme meydana gelecektir (Krgyumov, Utevskiy ve Ektin, 1977; Geluzin, 1987).

Tabata, Masaki, Suzuki ve Zhu (1989) demir tozu ile üretilmiş toz metal parça ile hadde çeliğini difüzyon kaynağı ile birleştirmişlerdir. Araştırmacılar, silindir şeklindeki toz metalürjisi yöntemi ile Fe-Cu-C toz karışımından elde edilen parçayı yüzük şeklindeki hadde çeliğine 1150<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında ve 30 dakika sinter süresinde argon koruyucu gaz atmosferi altında birleştirmişlerdir. Ayrıca Fe-Cu-C toz karışımındaki Cu ve C elementlerinin yüzdelerini değiştirerek, bu değişimin kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Kaynaklı birleşme işlemi iki şekilde gerçekleştirilmiştir. Birinci şekilde olarak toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen parça içte ve hadde çeliği dışta olacak şekilde kaynaklı birleştirme yapılmıştır. Yapılmış bu araştırmada sinterleme işlemi sonrası elde edilen kaynaklı birleştirmenin mukavemeti, toz metal karışım içerisindeki Cu ve C yüzdelerine göre değişmektedir. Karışımındaki Cu yüzdesinin artmasıyla kaynaklı birleştirmenin mukavemeti artmaktadır. %1,5 Cu yüzdesine kadar toz karışımı içerisindeki C yüzdesinin artmasıyla kaynaklı birleşmenin mukavemetinin artmasına rağmen, %3'ün üzerinde Cu yüzdelerinde artan C yüzdesiyle kaynaklı birleşmenin mukavemetinde düşüş görülmüştür. İkinci şekilde ise hadde çeliği silindirik parça içte ve toz metalürjisi yöntemi ile üretilen parça dışta olacak şekilde montaj edilerek kaynak işlemi uygulanmıştır. Bu tip birleşmede dıştaki parçanın genişlemesinden ve içteki parçada bir miktar meydana gelen büzülmeden dolayı kaynaklı birleşmenin mukavemetinin çok düşük olduğu görülmüştür (Tabata ve ark., 1989).

Çetiner ve ark.'ları (2002) toz metal bronz yatağın düşük karbonlu çeliğe 780<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında, 30 dakika sinterleme süresinde ve endogaz ortamında

difüzyon kaynağında kaynaklı birleştirmenin mekanik ve metalografik özelliklerini incelemiştir. Toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen bronz burç içte ve çelik kovan dışta olacak şekilde her iki parça monte edilmiştir. Montaj işlemi 20-50 µm toleranslarla çeşitli sıkı geçmeler ve tatlı geçme şeklinde yapılmıştır. Toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen bronz burçların ham yoğunlukları  $6,3 \text{ g/cm}^3$  (%72 teorik yoğunluk) ve pişmiş yoğunlukları  $6,5 \text{ g/cm}^3$  (%74 teorik yoğunluk) olarak ölçülmüştür. Toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen bronz burçların normal sinterleme şartlarında genleşmesi ve yoğunluklarının düşmesi beklenirken, tersi olmuş ve yoğunluk artışı elde edilmiştir. Yapılan çalışmada, tatlı geçme çifti difüzyon kaynağı yapıldıktan sonra 0,25 kN yükte sıyırılmış olup,  $0,212 \text{ N/mm}^2$  kayma gerilmesine karşı gelmektedir. 20 mikronluk sıkı geçmeli çiftin difüzyon kaynağı işleminden sonra yapılan sıyırma testinde kuvvet okunamayacak kadar küçük olmuş ve bağ mukavemeti  $0 \text{ N/mm}^2$  olarak kabul edilmiştir. Yoğunluk değerleri ve kaynak mukavemeti değerleri birlikte değerlendirildiğinde difüzyon kaynağı sırasında meydana gelen yoğunluk artışının, kaynaklı birleştirmenin mukavemetine kötü etki ettiği ve burçların sıkı geçmeden boşalmaya doğru gittiği belirlenmiştir. Montajın tatlı geçme yapılması halinde az da olsa kaynak mukavemeti elde edilebilmiştir. (Çetiner ve ark., 2002).

Kurt ve ark.'ları (1998) toz metal bronz malzemenin düşük karbonlu çeliğe difüzyon kaynağında gözenekliliğin difüzyona etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada; toz metal bronz parçalar, gözenekliliğin difüzyona etkisini tesbiti amacıyla 307, 384 ve  $461 \text{ N/mm}^2$  basınçlarda preslenerek yoğunluk hesabı ile %25, %30 ve %35 gözenekli numuneler elde edilmiştir. 650, 740 ve  $800^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda, 90, 120 ve 150 dakika sürede ve  $15 \text{ N/mm}^2$  sabit kaynak basıncında yapılmış difüzyon kaynağında gözenekliliğin artmasıyla difüzyon prosesinde kötüleşme olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yüksek kaynak sıcaklığı ve uzun kaynak süresinin gözenekliliği azalttığı ve difüzyonun artmasını sağladığı tespit edilmiştir (Kurt, Türker, Aksoy ve Orhan, 1998).

Toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen parçaların difüzyon kaynağı sırasında yoğunluk dağılımının homojen olması gerekir. Ancak bunu sağlamak zordur. Kapalı kalıplarda tozların preslenmesi ile homojen yoğunluk dağılımına yaklaşılmaktadır,

ancak tozların kendi arasındaki sürtünmeler ve kalıp yüzeyi ile sürtünmelerinden dolayı, istenen düzeyde homojen yoğunluk sağlanamamaktadır.

Sonuç olarak, fırınlarda hem sinterleme, hem de kaynak işlemleri verilen sistemler için karmaşık mekanizmalar gerektirmektedir. Sıcaklığın, zamanın, ilk gözenekliğin, ısınma hızının, tozların dağılımının etkisi sinterleme için belirlenmişse de, kaynak işlemi için halen belirlenmemiştir. Bu nedenle bu çalışmada yukarıda belirtilen parametrelerin toz metal parçaların difüzyon kaynağına etkisi araştırılmıştır.

## BÖLÜM ÜÇ

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Kaynatılacak parçaların üretiminde Fe, Cu, Zn ve C olmak üzere 4 farklı toz malzeme kullanılmıştır. Bu toz malzemelere sıkıştırma sırasında toz taneleri arasında ve toz taneleri ile kalıp duvarı arasında sürtünmeyi azaltmak için Zn sterat yağlayıcı ilave edilmiştir. Deneylede kullanılan Fe tozunun başlangıç yoğunluğu 2,7-2,9 g/cm<sup>3</sup> olup, 7 ton yükü preslemede yoğunluğu 6,6 g/cm<sup>3</sup> değerini almaktadır. Fe tozunun kimyasal bileşimi ağırlık yüzdesi olarak Tablo 3.1’de ve elek analizine göre karışımdaki tane boyutu dağılımı ağırlık yüzdesi olarak Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Deneylede kullanılan demir tozunun kimyasal bileşimi

<b>Kimyasal</b>	C	Si	Mn	S	P	O <sub>2</sub>	Fe
<b>Bileşim (%w)</b>	0,08	0,1	0,3	0,02	0,03	0,5	Kalanı

Tablo 3.2 Deneylede kullanılan demir tozunun tane boyutu dağılımı

<b>Tane Boyutu (µm)</b>	<56	56-160	160-200	200-250
<b>Yüzde ağırlık (%w)</b>	25	62,8	12,5	0,3

Karışımda kullanılan Cu tozu elektroliz yöntemiyle elde edilmiş olup, normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Başlangıç yoğunluğu 1,25-1,9 g/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir ve tane boyutu 100 µm mertebesindedir.

Karışımda kullanılan Zn tozunun kimyasal bileşimi ağırlık yüzdesi olarak ve elek analizi sırasıyla Tablo 3.3 ve 3.4’de verilmektedir.

Tablo 3.3 Deneyde kullanılan çinko tozunun kimyasal bileşimi

<b>Kimyasal</b>	Pb	Cd	Fe	Zn
<b>Bileşim (%w)</b>	<0,1	<0,1	<0,2	Kalanı

Tablo 3.4 Deneyde kullanılan çinko tozunun tane boyutu dağılımı

<b>Tane Boyutu (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	>45	30-45	20-30	10-20	<10
<b>Ağırlık yüzdesi (%w)</b>	0,1	40	30	23,9	6

Malzeme mukavemetinin artırılması için metal tozları karışımı içerisine ayrıca %0,8 grafit tozu ilave edilmiştir. Karışımda kullanılan grafit tozu  $2,253 \text{ g/cm}^3$ 'lük yoğunluğa sahip olup tane çapı ortalama  $20 \mu\text{m}$  mertebesindedir.

### 3.2 Numune Üretme Hazırlık Çalışmaları

#### 3.2.1 Toz Miktarının Hesaplanması

Kaynağı yapılan numunelerin kimyasal kompozisyonu ağırlık yüzdesi (%w) olarak Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5 Toz metal numunelere ait kimyasal kompozisyon (%w)

<b>İç Silindirik Parça</b>	%3 Cu	%0,8 C	Kalanı Fe	%0,5 Zn
<b>Dış Silindirik Parça</b>	%2 Zn	%0,8 C	Kalanı Fe	Sterat

Deneylerde kullanılan toz karışımlarının teorik yoğunluğu Fe-Cu-C toz karışımı parça için için  $7,84 \text{ g/cm}^3$ , Fe-Zn-C toz metal parça için ise  $7,80 \text{ g/cm}^3$ 'dir. Teorik yoğunluk ve taslak numune parça hacmine göre kalıp boşluğuna doldurulacak toz malzeme miktarı hesaplanır. Şekil 3.1'de taslak numune resmi ve ölçüleri verilmiştir. Bu ölçülere göre üretilecek numuneler için kalıp boyutlandırılıp üretilmiştir. Kalıp malzemesi olarak %12 Cr, %1'in altında Mo içeren yüksek alaşımlı takım çeliği kullanılmıştır.

Fe-Cu-C toz karışımı numune için yoğunluk ( $d$ );  $d = 7,84 \text{ g/cm}^3$

Taslak numune hacmi ( $V$ );

$$V = Ah = \frac{\pi}{4}(3,08^2 - 1,7^2) \cdot 3,1$$

$$V = 16,06 \text{ cm}^3$$

1 numune için gerekli toz miktarı ( $m$ );

$$m = 7,84 \cdot 16,06$$

$$m = 125,91 \text{ g}$$

bulunur.

Fe-Zn-C toz karışımı numune için yoğunluk ( $d$ );  $d = 7,80 \text{ g/cm}^3$

Taslak numune hacmi ( $V$ );

$$V = Ah = \frac{\pi}{4}(5,0^2 - 3,085^2) \cdot 1,63$$

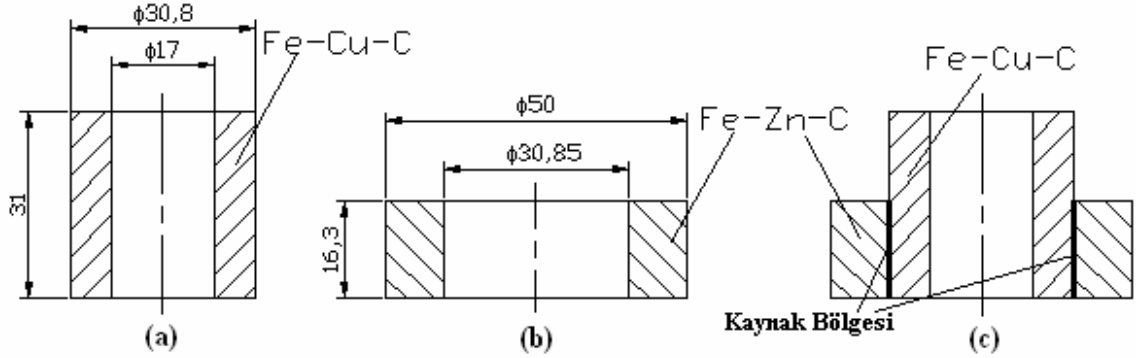
$$V = 19,82 \text{ cm}^3$$

1 numune için gerekli toz miktarı ( $m$ );

$$m = 7,80 \cdot 19,82$$

$$m = 154,59 \text{ g}$$

bulunur.



Şekil 3.1 (a) İç silindirik (Fe-Cu-C) ve (b) dış silindirik (Fe-Zn-C) parçaların kesit görünüşü, (c) her iki parçanın montaj edilmiş hali

### 3.2.2 Sıkıştırma Kuvvetinin Hesabı

Deneylerde kullanılan taslak numuneler iki yönde (alt ve üstte) hareketli yük uygulanarak sıkıştırılmıştır. Demir esaslı toz malzemler genellikle  $414 \text{ N/mm}^2$  basınç altında  $6,42 \text{ g/cm}^3$  yoğunluk değerine preslenirler. Presleme basıncı arttıkça yoğunluk değeri artar. Yoğunluk değeri direkt olarak presleme basıncı ile doğru orantılıdır (Lenel, 1984).



Bu çalışmada 400, 700 ve 1000 N/mm<sup>2</sup> sıkıştırma basınçları alınmış ve buna göre preste sıkıştırma kuvvetleri hesaplanmıştır.

Fe-Cu-C toz metal numune için sıkıştırma yüzey alanı	$A = \frac{\pi}{4}(30,8^2 - 17^2)$ $A = 518,08mm^2$
400 N/mm <sup>2</sup> sıkıştırma basıncı için sıkıştırma kuvveti	$F = 400N / mm^2 \times 518,08mm^2$ $F = 207232N$ $F = 207,232kN$
700 N/mm <sup>2</sup> sıkıştırma basıncı için sıkıştırma kuvveti	$F = 700N / mm^2 \times 518,08mm^2$ $F = 362656N$ $F = 362,656kN$
1000 N/mm <sup>2</sup> sıkıştırma basıncı için sıkıştırma kuvveti	$F = 1000N / mm^2 \times 518,08mm^2$ $F = 518080N$ $F = 518,080kN$

bulunur.

Fe-Zn-C toz metal numune için sıkıştırma yüzey alanı	$A = \frac{\pi}{4}(50^2 - 30,85^2)$ $A = 1216,01mm^2$
400 N/mm <sup>2</sup> sıkıştırma basıncı için sıkıştırma kuvveti	$F = 400N / mm^2 \times 1216,01mm^2$ $F = 486404N$ $F = 484,404kN$
700 N/mm <sup>2</sup> sıkıştırma basıncı için sıkıştırma kuvveti	$F = 700N / mm^2 \times 1216,01mm^2$ $F = 851207N$ $F = 851,207kN$
1000 N/mm <sup>2</sup> sıkıştırma basıncı için sıkıştırma kuvveti	$F = 1000N / mm^2 \times 1216,01mm^2$ $F = 1216010N$ $F = 1216,010kN$

bulunur.

### **3.2.3 Toz Karışımının Hazırlanması**

Numunelerin hazırlanması işlemleri Azerbaycan Surahanı Petrol Makinaları Yapımı Fabrikası bünyesindeki SPLAV Ltd. Şti.'inde gerçekleştirilmiştir. Değişik bileşimdeki tozların karıştırılması işlemi kapasitesi 0.1 m<sup>3</sup> olan Smesitel marka

(Şekil 3.2) karıştırıcı makinasında gerçekleştirilmiştir. Deneylede kullanılan karıştırıcının genel görünüşü şekil 3.2’de verilmektedir. Seçilmiş tozlar karıştırıcı haznesine doldurulduktan sonra karıştırıcı 45 dakika süreyle çalıştırılmıştır. Tozların homojen olarak karışabilmelerini sağlayabilmek için karıştırıcı haznesine çapları 10-30 mm olan çelik bilyalar yerleştirilmiştir.



(a)

(b)

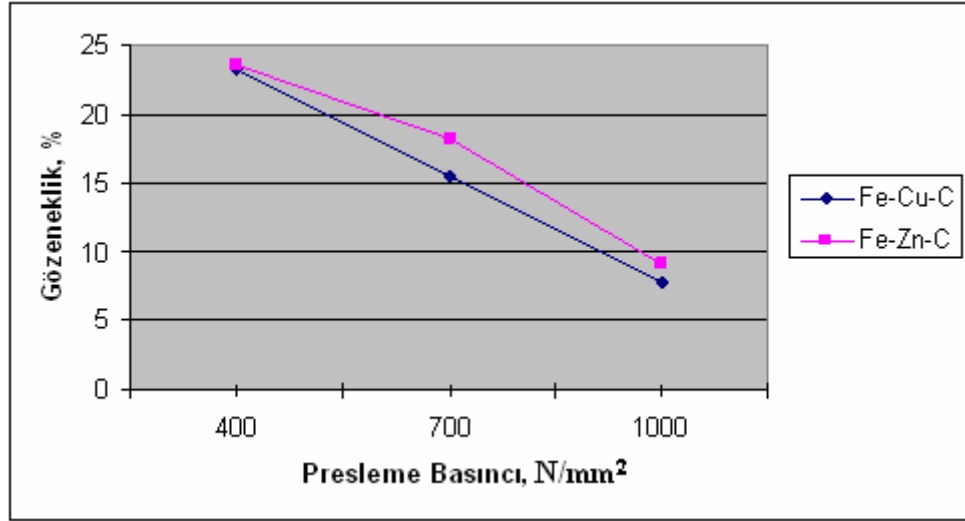
Şekil 3.2 Smesitel marka toz karıştırma makinası; (a) Genel görünüş, (b) Toz haznesi

### 3.2.4 Toz Metal Numunelerin Soğuk Preslenmesi

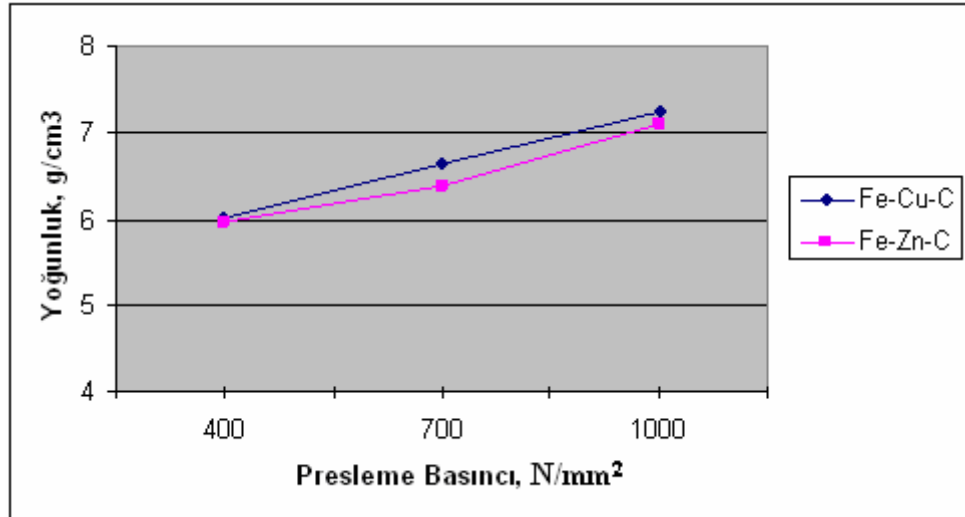
Soğuk presleme işlemi için KAO 81-30 marka ve 1000 kN kapasiteli mekanik pres kullanılmıştır. Parçalar ilk olarak ortam sıcaklığında sırasıyla 400, 700 ve 1000 N/mm<sup>2</sup> presleme basınçlarında soğuk presleme yoluyla şekillendirilmiştir. Soğuk işlem sırasında malzeme karışım oranları yukarıda belirtilmiş olan oranlarda sabit tutularak, presleme basınçları değiştirilmiştir. Her iki numunenin üretiminde 400 ve 700 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncı uygulaması tek kademede gerçekleştirilmiştir. Fe-Zn-C toz karışımı numunenin preslenmesinde presleme yükü 1216,010 kN olduğundan bu değer kullanmış olduğumuz presin kapasitesinin üzerindedir. Bu nedenle bu numunenin sıkıştırma işlemi iki kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. İlk kademede 700 N/mm<sup>2</sup> yük altında sıkıştırılan numunenin yüksekliği 21,5 mm olmuş, ikinci kademe sıkıştırma ile numunenin yüksekliği istenilen değere (16,3 mm) indirilmiştir.

Soğuk presleme işlemi sonrası elde edilen toz metal numunelerde, uygulanan presleme yüküne göre yoğunluk ve gözeneklilik değişmektedir. Gözeneklilik yüzdesi toz metal karışımı parçaların teorik yoğunlukları ve presleme sonrası yoğunlukları

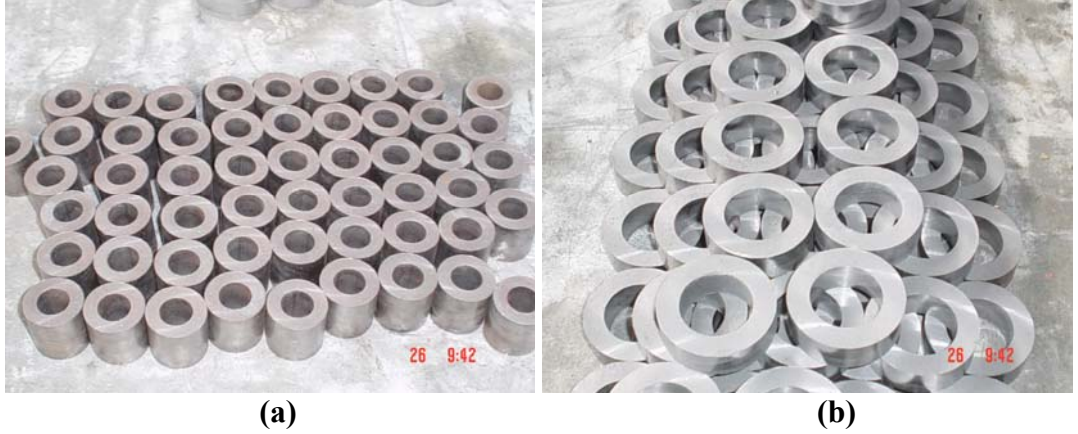
dikkate alınarak hesap edilmiştir. Deney numunelerinin elde edilmesinde kullanılan tozların soğuk sıkıştırılmasında pres basıncı ile gözeneklilik oranının değişimi şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.3'te verilen eğrilere göre presleme basıncı arttıkça % gözeneklilik miktarı düşmektedir. Tersini de söylemek mümkündür. Presleme basıncı arttıkça imal edilen toz metal numunelerin ham yoğunluğu artmaktadır. Bu durum şekil 3.4'te gösterilmiştir. Soğuk preslemeyle elde edilen Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C toz metal malzemelerden numunelerin genel görünüşü şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.3 % gözenek miktarının presleme basıncına göre değişimi



Şekil 3.4 Presleme basıncına göre sinterleme öncesi yoğunluğun değişimi



Şekil 3.5 Soğuk preslemeyle elde edilmiş numuneler; (a) Fe-Cu-C ve (b) Fe-Zn-C

### 3.2.5 Sinterleme ve Difüzyon Kaynağı İşleminin Uygulanması

Sinterleme ve difüzyon kaynağı işlemi SEV-2,5 5/20-E marka vakumlu fırında gerçekleştirilmiştir. Fırının teknik özellikleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 SEV-2,5 5/20-E marka vakumlu sinterleme fırınının teknik özellikleri

Fırının Toplam Gücü	185 kW
Yanma Odası Gücü	165 kW
Kapasitesi	250 kg
Yanma Odasının Boyutları	D=250 mm h=500 mm
Maksimum Çalışma Sıcaklığı	2000 <sup>o</sup> C
Soğuk haldeki vakum basıncı	1,33·10 <sup>-3</sup> Pa
Isıtma voltajı	20 Volt
Frekans	50 Hz
Şebeke voltajı	380 Volt

Deneylerde kullanılan fırında 2000<sup>o</sup>C’ye ulaşmak için yaklaşık olarak 2 saatlik zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Deneylerde kullanılan en yüksek sıcaklık olan 1200<sup>o</sup>C’ye 20 voltluk gerilim ve 1800 Amperlik akım şiddetiyle ulaşılmıştır. Yanma odasının duvarları refrakter malzemelerle kaplı olup, duvarlar boyunca 99 adet Wolfram ısıtıcı yerleştirilmiştir.

400, 700 ve 1000 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncıyla preslenmiş parçalar (silindirik iç parça ve silindirik dış parça) birbirlerine normal geçmeyle monte edildikten sonra uç farklı sinterleme süresi ve dört farklı sıcaklıkta sinterlenmiştir. Deneylerde uygulanan sinterleme süreleri ve sıcaklıkları Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7 Deneylerde kullanılan sinterleme süreleri ve sıcaklıkları

Sinterleme Süresi (Dakika)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
30	1050
	1100
	1150
	1200
60	1050
	1100
	1150
	1200
90	1050
	1100
	1150
	1200

Fırın, 12 farklı rejimde çalıştırılmıştır. İstenilen sıcaklığa ulaşma yaklaşık olarak 20 °C/dak ısıtma hızıyla gerçekleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı 600°C’ye ulaştığında fırın 30 dakika bu sıcaklıkta bekletilerek, toz metal karışımı içerisinde yer alan Zn stearat yağlayıcısı ve diğer katkıların yanarak malzemeyi terk etmesi sağlanmıştır. Daha sonra gerçek sinterleme sıcaklığına çıkılarak, numunler sinterlenmiştir.

Sinterleme işlemi bittikten sonra fırın, dolayısıyla numune koruyucu atmosferde (vakum ortamında) serbest soğuma şeklinde soğutulmuştur.

1200°C sinterleme sıcaklığı ve 90 dakika sinterleme süresi sonunda elde edilen numunelerin yüzeylerinde metal akmaları meydana gelmiştir. Bu sebeple bu gruptaki numuneler incelemelerde dikkate alınmamıştır. Sinterleme sonrası toplam 36 numune grubu elde edilmiştir. Bunlardan 3 grupta sinterleme sırasında metal akması meydana geldiği için 33 numune gruplarında inceleme yapılmıştır.

### 3.3 Mekanik Deneyler

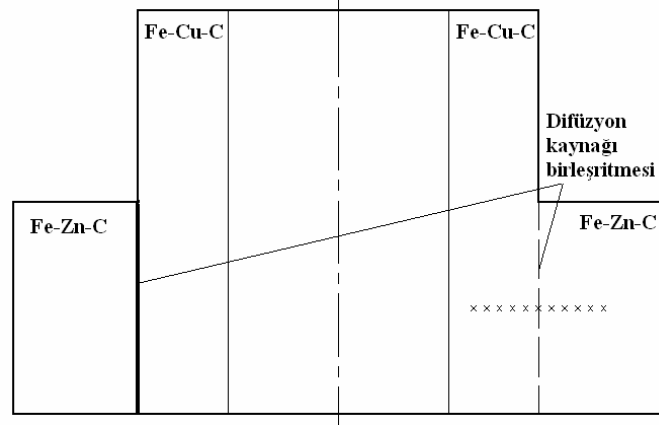
Sinterleme işlemi gerçekleştirilmiş deney numuneleri, sinterleme sıcaklıkları ve sürelerine göre guruplara ayrılmıştır.

#### 3.3.1 Kesme Mukavemetinin Tayini

Birleştirilmiş numunelerdeki kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetinin saptanması, basma deneyi vasıtasıyla tespit edilmiştir. Basma deneyleri Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan SHIMADZU marka Çekme-Basma test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Basma deneyleri, 33 farklı numune gurubundan üçer adet numune üzerinde yapılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır.

#### 3.3.2 Sertlik Deneyi

Bu çalışmada sertlik ölçümleri 33 farklı grup için ayrı ayrı yapılmıştır. Kaynaklı birleştirilmiş numunelerde sertlik ölçümü yapılan noktaların şematik gösterimi şekil 3.6'da verilmiştir. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere Fe-Cu-C toz metal karışım parçadan başlayarak 1'er mm'lik aralıklarla difüzyon kaynağı bölgesinden ve Fe-Zn-C toz metal karışım parça üzerinden bir hat boyunca ölçüm alınmıştır (Şekil 3.6). Sertlik ölçme işleminde Metkon marka sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümü yapılmadan önce numunelerin yüzeyleri sırasıyla 400, 800, 1200 kum SiC su zımparaları ile metal parlatma cihazında zımparalanmıştır. Daha sonra yüzeyler 0,25-1 mikronluk parlatıcılar (elmas süspansiyon) kullanılarak keçe ile parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Parlatma sonrasında parlatma işleminden çıkan numune yüzeylerinde leke oluşmaması için, numune yüzeyleri etil alkol ile yıkanmış ve kurutma cihazında yüzeyler kurutulmuştur.



Şekil 3.6 Numune üzerinde sertlik ölçümlerinin yapıldığı hattın ve noktaların görünüşü

### 3.3.3 Aşınma Deneyi

Kompresör gövdesinin iç silindirik parçası çalışma esnasında sürtünmeye maruz kaldığı için toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Fe-Cu-C toz metal parça aşınma deneyine tabi tutulmuştur.

Numuneler kuru sürtünme şartları altında pin-on-disk aşınma deney cihazında aşınmaya maruz bırakılmıştır. Aşınma diski 120 mm çapında, 18 mm kalınlığında ve sertliği  $60 \pm 2$  HRC'dir. Aşındırıcı disk malzemesi yağda sertleştirilmiş AISI 4140 çeliğidir. Deneylerde uygulanan aşındırma yükü 15 N ve disk çevresel hızı 1,25 m/s'dir. Toplam kayma mesafesi olarak 4 000 metre yol seçilmiş olup, bütün aşınma testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinde kullanılan aşınma deneyi cihazı Şekil 3.7'de verilmiştir.

Numunelerdeki ağırlık kaybı her 400 metre kayma mesafesinden sonra  $\pm 10^{-4}$  g. hassasiyetinde olan Precisa marka hassas terazi ile tartılarak tespit edilmiştir. Deney öncesi numuneler ve disk yüzeyleri aseton ile temizlenmiştir. Ayrıca numuneler hassas terazide tartılmadan önce numunelerin tüm yüzeyleri etil alkol ile temizlenmiştir.



Şekil 3.7 Aşınma deneyinde kullanılan test cihazı

### 3.4 Metalografik İnceleme

Parlatma işleminden sonra %2'lik nitrikasitin etil alkölde karışımı ile dağlama yapılmıştır. Dağlanmış numunelerin metalografik incelenmesi için optik mikroskop kullanılmıştır. Optik mikroskop olarak Metkon IMM 901 marka Metal Mikroskobu kullanılmış ve 400 büyütme optik mercek altında iç yapı incelemesi yapılmış olup iç yapı ile ilgili resimler Şekil 4.30 ile 4.39 arasında verilmiştir.

### 3.5 SEM (Scanning Electron Microscope) Analizi

SEM (Scanning Electron Microscope) ile 400 ve 1000 N/mm<sup>2</sup> basınçlarında, 1050 ve 1200<sup>o</sup>C sıcaklıklarında ve 60 dakika sinterleme süresinde kaynatılmış numunelerde Cu ve Zn'nun difüzyon davranışlarını belirlemek için hat analizi yapılmıştır. Deney numuneleri, standart metalografik hazırlama yöntemi ile hazırlanmış ve Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Metalürji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında JEOL marka SEM (Scanning Electron Microscope) cihazı ile incelenmiştir.



## BÖLÜM DÖRT

### DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

#### 4.1 Boyutsal Değişim

Numunelerin üretiminde seçilen parametrelerin, numune özelliklerine etkisini, diğer etkenlerden bağımsız olarak tespit edebilmek için, numuneyi oluşturan iki parçanın malzemesi, Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C toz karışımları, önceden seçilmiş ve deneylerde bu karışımlar sabit tutulmuştur. Gövdenin her iki parçasının elde edilmesi deneysel çalışmalarda özelliklerin öğrenilmesi için ilk önce seçilmiş Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C toz karışımlarının ayrı ayrı karıştırılması ve tek cins karışımın oluşturulmasıdır.

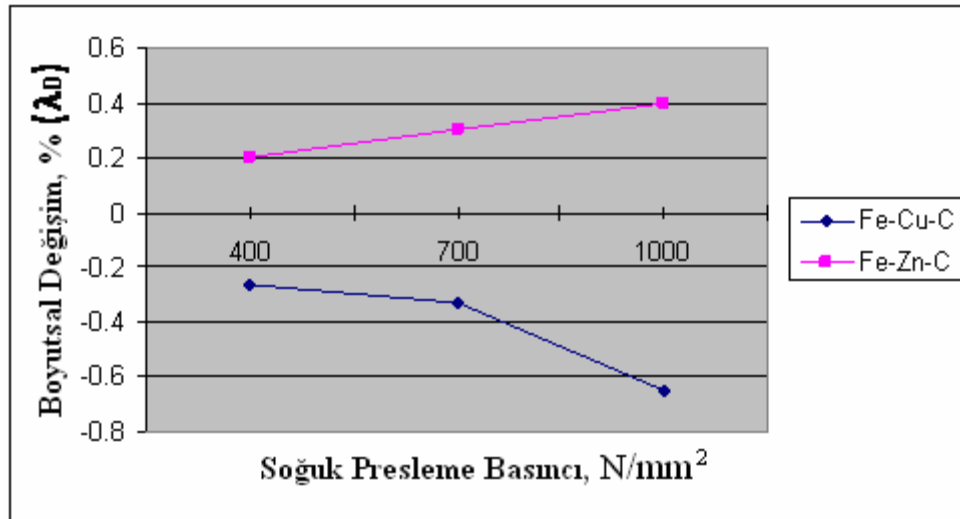
Gövdenin toz metalürjisi yöntemiyle elde edilmesi sırasında teknolojik proseslerin seçilmesi diğer toz malzemelerden çok farklılık gösterir. Burada gövdenin ayrı ayrı parçaları için toz karışımlarının hazırlanması, preslenmesi, sinterlenmesi ve sinterleme sırasındaki difüzyonu, kaynak ile parçaların birleştirilmesi gibi özel proseslerin seçilmesini gerektirir. Bu bakımdan toz karışımında mevcut olan elementlerin presleme ve sinterleme parametrelerinin doğru seçilmesi gereklidir. Kaynaklı birleştirmeyi meydana getiren Cu ve Zn elementlerinin üretilen parçaların ana kısmı olan Fe esaslı toz malzemeden oluşan gövdenin boyutsal özelliklerine ve yoğunluğuna etkisinin tespiti, birleşecek parçaların birleşmesi için önemlidir. Parçaların temas yüzeyine uygulanan basınç, sadece preslenme yönüne dik doğrultuda çökme ve preslenmiş numunenin yoğunluğuna bağlı olarak belirlenir. Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C sistemi karışımından elde edilmiş gövde parçalarının difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi prosesinin tam ve doğru olarak incelenebilmesi için, önceden hazırlanmış özel numunelerde boyutlarının (iç ve dış çaplara göre değişim) ve izafi yoğunluğunun tayin edilmesi gerekmektedir. Boyutsal değişimin tespitinde her iki toz metal parçanın soğuk presleme basınçlarına göre sinterlemeden önceki ve sonraki iç ve dış çapları dikkate alınmıştır. Boyutsal değişim sonuçları aşağıdaki formüllerle tayin edilir:

$$\lambda_D = \frac{(D_0 - D)}{D_0} \cdot 100\%$$

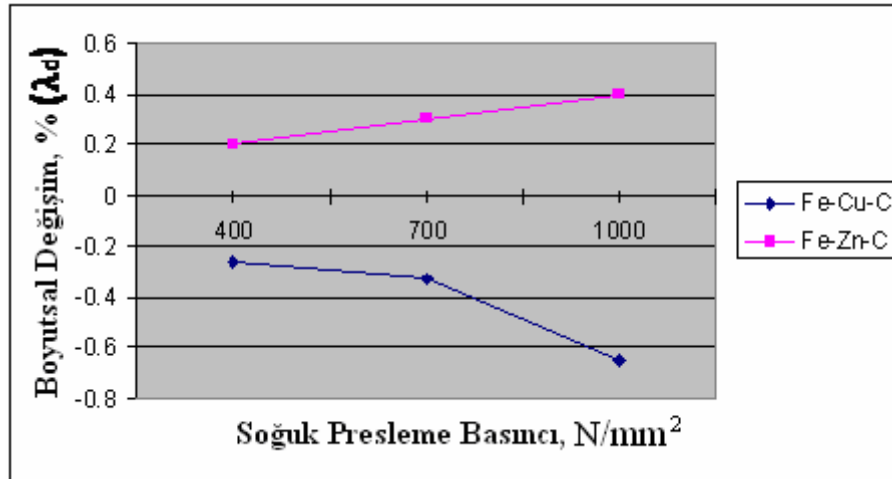
$$\lambda_d = \frac{(d_0 - d)}{d_0} \cdot 100\%$$

Burada;  $\lambda_d$  ve  $\lambda_D$  - soğuk presleme basıncına göre sinterleme sırasında iç ve dış çaplardaki yüzde olarak değişim;  $d_0$  ve  $D_0$  -sinterlemeye kadarki iç ve dış çaplar;  $d$  ve  $D$  - sinterlemeden sonraki iç ve dış çaplardır.

İç ve dış çaplardaki değişimi yüzde olarak tayin etmek için Fe-Cu-C toz metal parça için iç ve dış çapları sırasıyla  $d=17$  mm,  $D=30,8$  mm, yüksekliği 30,1 mm ve Fe-Zn-C toz metal parça için iç ve dış çapları sırasıyla  $d=30,85$  mm,  $D=50$  mm, yüksekliği 16,3 mm olan kovanlar hazırlanmıştır. Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C toz metal karışımına %0,5 sterat çinko ilave edilerek KAO 81-30 markalı preste preslenmiştir. Presleme işlemi 400, 700 ve 1000 N/mm<sup>2</sup> basınçlar altında gerçekleştirilmiştir. Deneyle 1050<sup>0</sup>C sıcaklıkta, 60 dakika sinterleme süresinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de sinterleme sonrasında toz metal parçalarda meydana gelen boyutsal değişimler verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.1 1050<sup>0</sup>C sinterleme sıcaklığı ve 60 dakika sinterleme süresinde toz metal parçalarda meydana gelen boyutsal değişimler (a) Dış çaptaki boyut değişimi, (b) İç çaptaki boyut değişimi.

Şekil 4.1'den de görüleceği üzere fırın içerisinde sinterlemeyle difüzyon kaynağının yapılabilmesi için gerekli olan boyutsal değişimler sağlanmaktadır.

Bu deney sonucunda Fe-Cu-C toz metal parçaların dış ve iç çaplarında bir miktar büyüme olduğu tespit edilmiş olup, bu değer presleme basıncının artmasıyla orantılı olarak artmaktadır. Burada boyut artışının nedeni, yukarıda literatür araştırmalarında (Paragraf 2.2.7) verildiği gibi Cu atomlarının varlığıdır. Toz metal karışımın yaklaşık olarak %1 ile 8'i arasında bakır içermesi durumunda tane sınırlarına yerleşen bakır atomları, sinterleme sonrası parçanın hacimsel olarak büyümesine sebep olmaktadır (Zhang ve ark., 2004). 400 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncında Fe-Cu-C toz karışımı parçanın iç ve dış çapındaki büyüme değerinin düşük olmasının sebebi ise, yapının %23,2 gözenekliliğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Şöyleki, gözenekliliğin fazla olması durumunda işlem sırasındaki yüksek sıcaklığın etkisiyle hareket eden bakır atomlarının bir kısmı gözeneklere yerleşerek, boyutsal değişimde daha etkin olmamaktadır.

Fe-Zn-C toz metalürjisi ile üretilmiş parçalarda ise, büzülmenin diğer parçalardaki boyutsal değişime göre daha fazla olduğu Şekil 4.1'de görülmektedir. Burada karışımdaki Zn yüzdesinin büyük bir kısmı yüksek sıcaklığın (yaklaşık olarak

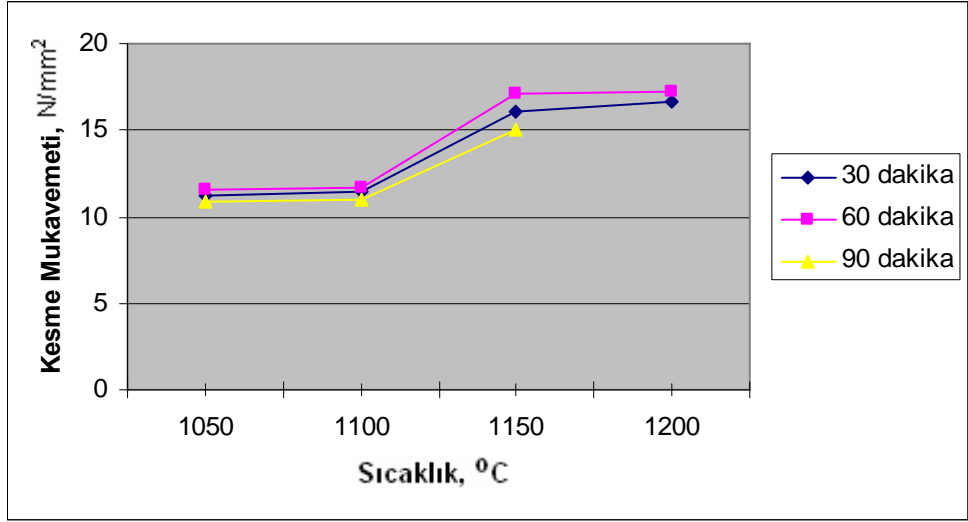
900°C) etkisiyle buharlaşarak parçayı oluşturan karışımı terk etmektedir. Karışımı terk eden Zn atomlarının yerini ise Fe ve C atomları almakta ve dolayısıyla Fe-Zn-C toz metal karışımından elde edilmiş parçadaki büzülme yüzdesinin artışı gerçekleşmektedir. Şekil 4.1'den görüldüğü gibi presleme basıncı değeri arttıkça Fe-Zn-C toz metal parçanın büzülme yüzdesi artmaktadır. En yüksek büzülme değeri 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında elde edilmiştir.

Şekil 4.1 incelendiğinde 400 N/mm<sup>2</sup> ile 700 N/mm<sup>2</sup> arasında soğuk presleme basınçlarında elde edilmiş Fe-Cu-C toz metal parçaların iç ve dış çaplarındaki artış yüzdelерinde, basınca göre artış yavaş olurken, 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme değerine doğru çıkıldığında çaplardaki artış yüzdelерinde kayda değer artışın olduğu görülmektedir. Fe-Zn-C toz metal parçaların iç ve dış çaplarındaki büzülme yüzdelерinde ise, soğuk presleme basıncının artışına bağlı olarak daha yavaş ama doğrusal bir artış görülmektedir.

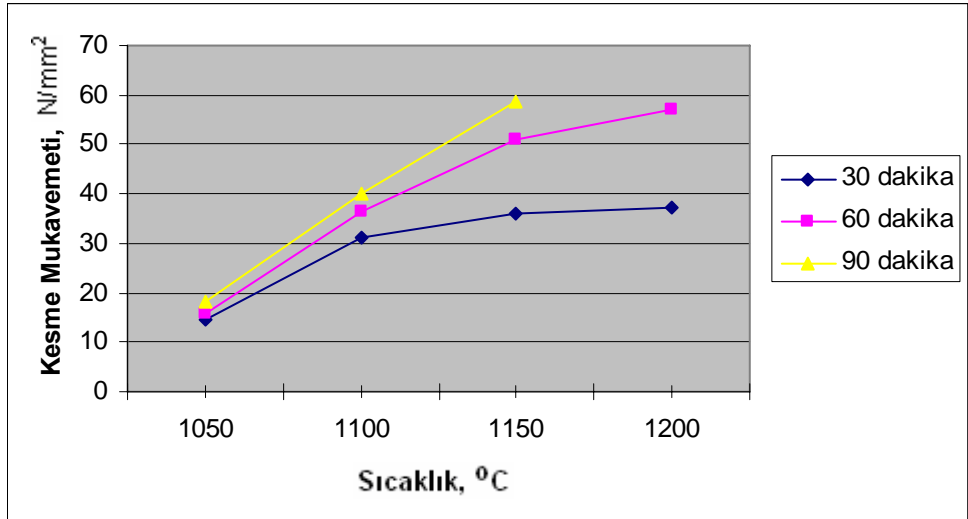
## **4.2 Mekanik Deneyler**

### ***4.2.1 Kesme Mukavemetinin Tayini***

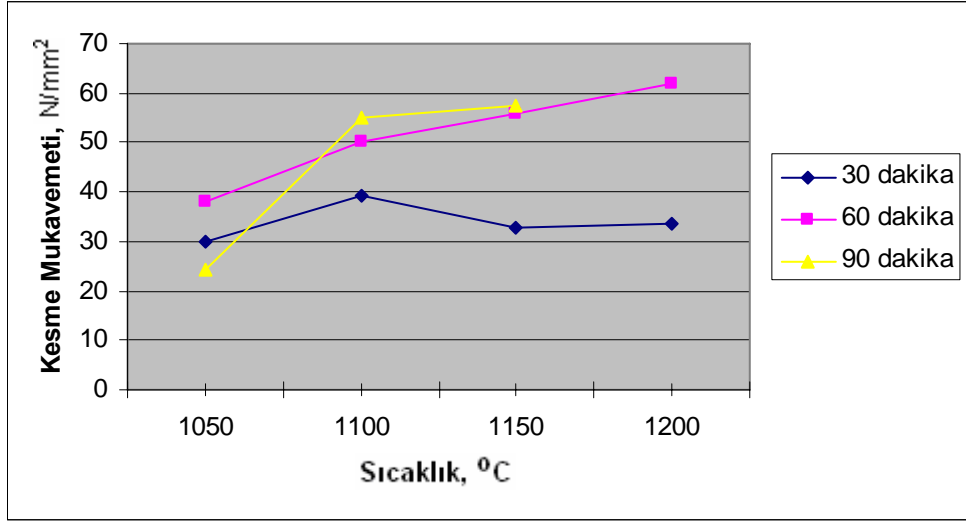
Sinterleme ve difüzyon kaynağı işlemi sonrası birleştirilmiş numuneler basma deneyine tabi tutularak, kaynaklı birleşmenin kesmeye karşı mukavemeti tespit edilmiştir. Fe-Zn-C toz metalürjisi ile elde edilen parça çekme-basma deney cihazının alt tablasına sabitlenmiş, Fe-Cu-C toz metal parçaya üst tabla tarafından basma gerilmesi uygulanarak kaynaklı birleştirmenin kesme yükü tayin edilmiştir. Şekil 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7'de farklı presleme basınçları, farklı sinterleme sıcaklıkları ve sürelerinde yapılmış difüzyon kaynağında kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetleri verilmektedir.



Şekil 4.2 Difüzyon kaynağıyla birleştirilmiş, soğuk presleme basıncı  $400 \text{ N/mm}^2$  olan, toz metal parçaların kaynaklı birleştirmesinin kesme mukavemetinin sinterleme sıcaklığı ve süresine göre değişimi



Şekil 4.3 Difüzyon kaynağıyla birleştirilmiş, soğuk presleme basıncı  $700 \text{ N/mm}^2$  olan, toz metal parçaların kaynaklı birleştirmesinin kesme mukavemetinin sinterleme sıcaklığı ve süresine göre değişimi



Şekil 4.4 Difüzyon kaynağıyla birleştirilmiş, soğuk presleme basıncı  $1000 \text{ N/mm}^2$  olan, toz metal parçaların kaynaklı birleştirmesinin kesme mukavemetinin sinterleme sıcaklığı ve süresine göre değişimi

Şekil 4.2’de  $400 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncıyla elde edilmiş Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C toz metal parçaların difüzyon kaynağıyla birleştirilmesinde kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetinin, sıcaklık ve sinterleme süresine göre değişimi görülmektedir. Burada en düşük kesme mukavemeti değeri olan  $10,9 \text{ N/mm}^2$ ,  $1050^\circ\text{C}$  sıcaklık ve 90 dakika kaynak süresinde elde edilmiştir. En yüksek değer olan  $17,26 \text{ N/mm}^2$  kesme mukavemeti değeri ise,  $1200^\circ\text{C}$  sıcaklıkta ve 60 dakikalık kaynak süresinde elde edilmiştir.

Daha önce yapılmış çalışmalardan da bilindiği üzere (Paragraf 2.2.4) toz metal parçaların içerdikleri gözenekler malzemenin mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir. Kısacası toz metal parçadaki gözenek miktarı arttıkça mekanik özellikler düşmektedir (Meriç ve ark. 2005). Soğuk presleme basıncı  $400 \text{ N/mm}^2$  olan toz metal parçalar yaklaşık olarak %24 gözenek içermektedir. Gözenek miktarı fazla olduğundan dolayı sinterleme ve difüzyon kaynak işlemi sırasında yapışma ve bağ oluşturacak olan bakır atomlarının bir çoğu gözenekleri doldurmaktadır. Dolayısıyla kaynak bölgesine daha az miktarda bakır difüze olmaktadır ve kaynaklı birleştirme işlemine daha az bakır atomu katılmaktadır. Bu da birleştirmenin mukavemetinin düşmesine neden olmaktadır.

Ayrıca gözenekler toz metal parçanın boyutsal olarak değişimini de önemli ölçüde etkilemektedir. Fe-Cu-C toz metal parçanın çapındaki genişleme oranının düşük olması ve Fe-Zn-C toz metal parçada büzülmenin az olması birleşme yüzeyleri arasında yeterli değerde temas basıncı oluşturmamaktadır. Şekil 4.2'den görüleceği üzere kaynak sıcaklığının artmasıyla kesme mukavemeti değeri de artmaktadır. Kaynak süresi 30 dakikadan 60 dakikaya yükseldiğinde kesme mukavemeti yükselmekte olup, fakat bu değer 90 dakika sinterleme süresinde düşmektedir. Daha önceki bölümlerde belirttiğimiz üzere difüzyon kaynağında uzun sinterleme süresi kaynaklı birleştirmenin mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir. Uzun sinterleme süresindeki difüzyon kaynağı işlemi sırasında düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik sebebiyle difüze olan elementlerin boşlukalara doğru hareket ettiği tahmin edilmektedir. Bu sebeple de birleşme yüzeyleri arasında bağ oluşturacak yeterli Cu elementi (atomu) olmadığından, yeterli bağ kuvveti de oluşmamaktadır.

Şekil 4.3'de ise  $700 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncıyla elde edilmiş Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C toz metal parçaların difüzyon kaynağıyla birleştirilmesinde, kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetinin, sıcaklık ve sinterleme süresine göre değişimi görülmektedir. Burada en düşük kesme mukavemeti değeri olan  $14,76 \text{ N/mm}^2$ ,  $1050^\circ\text{C}$  sıcaklık ve 30 dakika kaynak süresinde elde edilmiştir. En yüksek değer olan  $58,53 \text{ N/mm}^2$  kesme mukavemeti değeri ise,  $1200^\circ\text{C}$  sıcaklıkta ve 60 dakikalık kaynak süresinde elde edilmiştir.

$700 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında elde edilmiş numunlerin gözenekliliği % 15 civarındadır. Gözeneklik değerinin düşmesiyle mekanik özellikler iyileşmektedir. Şekil 4.2'den farklı olarak burada kesme mukavemeti, sıcaklık ve sinterleme süresinin artmasıyla artmaktadır. Bunun nedeni, burada  $400 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında elde edilen yoğunluk değerinden daha yüksek yoğunluk ve daha düşük gözenekliliktir.  $1050^\circ\text{C}$  sıcaklıkta katı hal difüzyonu söz konusu olduğundan, bu sıcaklıkta bağ kuvvetleri iyi gelişmemiştir. Daha yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça bakırın sıvı fazda olmasından dolayı sıvı faz difüzyonu sinterlemesi söz konusu olmakta ve daha iyi bağ kuvveti oluşmaktadır. Zira katı hal difüzyonunda ise difüze olan elementler katı halde ana malzeme atomları ile bağ oluştururlar. Sıvı faz difüzyonunda ise difüze olan elementler sıvı halde oldukları için, ana malzeme

atomlarını ıslatmakta ve iyi bir bağ kuvveti oluşturmaktadırlar. Sonuçta bu durum kesme mukavemetine olumlu yönde etki etmektedir.

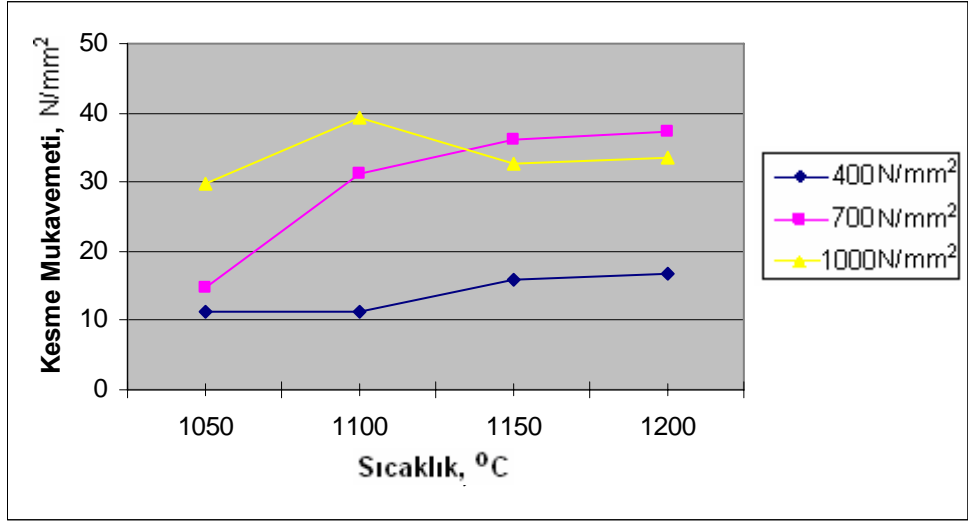
Şekil 4.4’de  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncıyla elde edilmiş Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C toz metal parçaların difüzyon kaynağıyla birleştirilmesinde, kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetinin sinterleme sıcaklığı ve süresine göre değişimi görülmektedir.  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında elde edilmiş toz metal parçalar, yüksek yoğunluk ve düşük gözenekliliğe sahiptirler. Yoğunluk değerinin yüksek olması ve gözenekliliğin düşük olması mekanik özelliklere olumlu yönde etki etmektedir. Burada en düşük kesme mukavemeti değeri olan  $24,3 \text{ N/mm}^2$ ,  $1050^\circ\text{C}$  sıcaklık ve 90 dakika kaynak süresinde elde edilmiştir. En yüksek değer olan  $61,88 \text{ N/mm}^2$  kesme mukavemeti değeri ise,  $1200^\circ\text{C}$  sıcaklıkta ve 60 dakikalık kaynak süresinde elde edilmiştir.

Şekil 4.4’ten açıkça görüldüğü üzere sinterleme sıcaklığının yükselmesi ve sürenin uzaması ile kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemeti artmaktadır.  $1050^\circ\text{C}$  sıcaklık ve 90 dakika kaynak süresindeki kesme mukavemeti değerinin, aynı sıcaklıkta 30 ve 60 dakika kaynak sürelerindeki değerlerinden daha düşük olmasının sebebi ise, temas yüzeyleri arasındaki birleşmemiş ara boşluğun fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

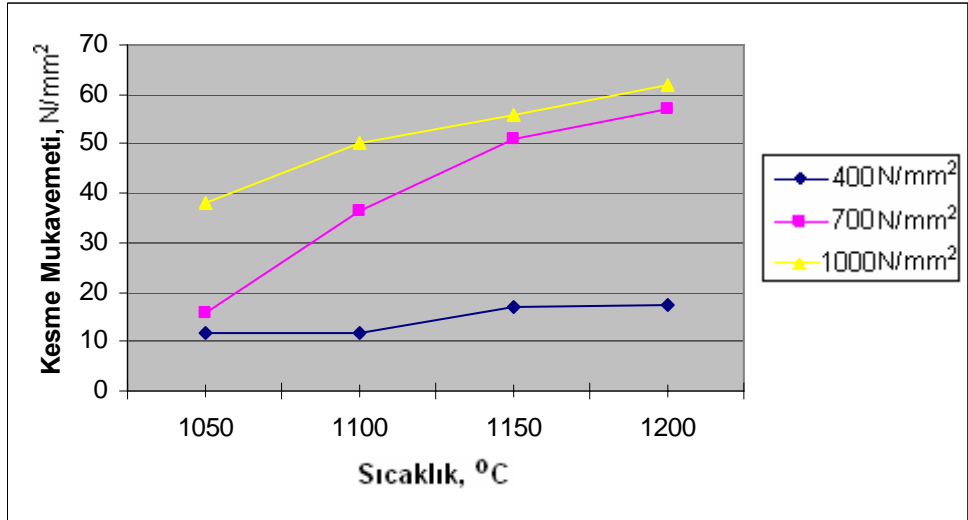
Difüzyon kaynağı süresi 30, 60 ve 90 dakika olacak şekilde sabit tutularak sinterleme sıcaklığına ve kalıpta soğuk sıkıştırma basıncı değerine bağlı olarak kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetleri sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmektedir.

Şekillerden görüldüğü gibi genel olarak soğuk presleme basıncı değerinin yükselmesiyle kaynaklı birleştirmenin mukavemeti de yükselmektedir.  $400 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında sıcaklığın artmasıyla kesme mukavemeti değerinde belirgin bir yükselme görülmektedir.  $700 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme değerinde ise sıcaklığın artmasıyla birlikte kesme mukavemeti değerinde de önemli ölçüde bir artış görülmektedir.

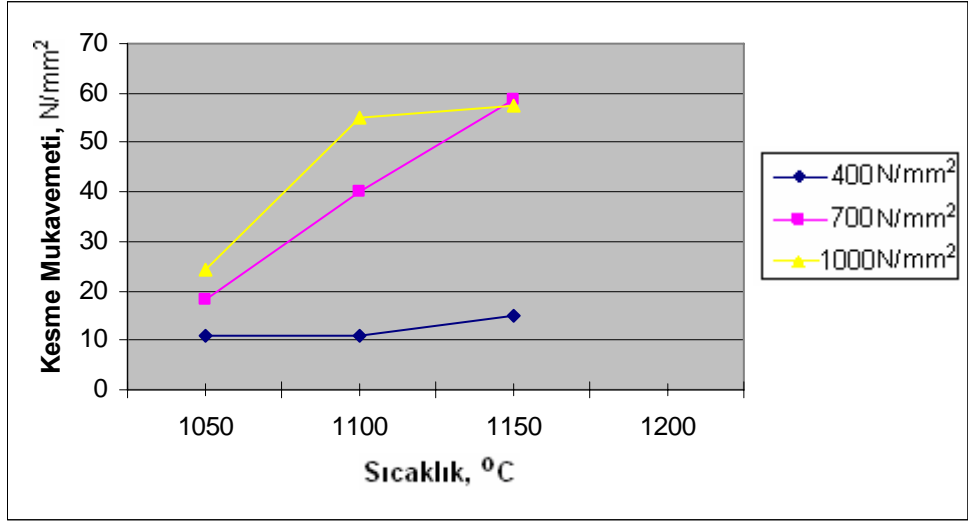




Şekil 4.5 30 dakika sinterleme süresinde yapılan difüzyon kaynağı işleminde kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetinin, sıcaklık ve soğuk presleme basıncına göre değişimi



Şekil 4.6 60 dakika sinterleme süresinde yapılan difüzyon kaynağı işleminde kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetinin, sıcaklık ve soğuk presleme basıncına göre değişimi



Şekil 4.7 90 dakika sinterleme süresinde yapılan difüzyon kaynağı işleminde kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetinin, sıcaklık ve soğuk presleme basıncına göre değişimi

30 dakika sinterleme süresinde ve  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme değerinde sıcaklık  $1050^\circ\text{C}$ 'den  $1100^\circ\text{C}$ 'ye yükseldiğinde kaynaklı birleştirmenin mukavemetinin artmasına rağmen  $1150^\circ\text{C}$ 'ye çıkıldığında mukavemet değerinde düşüş görülmektedir. Burada kaynak sırasında iç ve dış parçalardaki çap değişimi tolerans değerlerini geçtiği ve soğuma sırasında parçalarda meydana gelen plastik şekildeğiştirmeden dolayı kaynaklı birleştirmede çatlama olduğu tahmin edilmektedir. Diğer kaynaklama sürelerinde ise mukavemetin sıcaklıkla birlikte arttığı görülmektedir.

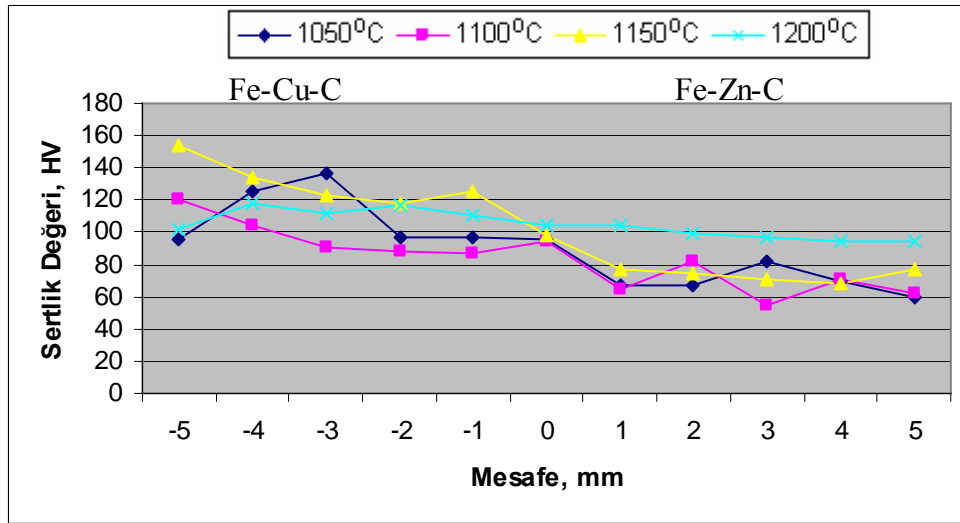
Yapılan incelemeler sonucunda en yüksek kesme mukavemeti,  $61,88 \text{ N/mm}^2$ ,  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında,  $1200^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde yapılan kaynaklardaki numunelerde elde edilmiştir.

#### 4.2.2 Sertlik Muayenesi

Difüzyon kaynağıyla birleştirilmiş numunelerde ölçülen sertlik değerleri sinterleme sıcaklığına, soğuk presleme basıncına ve sinterleme süresine bağlı olarak, şekil 4.8 ile şekil 4.16 arasındaki şekillerde görülen grafiklerde verilmiştir. Burada Fe-Cu-C toz karışım malzemesinden üretilmiş olan iç silindirik parçadan başlayarak,

kaynak bölgesine ve Fe-Zn-C toz karışım malzemesinden üretilmiş olan dış silindirik parçanın kesiti boyunca 1'er mm aralıklarla sertlik değerleri ölçülmüştür. Grafiklerin bazı noktalarında anormal düşmeler ve daha sonra yükselmeler olmaktadır. Bunun nedeni parçaların toz metalden üretilmiş olmasından dolayı ölçüm esnasında gözeneklere yakın bölgelerde sertlik ölçümü yapıldığı veya sertlik ölçülen bölgelerde kimyasal kompozisyon farklılıklarıdır (Kurgan, 2005).

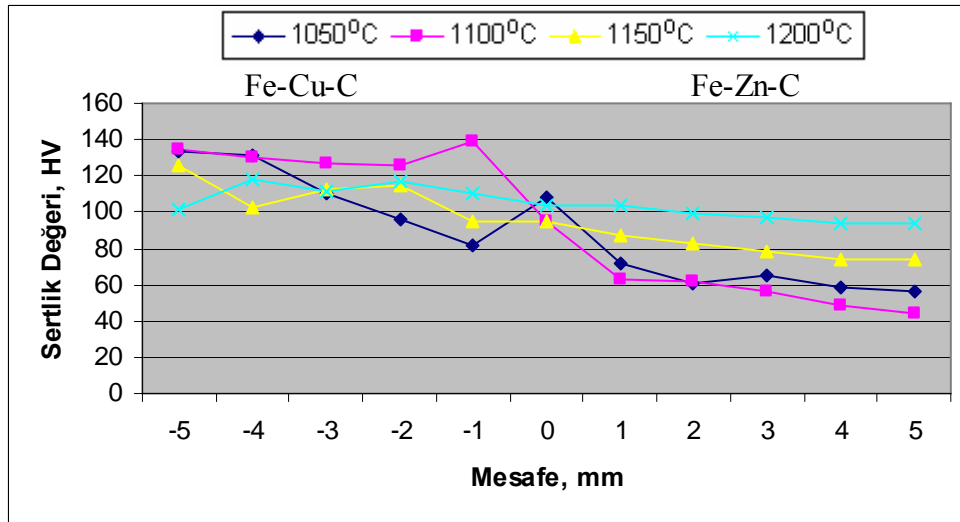
Birleştirme işlemi uygulanmış numunlerde sertlik değerlerinin Fe-Cu-C toz metal parçada yüksek olduğu görülmektedir. Fakat, sertlik değerleri, sinterleme ve difüzyon kaynağı işlemi uygulanmış tüm numunlerde Fe-Cu-C toz metal parçadan başlayarak Fe-Zn-C toz metal parçaya doğru gidildikçe düşüş göstermektedir. Bunun nedeni Fe-Cu-C toz metal parçada olan Cu yüzdesinin bu doğrultuda ilerledikçe düşmesidir (Paragraf 2.2.7). Zira yapılan literatür araştırmalarına göre, Fe-C toz metal karışımına ilave edilen Cu yüzdesinin artması mekanik özellikleri artırmaktadır (Gülsoy ve ark. 1997; Meapace ve ark., 2002).



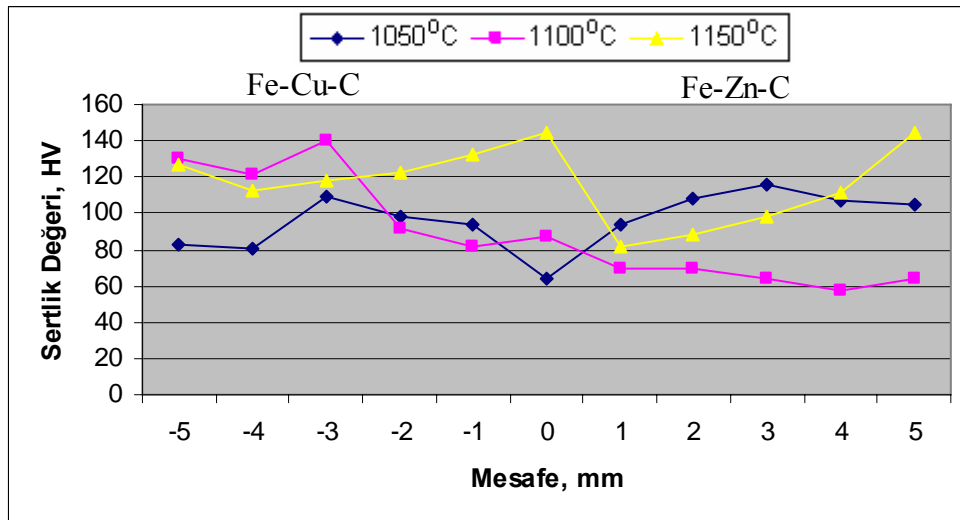
Şekil 4.8 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 30 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin sinterleme sıcaklığına göre değişimi

Şekil 4.8'de 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 30 dakika kaynak süresinde sinterlenme ve difüzyon kaynağı işlemi uygulanmış toz metal numunelerin sertlik

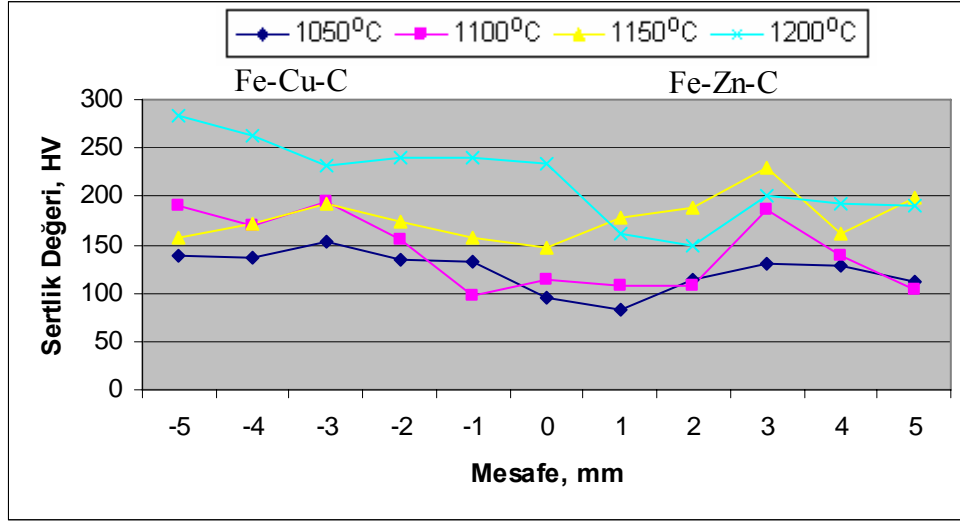
değerlerinin kaynak sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Sertlik değerleri genel olarak sinterleme sıcaklığının yükselmesiyle yükselmektedir.



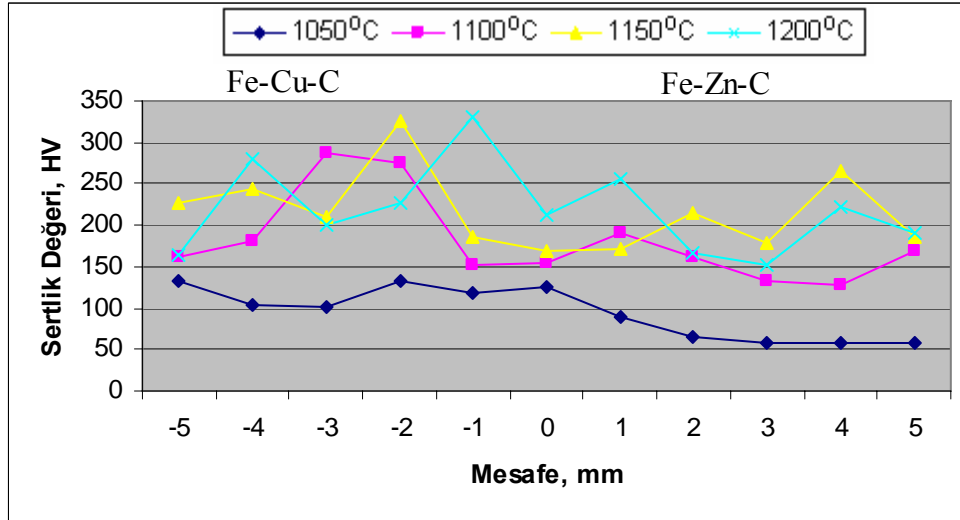
Şekil 4.9 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 60 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin sinterleme sıcaklığına göre değişimi



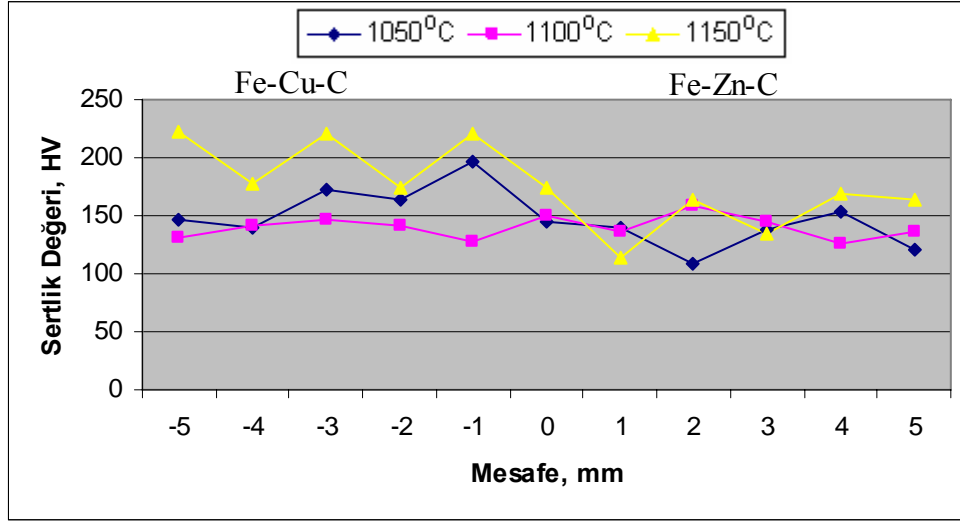
Şekil 4.10 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 90 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin sinterleme sıcaklığına göre değişimi



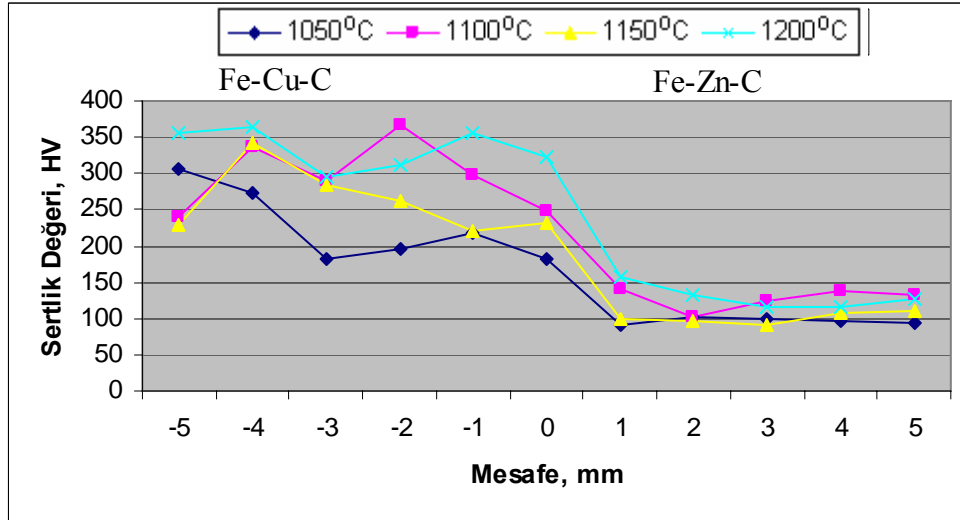
Şekil 4.11 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 30 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin sinterleme sıcaklığına göre değişimi



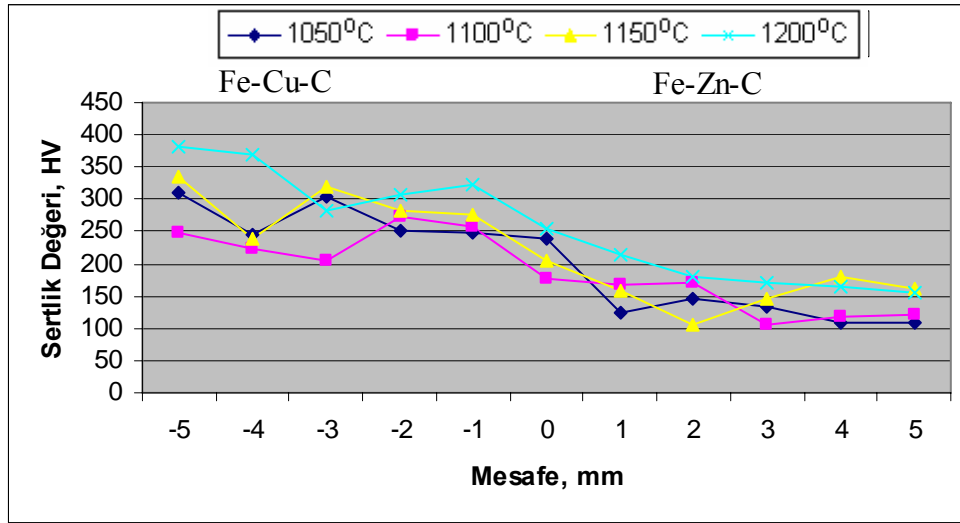
Şekil 4.12 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 60 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin sinterleme sıcaklığına göre değişimi



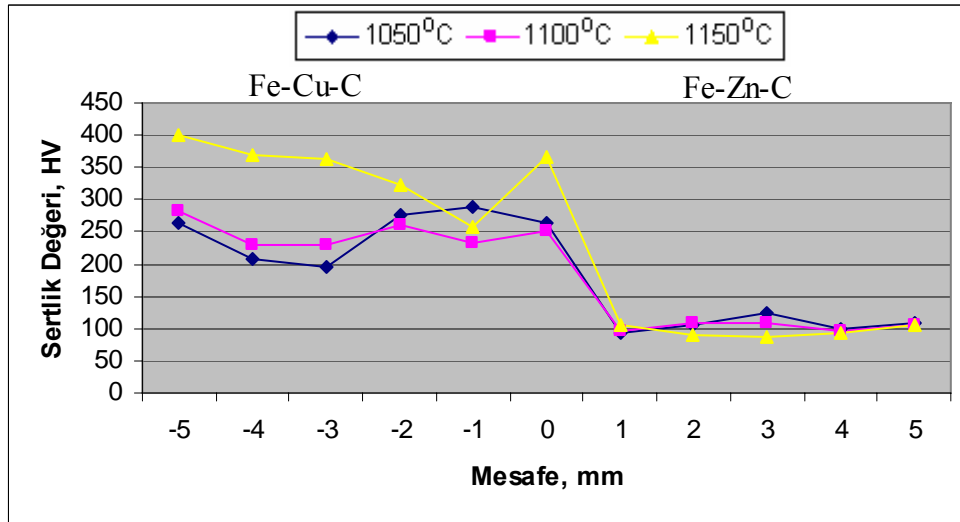
Şekil 4.13 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 90 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin sinterleme sıcaklığına göre değişimi



Şekil 4.14 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 30 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin sinterleme sıcaklığına göre değişimi



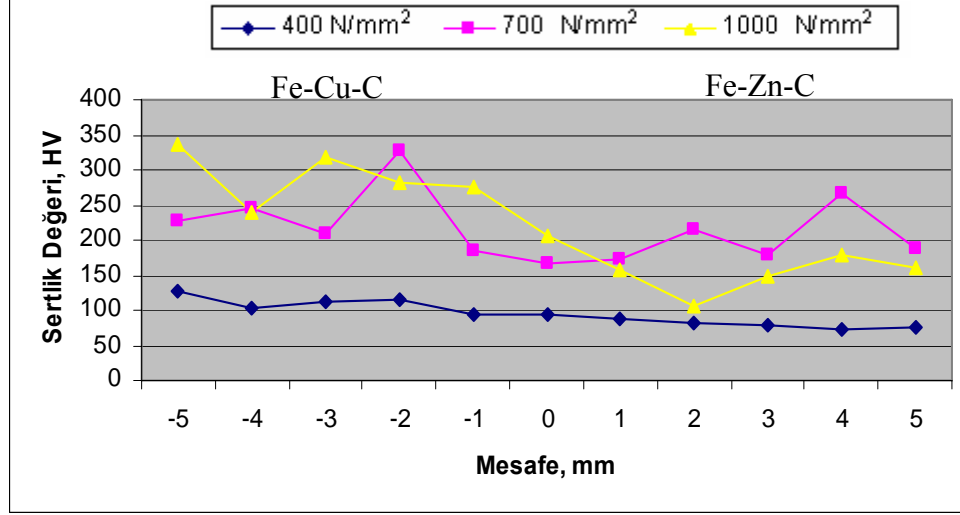
Şekil 4.15 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 60 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin sinterleme sıcaklığına göre değişimi



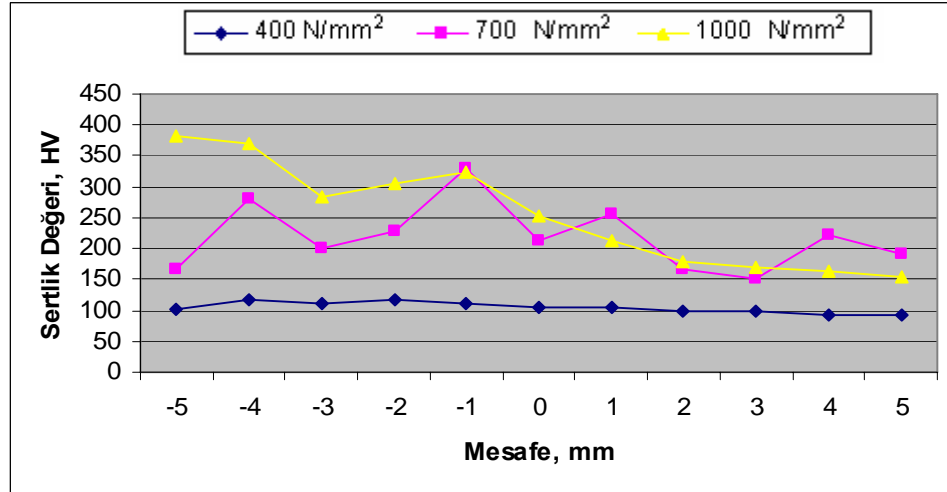
Şekil 4.16 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 90 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin sinterleme sıcaklığına göre değişimi

Sinterlenme ve difüzyon kaynağı uygulanmış tüm numunelerin sertlik değerleri dağılımının aynı karakterde olduğu şekil 4.8 ile şekil 4.16 arasındaki şekillerde verilen grafiklerden görülmektedir. Seçilmiş olan tüm soğuk presleme basınç değerlerinde ve sinterleme sürelerinde sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik

değerlerini incelediğimiz zaman en iyi (en yüksek) sertlik değerlerin  $1150^{\circ}\text{C}$  ve  $1200^{\circ}\text{C}$ 'de elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.17 ve 4.18'de 60 dakika sinterleme süresinde sırasıyla  $1150^{\circ}\text{C}$  ve  $1200^{\circ}\text{C}$  sinterleme sıcaklıklarında elde edilmiş olan numunlerin sertlik değerlerinin soğuk presleme basıncına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 4.17  $1150^{\circ}\text{C}$  sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin soğuk presleme basıncına göre değişimi



Şekil 4.18  $1200^{\circ}\text{C}$  sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde üretilen kaynaklı birleştirmenin enine kesitinde sertlik değerlerinin soğuk presleme basıncına göre değişimi



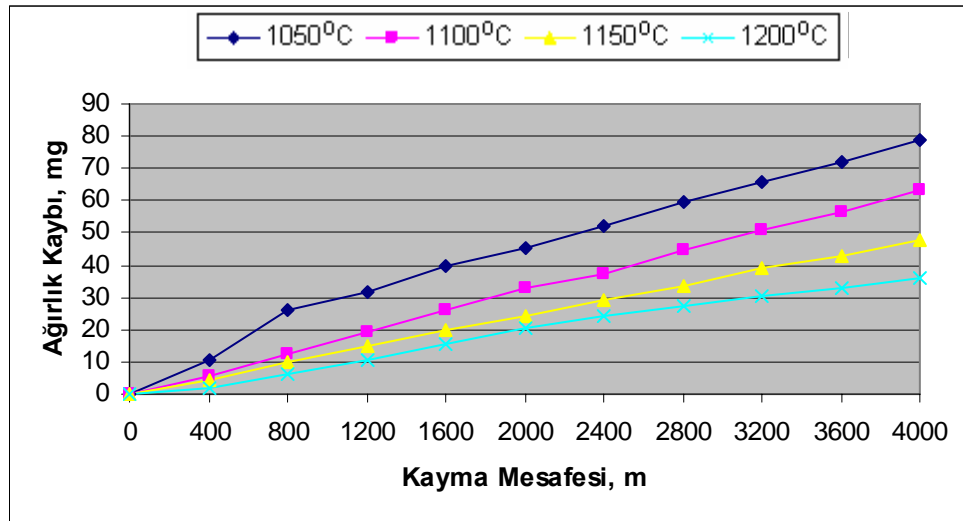
Şekil 4.17 ve 4.18’de farklı soğuk presleme basınçlarında üretilmiş numunelere 1150<sup>0</sup>C ve 1200<sup>0</sup>C sinterleme sıcaklığı ve 60 dakika sinterleme süresinde, üretilmiş olan difüzyon kaynağında kaynaklı birleşmelerdeki sertlik değerlerinin soğuk presleme basıncına göre değişimi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi soğuk presleme değerinin yükselmesiyle sertlik değerlerinde artış olmuştur. 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilen numunelerin sertliklerini karşılaştırdığımızda 400 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncındakine göre 700 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncındaki sertlik değerlerinde önemli artış olduğu görülmektedir. Bunun sebebi 400 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncında üretilmiş numunelerin gözenekliliğinin 700 N/mm<sup>2</sup> presleme değerinde üretilen numunelere göre fazla olmasıdır. Yapılan literatür araştırmasından da bilindiği gibi gözeneklilik değerinin yükselmesi, toz metal malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. 700 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncı ile üretilmiş olan numunelerle 1000 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncında üretilmiş olan numunelerin sertlik değerlerini karşılaştırdığımızda, difüzyon kaynağı yapılmış parçalardan Fe-Cu-C toz metal parçanın sertlik değerleri, 1000 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncında üretilenlerdeki sertlik değerleri 700 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncında üretilenlerdeki sertlik değerine göre daha yüksektir. Fe-Zn-C toz metal parçanın sertlik değerlerine bakıldığında ise, 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş olan numunelerin sertlik değerleri daha yüksektir. Bunun nedeni, 1000 N/mm<sup>2</sup> presleme basınç değerinde preslenmiş numunelerde yoğunluk değerinin daha yüksek olması ve yoğunluk değerinin yüksek olmasından dolayı Cu’ın Fe-Zn-C toz metal parçaya difüzyonunun düşük olmasıdır. Yüksek presleme basıncı sebebiyle Fe tozları daha sıkı kuvvetle birbirine bağlanırlar ve karışıma ilave edilen C yüzdesi 900<sup>0</sup>C’de Fe içerisinde çözünmeye başlar. Yapılan literatür araştırmalarına (Yılmaz, 2005) göre da bilindiği üzere karışıma ilave edilen C Cu’ın Fe içerisinde çözünmesini engellemektedir. 700 N/mm<sup>2</sup> basınç değerinde yoğunluk değeri 1000 N/mm<sup>2</sup> değerinden daha düşük olduğu için, Fe tozları daha düşük kuvvetle birbirilerine bağlanırlar ve bunun sonucunda da Cu’ın difüzyonu daha iyi olmaktadır.

Sonuç olarak sertlik değerlerinin optimum değerlerinin, 700 N/mm<sup>2</sup> ve 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basınçlarında, 1150<sup>0</sup>C ve 1200<sup>0</sup>C sinterleme sıcaklıklarında ve 60 dakikalık sinterleme süresinde gerçekleştiği görülmektedir.

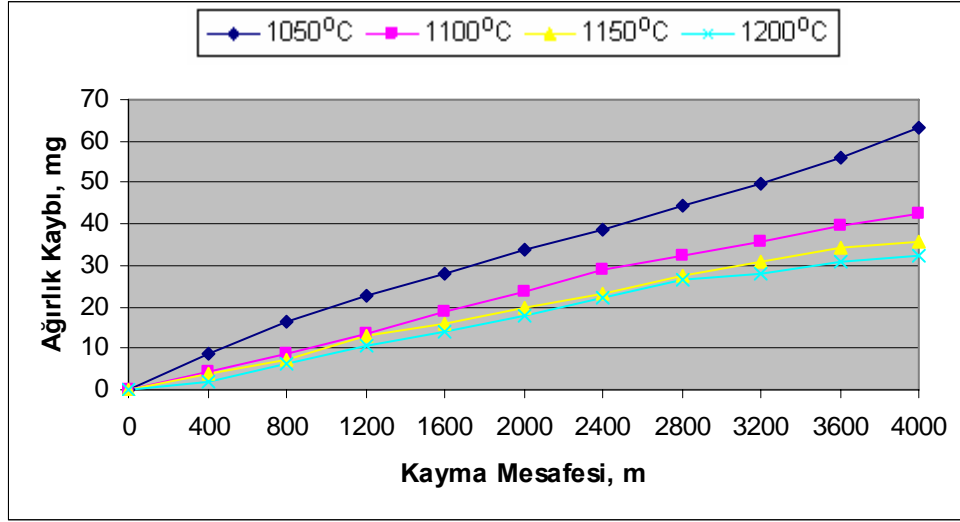
### 4.2.3 Aşınma Muayenesi

Kompresör gövdesinin Fe-Cu-C toz metal silindirik parçasının iç yüzeyi, içerisinde hareket eden elektrik motoru tahrik milinden dolayı sürtünmeye maruz kalmaktadır. Bu nedenle kompresör gövdesinin Fe-Cu-C toz metal parçasının aşınma davranışlarını inceleyebilmek için, bu bileşime sahip toz metal malzemedan  $\text{Ø}5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  boyutlarında aşınma testi numuneleri hazırlanmıştır.

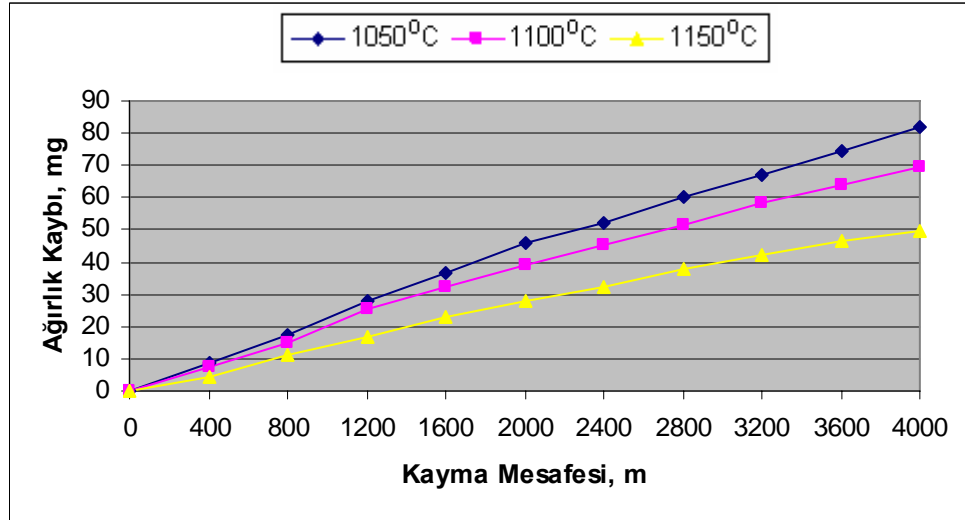
Kayma mesafesine bağlı olarak numunelerin ağırlıklarında meydana gelen değişimler Şekil 4.19 ile Şekil 4.27 arasındaki şekillerde verilen grafiklerde verilmiştir. Verilen grafiklerden görüleceği üzere sinterleme sıcaklığının artmasıyla aşınma kayıplarında düşüş olmaktadır. Bütün soğuk presleme basınçlarında ve sinterleme sürelerinde en fazla aşınma kaybı  $1050^{\circ}\text{C}$  sinterleme sıcaklığında olmaktadır. Bunun nedeni  $1050^{\circ}\text{C}$  sinterleme sıcaklığında katı hal sinterlemesinin oluşması, dolayısıyla  $1050^{\circ}\text{C}$ 'de mekanik mukavemetin (sertlik) düşük olmasıdır. Mekanik mukavemetin düşük olmasının nedeni, bu sıcaklıkta meydana gelen katı hal difüzyonu sonucu, Cu atomlarının katı halde Fe ve C'la tane sınırlarında daha düşük kuvvette bağ oluşturmaları olarak tahmin edilmektedir.



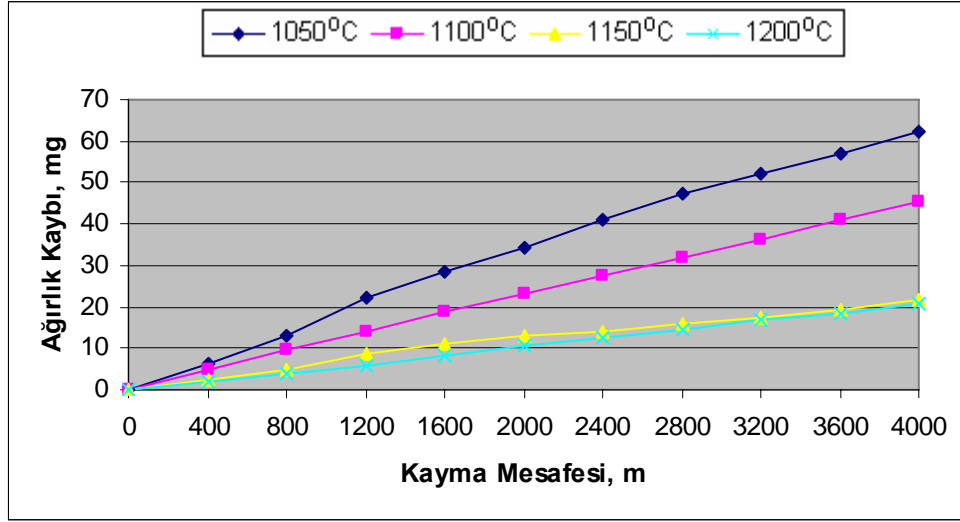
Şekil 4.19  $400 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncı ve 30 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunelerin aşınma kayıplarının sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi



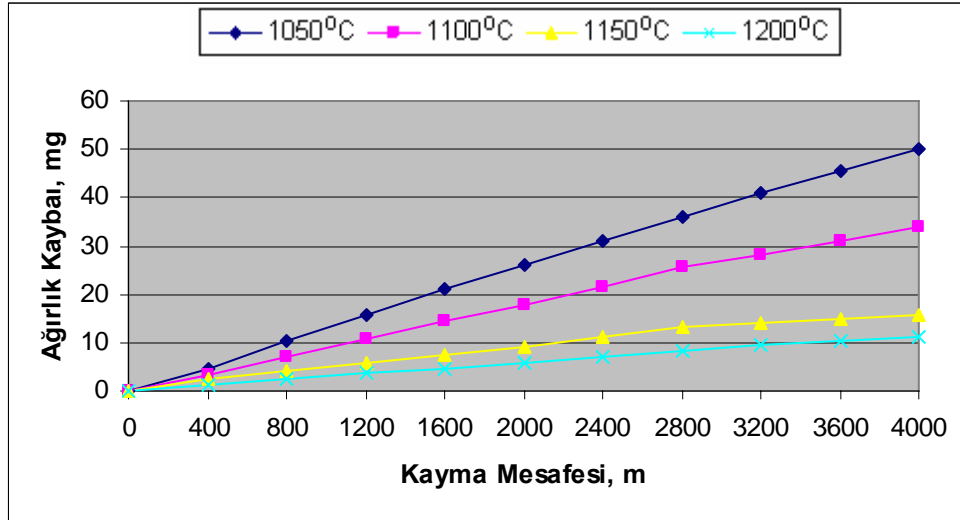
Şekil 4.20 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 60 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunelerin aşınma kayıplarının sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi



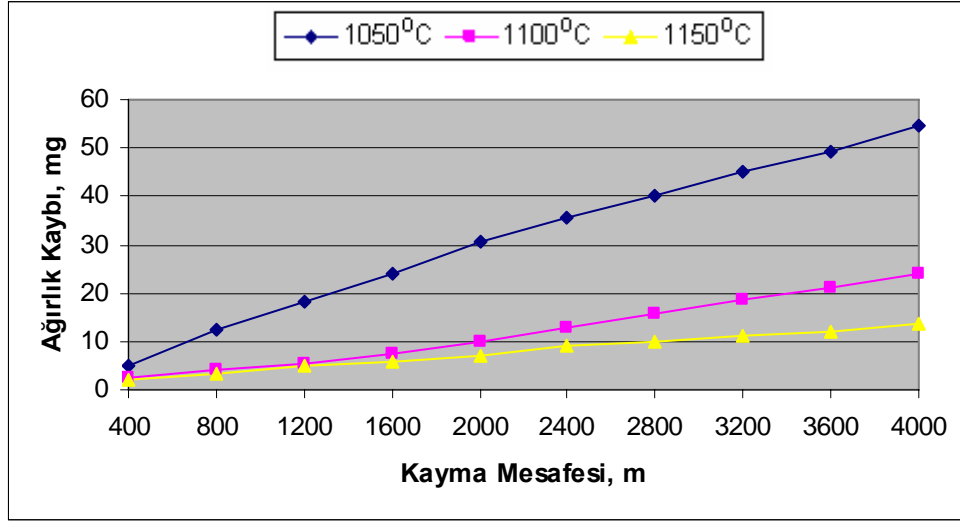
Şekil 4.21 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 90 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunelerin aşınma kayıplarının sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi



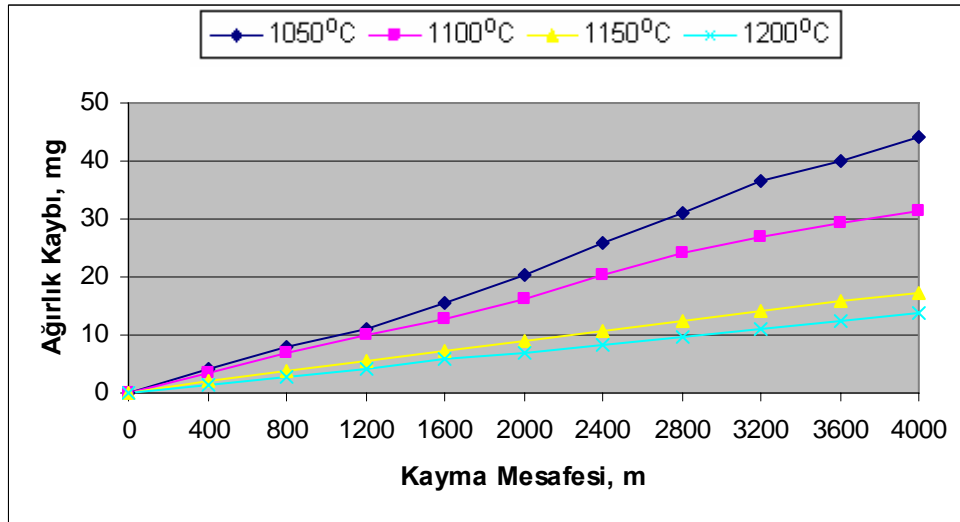
Şekil 4.22 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 30 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunelerin aşınma kayıplarının sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi



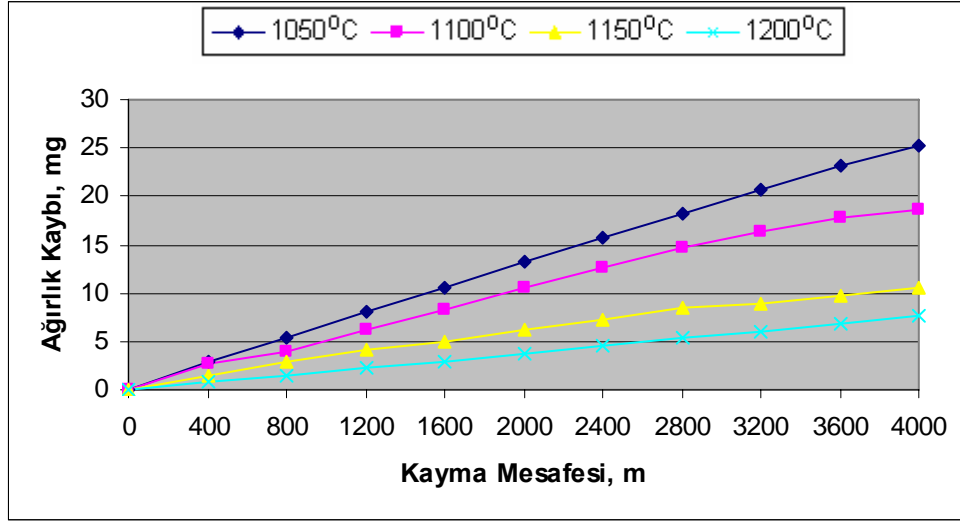
Şekil 4.23 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 60 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunelerin aşınma kayıplarının sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi



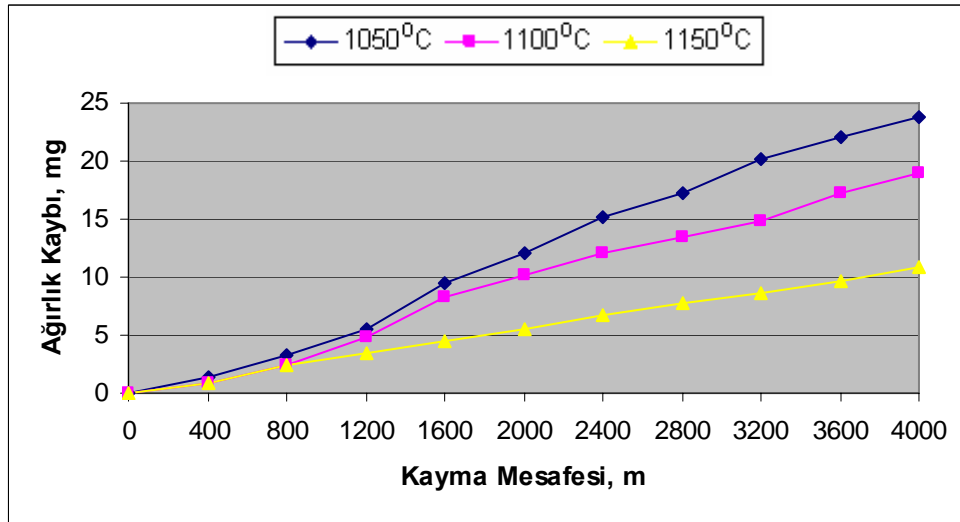
Şekil 4.24 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 90 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunelerin aşınma kayıplarının sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi



Şekil 4.25 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 30 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunelerin aşınma kayıplarının sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi



Şekil 4.26 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 60 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunelerin aşınma kayıplarının sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi



Şekil 4.27 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 90 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunelerin aşınma kayıplarının sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi

Şekil 4.19 ile 4.21 arasındaki şekillerdeki grafiklerde 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 30, 60 ve 90 dakika sinterleme sürelerinde ve 1050, 1100, 1150 ve 1200°C sinterleme sıcaklıklarında imal edilmiş toz metal numunelerin 4 000 m kayma mesafesinde aşınma kayıpları verilmiştir. 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme

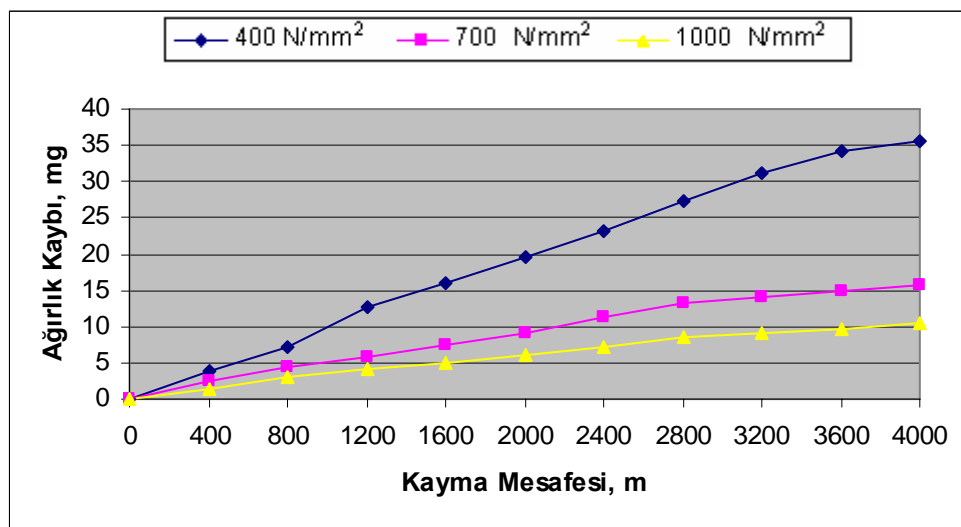
basıncında toz metal numunede gözenek miktarı daha yüksek basınçlardakine göre daha yüksektir. Toz metal malzeme içerisinde gözenekliliğin fazla olması malzemenin mekanik özelliklerini (çekme dayanımı, sertlik, yorulma dayanımı v.b) negatif yönde etkilemektedir (Douib ve ark., 1989; Varol ve Sarıtaş, 1996). 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında elde edilen numunelerin aşınma kayıpları grafiklerden görüleceği gibi kayma mesafesinin artmasıyla yaklaşık doğrusal olarak artış göstermektedir. 60 dakika sinterleme süresinde ve 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında en düşük aşınma kaybı elde edilmiş olup, kayma mesafesi arttıkça aşınma kayıplarının artışında düşüş gözlenmektedir.

Şekil 4.22 ile 4.24 arasındaki şekillerdeki grafiklerde 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 30, 60 ve 90 dakika sinterleme sürelerinde ve 1050, 1100, 1150 ve 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklıklarında üretilmiş toz metal numunelerin 4 000 m kayma mesafesinde aşınma kayıpları verilmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere 1050 ve 1100<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklıklarında üretilen numunelerin aşınma kayıpları yüksektir. Bunun nedeni, bu sıcaklıkların sinterlenme için yeterli olmamasıdır. 1150 ve 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunelerde ise, aşınma kayıplarında kayda değer düşüşün olduğu görülmektedir. Zira bu sıcaklıklarda sıvı hal sinterlenmesi meydana gelmektedir ve Cu atomları sıvı halde Fe ve C'la tane sınırlarında daha büyük kuvvette bağ oluşturmaktadır. Sonuçta 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş toz metal numunelerin 1150 ve 1200<sup>o</sup>C sıcaklıklarında sinterlenmesinin sinterlenme açısından yeterli olduğu anlaşılmaktadır (Somunkıran ve Özel, 2006).

Şekil 4.25 ile 4.27 arasındaki şekillerdeki grafiklerde 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 30, 60 ve 90 dakika sinterleme sürelerinde ve 1050, 1100, 1150 ve 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklıklarında üretilmiş toz metal numunelerin 4 000 m kayma mesafesinde aşınma kayıpları verilmiştir. Bu soğuk presleme basıncında üretilmiş numunelerin aşınma kayıpları incelendiğinde, sinterlenme sıcaklığının yükselmesiyle aşınma kayıplarında düşüşün olduğu görülmektedir. Ağırlık kayıpları miktarı sinterleme sıcaklığı 1050<sup>o</sup>C sıcaklığından yukarı doğru çıktıkça düşmektedir. Bu aşınma kayıplarının düşüşü, 1150 ve 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklıklarında üretilen numunelerde daha bariz olarak görülmektedir. 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında yüksek yoğunluğa sahip toz metal numune elde edildiğinden numune

daha az gözenekliliğe sahip olmaktadır. Yapılan literatür araştırmasından (Tunay ve ark., 2002) da bilindiği üzere gözenek miktarının düşük olması toz metal malzemenin mekanik özelliklerine pozitif yönde etki etmektedir. En düşük aşınma kaybı 60 dakika sinterleme süresinde ve 1200°C sinterleme sıcaklığında üretilen numunelerde elde edilmiştir.

Şekil 4.28 ve 4.29’de 60 dakika sinterleme süresinde sırasıyla 1150°C ve 1200°C sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunelerin aşınma değerlerinin soğuk presleme basıncına göre değişimi verilmiştir.

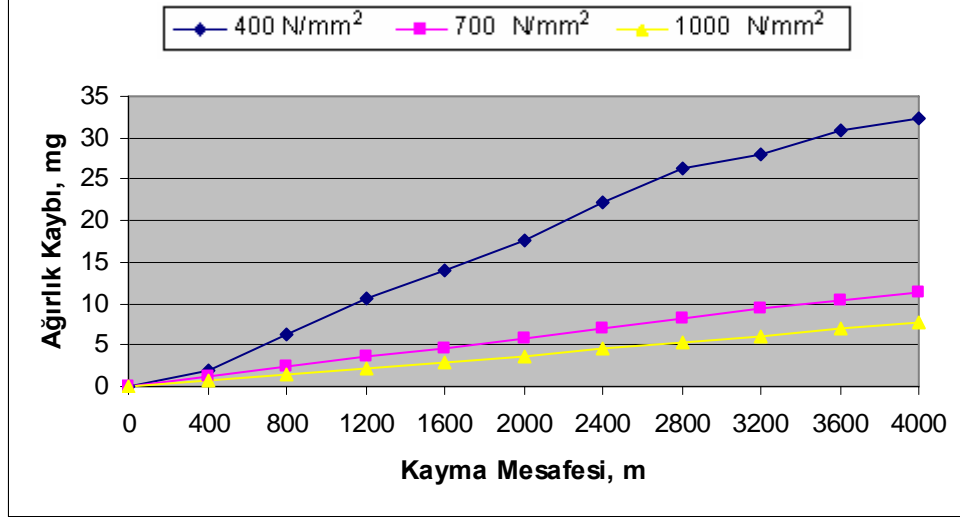


Şekil 4.28 1150°C sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunenin aşınma kayıplarının soğuk presleme basınçlarına bağlı olarak değişimi

Şekil 4.28’den görüleceği üzere soğuk presleme basıncı arttıkça aşınma kayıplarında düşüş olmaktadır. Kayma mesafesinin artması ile 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş toz metal numunenin ağırlığındaki kayıplar kayma mesafesi ile yaklaşık doğrusal olarak artmaktadır. 700 ve 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş toz metal numunelerinin ağırlık kayıpları 400 N/mm<sup>2</sup>’da üretilenlere göre daha düşük olmuştur. Zira bu soğuk presleme basınçlarında (700 ve 1000 N/mm<sup>2</sup>) üretilen toz metal numuneler daha düşük gözenekliliğe ve daha yüksek yoğunluğa sahip olmaktadır. Ayrıca bu numunelerde



kayma mesafesinin artmasıyla ağırlık kaybı artışı düşmektedir. Bu da aşınma direncinin arttığını göstermektedir.



Şekil 4.29 1200°C sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunenin aşınma kayıplarının soğuk presleme basınçlarına bağlı olarak değişimi

Şekil 4.29’da 1200°C sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde sinterlenmiş Fe-Cu-C toz metal numunenin ağırlık kayıplarına soğuk presleme basıncının etkisi verilmiştir. 700 N/mm<sup>2</sup> ve 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş numunelerin ağırlık kayıpları 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş numuneye göre oldukça düşüktür.

Kuru sürtünme ortamında ağırlık kaybının en düşük değerleri, 1200°C sinterleme sıcaklığında, 60 dakika sinterleme süresinde, 700 ve 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basınçlarında elde edilmiştir.

### 4.3 Metalografik Muayene

Sinterleme fırınında uygulanan difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilmiş toz metal parçalardan metalografik muayene için hazırlanan numuneler zımparalama ve parlatma işleminden sonra %2’lik nitrik asitli etil alkol ile dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra numunelerdeki birleşme bölgesi (kaynak bölgesi), Metkon IMM

901 Optik Metal Mikroskobu kullanılarak ve 400 büyütme optik mercek altında incelenmiştir.

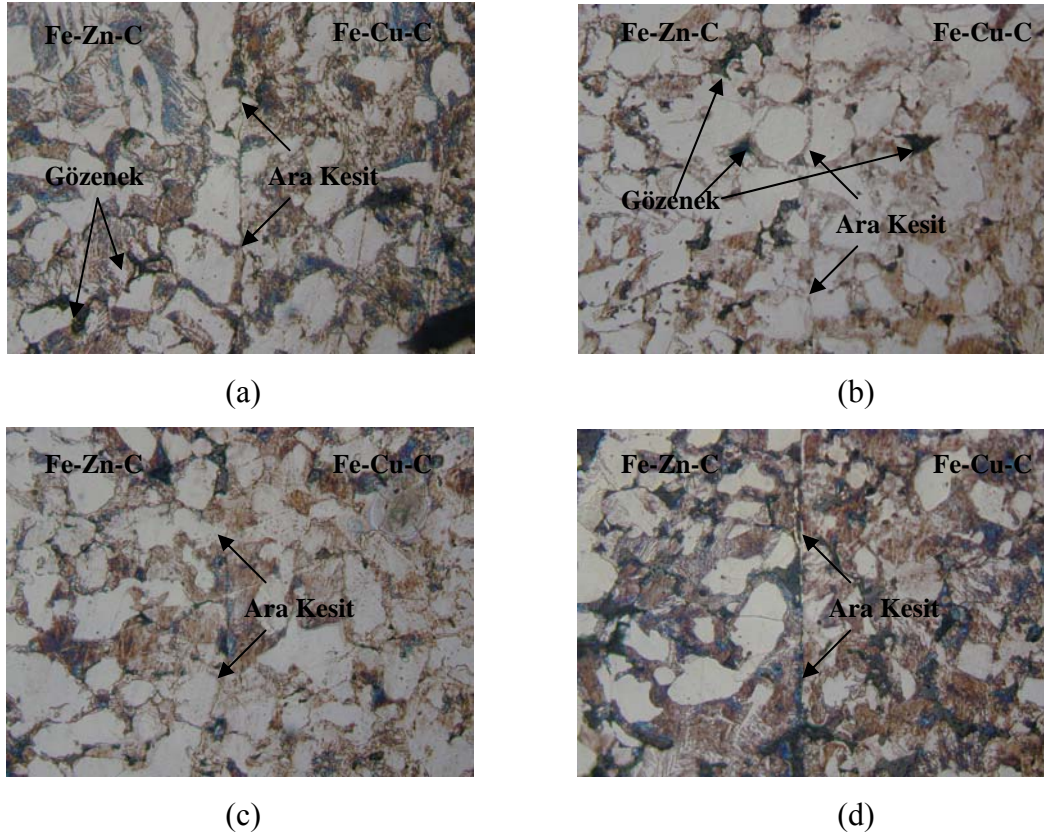
Metalografik incelemelerde numunelerdeki gözenek dağılımı, şekli, büyüklüğü ve toz tanelerinin şekli, büyüklüğü birbirlerine göre durumu görülebilmektedir. Yapıda olan gözeneklerin miktarı, şekli ve büyüklüğü toz metal parçaların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Gözenek miktarının azalması mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlayacağından, söz konusu gözenekleri azaltmak için çeşitli işlemler uygulanmaktadır. Yapılan metalografik muayenede tüm toz metal numunelerin yapısının ferrit ve perlitten oluştuğu tespit edilmiştir. Bazı numunelerde kaba perlitin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarakta bu toz metal parçanın sertlik değeri daha yüksek olmaktadır. Genel olarak Cu atomları perlit içerisine sızarak iyi bir bağ oluşturmuş olmasına karşın, bazı bölgelerde bakır yığılmasının olduğu da metalografik muayene sonucu tespit edilmiştir.

Metalografik incelemede, genel olarak soğuk presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi değerlerinin artması ile mekanik özelliklerin iyileştiği görülmektedir. Sıcaklığın yükselmesiyle keskin köşeli gözenekler küresel şekil almışlardır.

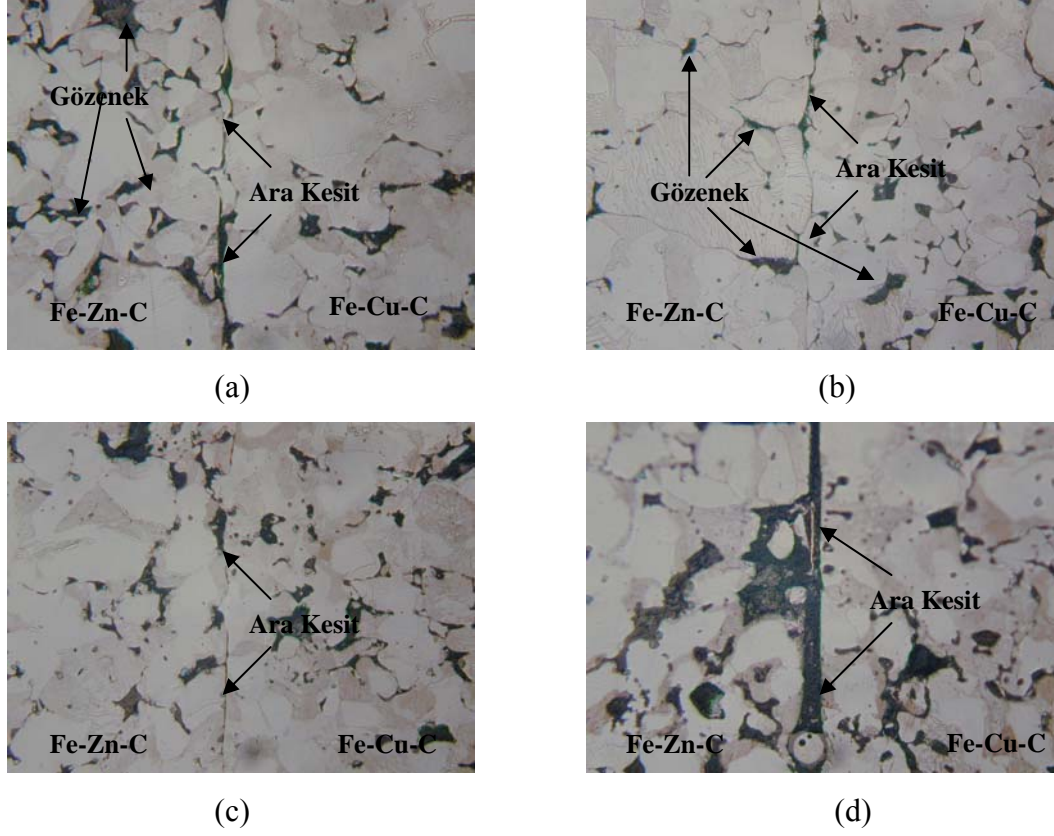
400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş tüm toz metal parçaların difüzyon kaynağında yeterli difüzyonun olmadığı metalografik incelemeler sonucu tespit edilmiştir. Difüzyon prosesinin yeterli olmamasındaki en önemli etken yapının yüksek gözenekliliğe sahip olmasıdır.

400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında 1050, 1100, 1150 ve 1200°C sinterleme sıcaklıklarında ve 30, 60, 90 dakika sinterleme sürelerinde elde edilmiş toz metal numunelerin kaynaklı birleştirme bölgelerini incelediğimizde yapıda çok sayıda gözenek olduğu görülmüştür. Sinterleme işlemi öncesi kaynağı yapılacak her iki toz metal parçaların (Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C) içerisindeki gözenek miktarı yaklaşık olarak %24 mertebesinde dir. Bunun anlamı toz metal parçaların yüksek gözenekliliğe sahip olduğudur. Yapıdaki bu yüksek miktardaki gözenek sebebiyle sinterlenme ve difüzyon kaynağı sırasında birleştirmede önemli bir yere sahip olan Cu'nun bir kısmı gözenekleri doldurmakta ve birleşme bölgesine çok az miktardaki

bakır difüze olmaktadır. Bu durum, numunelere uygulanan SEM (Scanning Electron Microscopy) analizinde de görülmektedir (Paragraf 4.6). Gözenek miktarının yüksek olması birleşme işlemine negatif yönde etki etmektedir. 1050<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında ve 30 dakika sinterleme süresinde birleştirilmiş toz metal numunelerde düzensiz şekilli ve keskin köşeli gözeneklerin olduğu görülmüştür (Şekil 4.30). Kaynak süresi arttıkça gözeneklerin boyutları küçülmekte ve gözenekler küresel bir şekle dönüşmektedirler. Bu da mekanik özelliklerin iyileşmesine olumlu yönde etki etmektedir (Şekil 4.30-Şekil 4.32). Sinterleme sıcaklığının yükselmesiyle yapıdaki gözenek miktarlarında azalmanın olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında sıcaklığın artmasıyla Cu atomları yapıda mevcut olan perlit taneleri içerisine yerleşmiştir. Cu'ın perlit taneleri içerisinde çözünmesi ise sertlik değerlerini (mekanik mukavemeti) artırmaktadır.



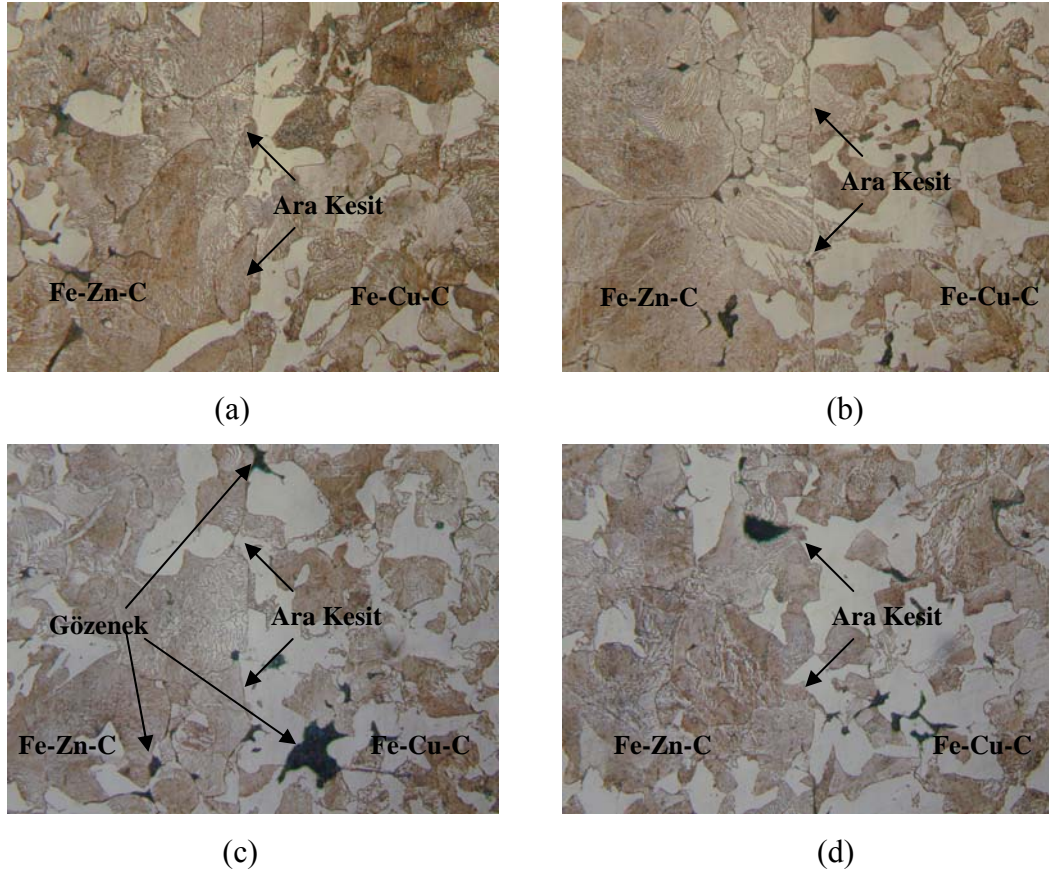
Şekil 4.30 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1050<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında ve 30 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi ( $\times 400$ ); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta



Şekil 4.31 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1050<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında ve 90 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi (×400); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta

Şekil 4.32’de 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanan numunelerin birleşme bölgesinin birleşme yüzeyinden başlayarak belirli aralıklarda çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 karşılaştırıldığında görüleceği üzere gözeneklerin miktarı sinterleme sıcaklığının artmasıyla düşmekte olup, boyutları da küçülmüştür. Fakat bazı bölgelerde büyük boyutta gözeneklerin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.32 c). Bu numunelerde yüksek sinterleme sıcaklığı ve süresinden dolayı toz metal parçaların birleşme ara yüzeylerinde difüzyon işlemi gerçekleşmiştir. Ancak, toz metal parçaların yüksek gözenek miktarına sahip olmasından dolayı ara kesitteki birleşme çizgisi tamamen ortadan kalkmamıştır. Bunun da nedeni, yüksek sıcaklıkta difüze olan elementlerin (Cu’ın) gözeneklere yerleşmesi, birleşme hattına gelmeyiştir.

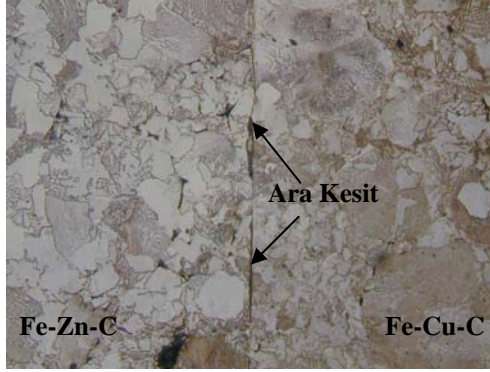




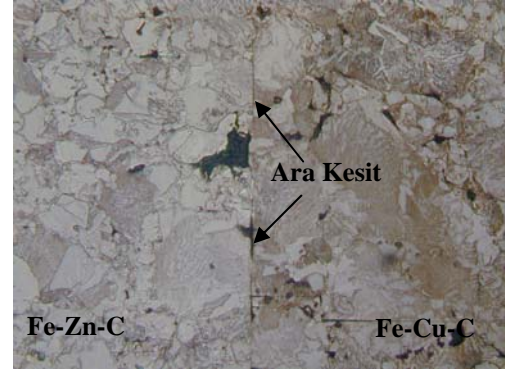
Şekil 4.32 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1200°C sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi ( $\times 400$ ); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta

700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş ve difüzyon kaynağı işlemi uygulanan toz metal parçaların birleşme bölgeleri metalografik olarak incelendiğinde, yapının 400 N/mm<sup>2</sup>'dakinine göre daha az gözeneğe sahip olduğu tespit edilmiştir. 1050°C sinterleme sıcaklığında ve 30 dakika sinterleme süresinde gözenekler keskin köşelere sahipken (Şekil 4.33) sıcaklığın ve sinterleme süresinin artmasıyla keskin köşeler küresel şekle dönüşmüşlerdir. Sinterleme süresinin yükselmesiyle yapıda meydana gelen perlitin inceden kabaya doğru değiştiği görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının 1050°C değerinde katı hal difüzyonu söz konusu olduğundan birleşme bölgesinde yeterli birleşme sağlanamamıştır. Kaynak ara kesitindeki bazı bölgelerde birleşme (Şekil 4.33 c ve d) olsa da, birleşme bölgesinin büyük çoğunluğunda birleşme işlemi gerçekleşmemiştir. Şekil 4.33'den görüldüğü gibi, bu sıcaklık ve sürede Fe-Cu-C toz metal parça bileşiminde bulunan

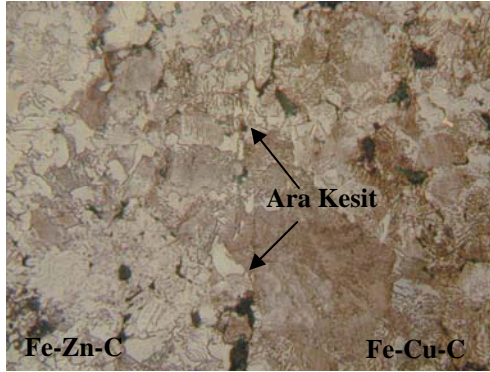
Cu atomları tam difüzyona uğramamış, yer yer Cu yığılmaları oluşmuştur. 1050°C sinterleme sıcaklığı sabit tutulup, sinterleme süresi artırıldığında yapıda mevcut olan gözenekler küresel şekle dönüşmekte ve Cu yığılmaları azalmaktadır (Şekil 4.34). Yine şekil 4.34’de görüldüğü gibi yapıda meydana gelen perlit kaba perlitlidir. Sonuç olarak sıcaklığın yükselmesiyle toz metal parçalarda birleşmenin daha iyi olduğu görülmektedir.



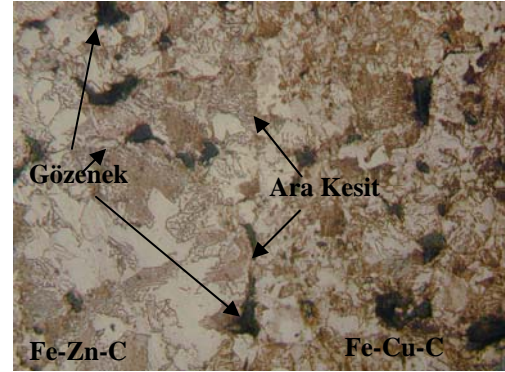
(a)



(b)

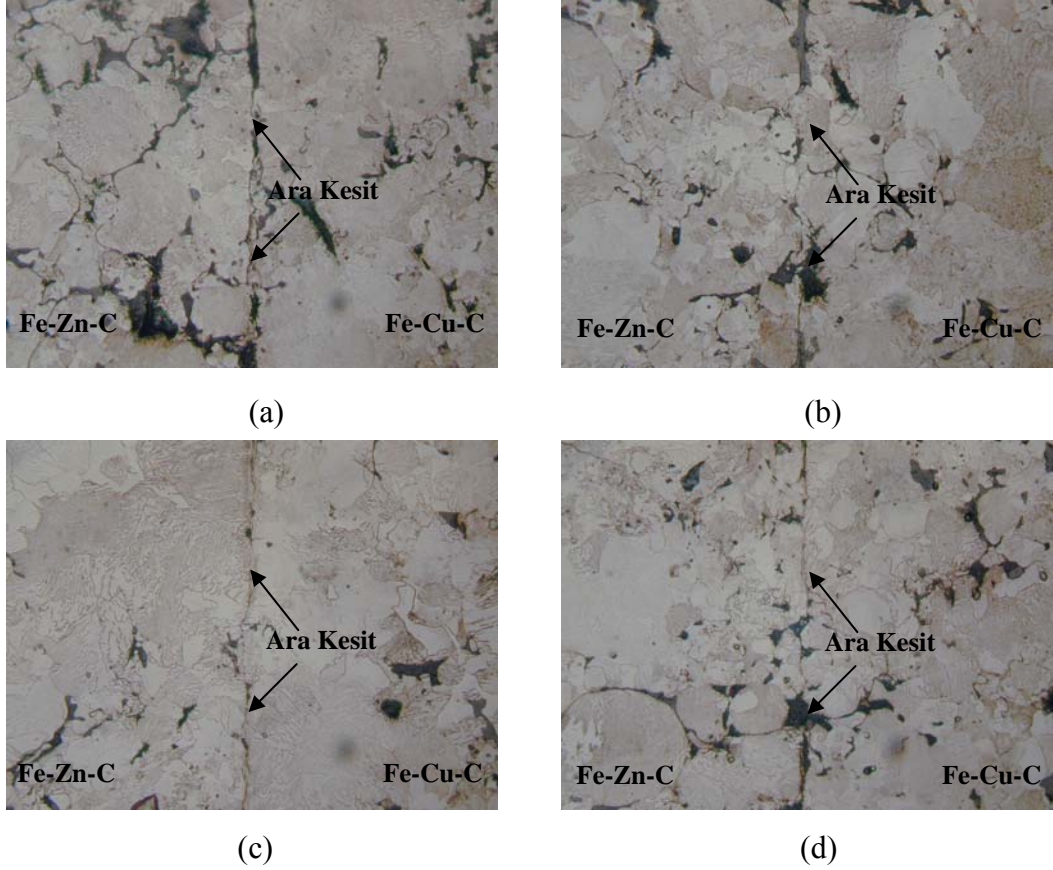


(c)



(d)

Şekil 4.33 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1050°C sinterleme sıcaklığında ve 30 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi ( $\times 400$ ); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta



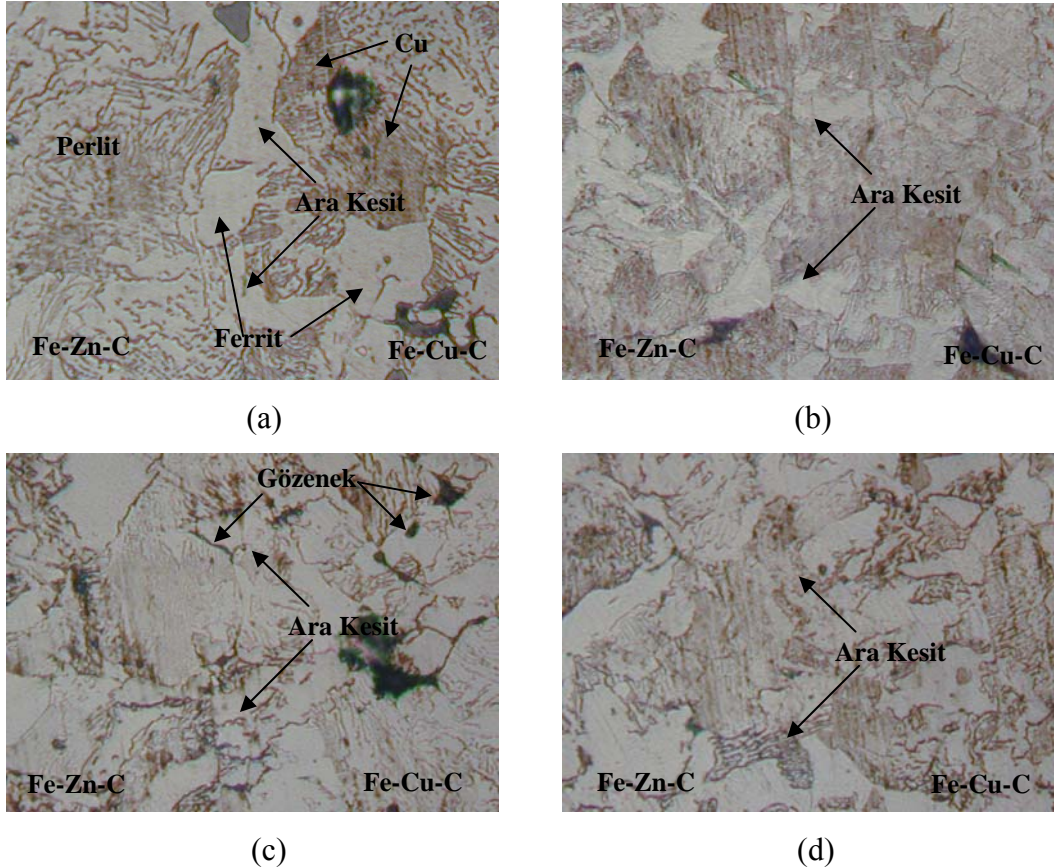
Şekil 4.34 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1050°C sinterleme sıcaklığında ve 90 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi (×400); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta

700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1100°C sinterleme sıcaklığında ve değişik sinterleme sürelerinde uygulanan difüzyon kaynağı işleminde toz metal numunelerde birleşme meydana gelmiş, ancak, bazı bölgelerde boşluklar olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, buradaki sinterleme sıcaklığının birleşmenin tam olarak gerçekleşmesi için yeterli olmadığıdır. Düşük sinterleme süresinde Cu yığılmaları oluşmuş, sürenin yükselmesiyle bu yığılmalarda azalmanın olduğu görülmüştür.

Özellikle 1150 ve 1200°C sinterleme sıcaklıklarının karışımında bulunan Cu'nun ergime sıcaklığının üzerinde olmalarından dolayı, sıvı hal difüzyonu söz konusu olduğundan, bu sıcaklıklarda gerçekleştirilen difüzyon kaynak işleminde birleşme bölgesinde yeterli birleşmenin meydana geldiği görülmektedir. 1150 ve 1200°C sinterleme sıcaklıklarında tamamen sıvı fazda bulunan Cu atomları Fe-C alaşımının tane sınırlarında yerleşmiştir. Fe-C alaşımının tane sınırlarında yerleşen Cu



atomlarının büyük kısmının perlitik taneler içerisinde yer almasının yanında, az bir kısmının da ferrit taneleri içerisinde yer aldığı görülmektedir. Şekil 4.35'de 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1150°C sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağına tabi tutulmuş toz metal parçaların birleşme bölgesinin farklı aralıklarla görüntüsü verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere kaynakta yeterli bir birleşme meydana gelmiş ve ara kesit boyunca her hangi bir boşluk ve çatlak oluşmamıştır. Burada yapının perlit ve ferritten oluştuğu görülmektedir. Cu atomları perlit taneleri içerisine yayılarak, aralarda kahverengimsi bir renk oluşturmaktadır. Perlitik yapı içerisine sızan Cu sayesinde toz metal numunenin mekanik özellikleri iyileşmektedir. Ayrıca Fe-Cu-C toz metal parça bileşiminde bulunan Cu'nun Fe-Zn-C toz metal parçaya difüze olduğu ve bunun sonucunda iyi bir birleşmenin elde edildiği görülmektedir. Bu durum mekanik deney sonuçları ile uyum içindedir (Şekil 4.3).

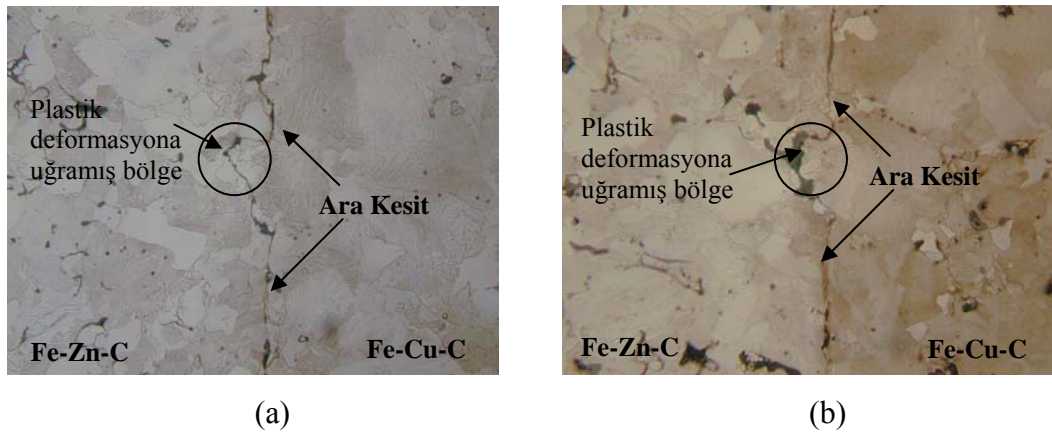


Şekil 4.35 700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1150°C sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi ( $\times 400$ ); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta



700 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı, 1200°C sinterleme sıcaklığında, 30 ve 60 dakika sinterleme sürelerinde toz metal parçalarda iyi bir birleşme elde edilmiştir. Yapı perlit ve ferritten oluşmuş olup, Cu atomları Fe-C alaşımı taneleri içerisinde yerleşmiştir. Birleşme bölgesinde perlitin yüzdesi daha fazladır. Bu da birleşmenin mekanik özelliklerinin yüksek olması anlamına gelmektedir.

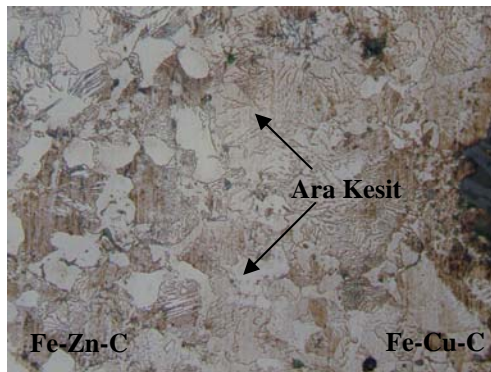
1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında ve 1050°C sinterleme sıcaklığı ve değişik sinterleme sürelerinde yapılmış difüzyon kaynağında sinterleme süresinin düşük değerlerinde birleşmenin yeterli olmadığı görülmüştür. Sinterleme süresinin yükselmesiyle birleşmenin iyileştiği görülmüştür. Ancak sıcaklığın sinterleme için yeterli olmamasından dolayı bu değerlerde birleşme bölgesinde tam bir difüzyon elde edilememiştir. Sıcaklık değeri 1100°C'ye yükseldiğinde difüzyonun iyileştiği yapılan metalografik incelemelerle tespit edilmiştir. Sinterleme süresinin artması da iki toz metal parçanın ara yüzeylerinde birleşmenin gerçekleşmesine olumlu yönde etki etmiştir. 90 dakika sinterleme süresinde toz metal parçaların temas yüzeylerinde bazı bölgelerde birleşmenin meydana gelmediği, ancak, bu bölgelerde plastik deformasyonun meydana geldiği görülmüştür (şekil 4.36). Bu da, 1100°C sıcaklığın difüzyon kaynağının gerçekleşmesinde yetersiz olmasından ve sinterleme süresinin uzun olmasından kaynaklanmaktadır. Zira sıcak basınç kaynağı yöntemlerinde ve difüzyon kaynağında birleşmenin gerçekleşebilmesi için basınç, sıcaklık ve zamanın optimum bir noktada birleşmeleri gerekmektedir (Karadeniz, 1984)



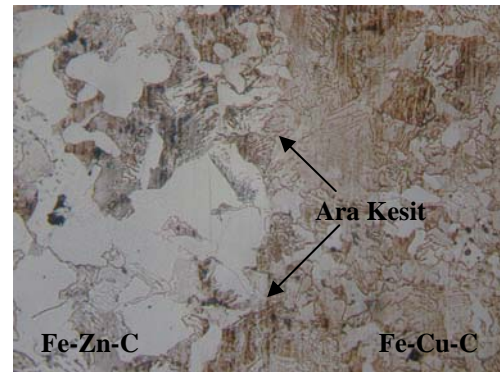
Şekil 4.36 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1000°C sinterleme sıcaklığında ve 90 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgelerinde meydana gelen plastik deformasyon ( $\times 400$ ).

Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C toz metal parçalara uygulanan difüzyon kaynağında en iyi kaynak birleşmesinin  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında,  $1150$  ve  $1200^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklıklarında elde edildiği yapılan metalografik incelemelerle tespit edilmiştir. Bu sıcaklık değerlerinde ve her üç sinterleme süresinde yapılan kaynaklarda ara yüzeyler boyunca boşluk ve çatlak gibi süreksizlikler meydana gelmemiştir.  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında elde edilmiş numuneler yüksek yoğunluğa ve düşük gözenek miktarına sahip olduklarından ve sinterleme sıcaklığının yeterli olmasından birleşme olumlu yönde etkilenmiştir.

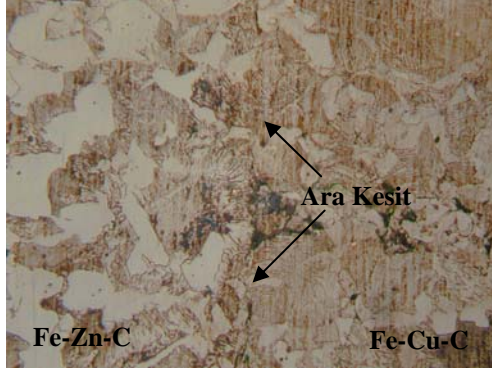
Şekil 4.37'de  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında,  $1150^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklığında ve 30 dakika sinterleme süresinde birleştirilmiş toz metal parçaların birleşme bölgeleri belirli aralıklarla görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere, birleştirilen toz metal parçaların temas yüzeylerindeki ara kesitler tamamen ortadan kalkmıştır. Yapı perlit ve ferritten oluşmuş ve Cu atomları Fe-C alaşımının tane sınırlarını doldurmuştur. Şekil 4.38'de ise aynı soğuk presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığı ve 90 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı işlemi uygulanmış toz metal parçaların birleşme bölgesinden belirli aralıklarla çekilmiş fotoğrafları verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere, birleştirilen toz metal parçaların temas yüzeylerindeki ara kesitler tamamen kaybolmuştur. Bazı bölgelerde büyük boyutlu gözenekler olduğu görülmektedir (şekil 4.38 a.). Bu büyük gözeneklerin oluşmasının nedeni, bu numunelerde sinterleme süresinin uzun olması dolayısıyla küçük boyutlu gözeneklerin yüksek sıcaklığın da etkisiyle bir araya toplanarak büyümesidir. Bu numunelerde de iç yapının perlit ve ferritten oluştuğu görülmektedir.



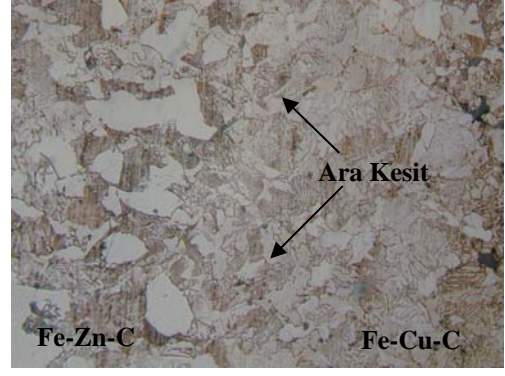
(a)



(b)

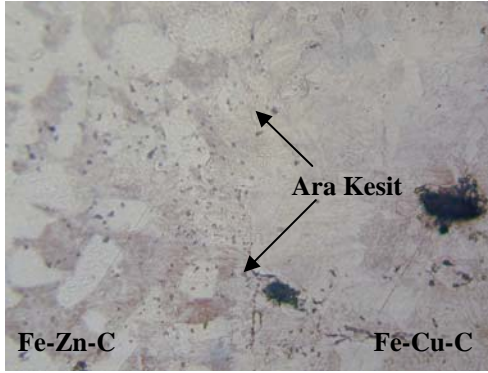


(c)

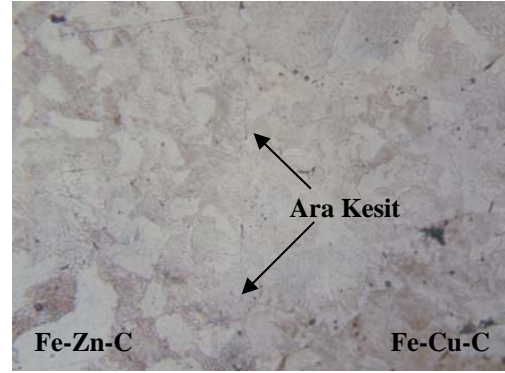


(d)

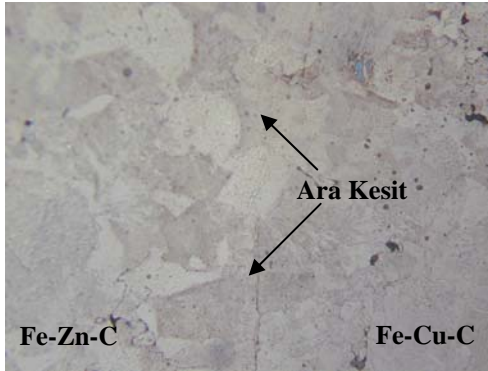
Şekil 4.37 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1150<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında ve 30 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi ( $\times 400$ ); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta



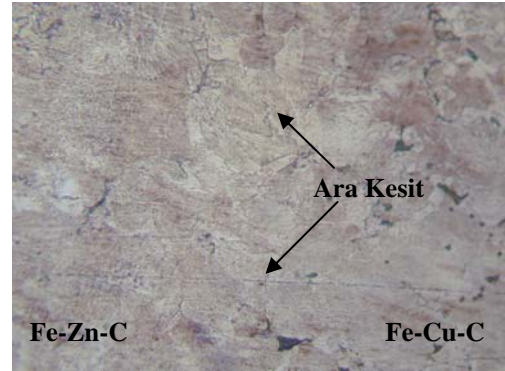
(a)



(b)



(c)



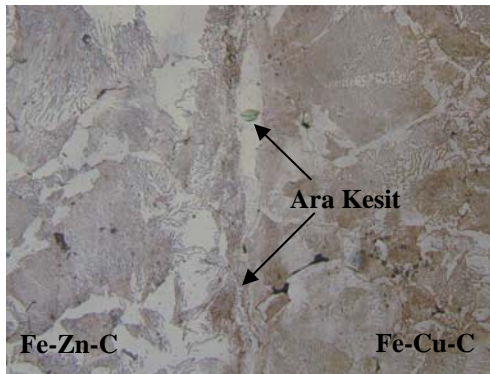
(d)

Şekil 4.38 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1150<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında ve 90 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi ( $\times 400$ ); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta

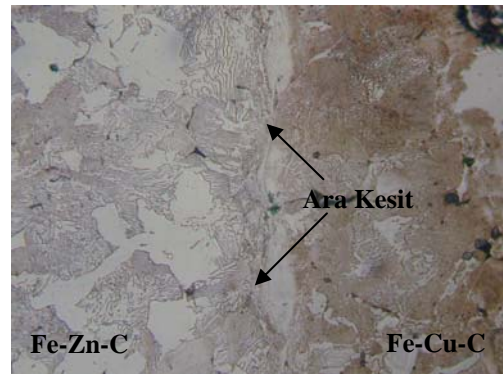


Şekil 4.39 ve şekil 4.40'da  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncı,  $1200^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklığında ve sırasıyla 30, 60 dakika sinterleme sürelerinde difüzyon kaynağı uygulanmış toz metal parçaların kaynaklı birleştirme bölgelerinden belirli aralıklarla çekilmiş iç yapı fotoğrafları verilmiştir. Her iki şekilden görüleceği üzere birleşme bölgesindeki ara kesitler tamamen ortadan kalkmıştır. Şekil 4.39'de verilmiş iç yapı fotoğrafından görüleceği üzere 30 dakika sinterleme süresinde kaynaklı birleştirmenin yapısı çoğunluk olarak ferritiktir. Diğer bölgelerde ise perlit yüzdesinin daha fazla olduğu görülmektedir.

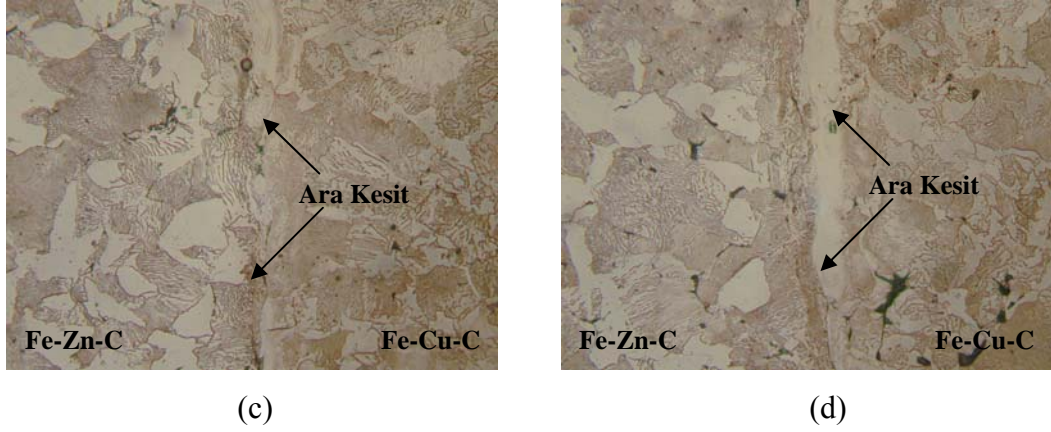
$1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında elde edilmiş toz metal parçalara  $1200^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde sinterleme fırını içerisinde uygulanan difüzyon kaynağında kaynaklı birleştirme bölgesindeki iç yapı tamamen perlitten oluşmaktadır (Şekil 4.40). Kaynak bölgesinden uzaklaştıkça yapı perlit ve ferritin karışımından oluşmaktadır. İç silindirik parça toz bileşiminde bulunan Cu atomları ise Fe-C alaşımının taneleri içerisine yayılmış olarak, kahverengi şeklinde görülmektedir. Yapıda perlit yüzdesinin fazla olması ve bu perlit taneleri içerisine yayılan Cu atomları sayesinde toz metal parçaların ve kaynaklı birleştirmenin mekanik özellikleri iyileşmektedir (Şekil 4.4, Şekil 4.18 ve Şekil 4.29). Cu atomlarının Fe-Cu-C toz metal parçadan Fe-Zn-C toz metal parçaya difüzyonu yapılan SEM (Scanning Electron Microscopy) analizinde de görülmektedir (Paragraf 4.4) (Şekil 4.43).



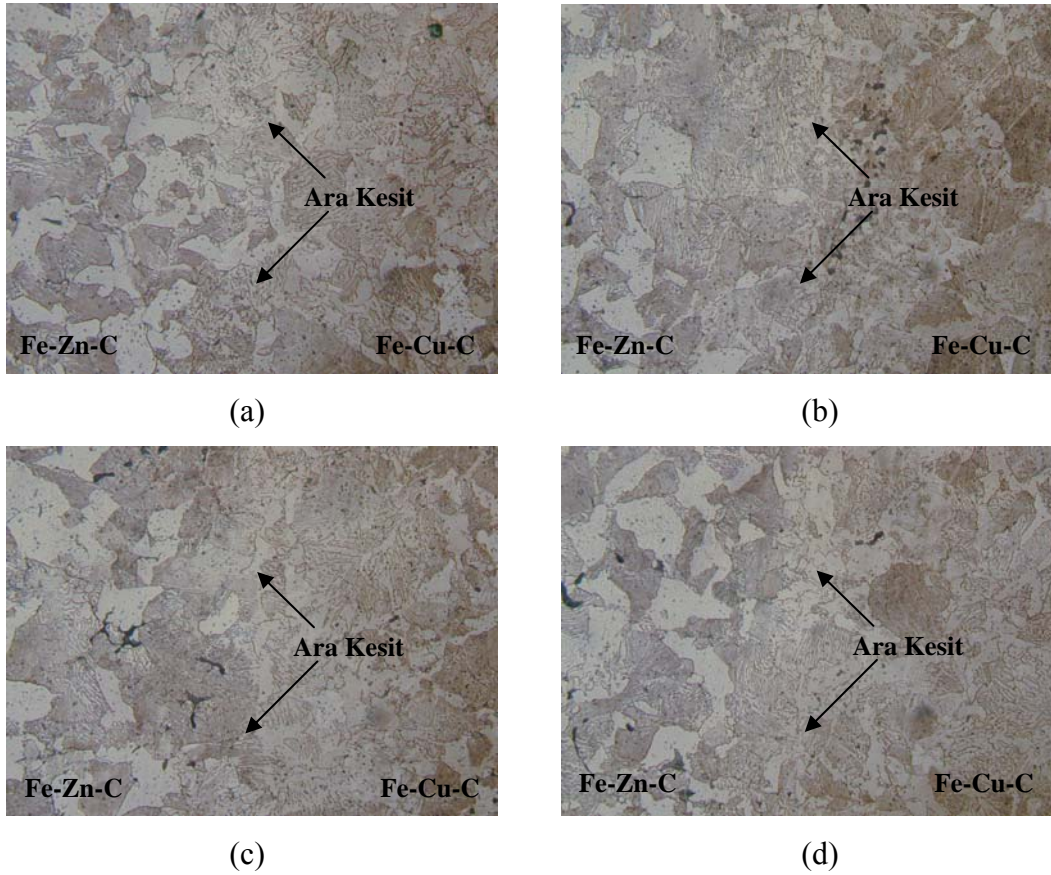
(a)



(b)



Şekil 4.39  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında,  $1200^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklığında ve 30 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi ( $\times 400$ ); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta



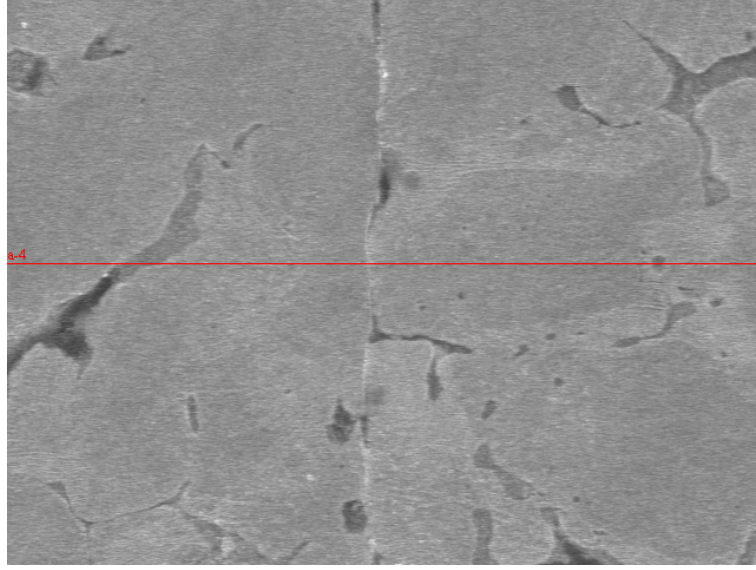
Şekil 4.40  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında,  $1200^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı uygulanmış numunelerin birleşme bölgesi ( $\times 400$ ); birleşme yüzeyinin üst tarafından aşağıya doğru yaklaşık olarak (a) 2mm, (b) 6mm, (c) 10mm, (d) 14mm uzakta

#### 4.4 SEM (Scanning Electron Microscopy) Analizi

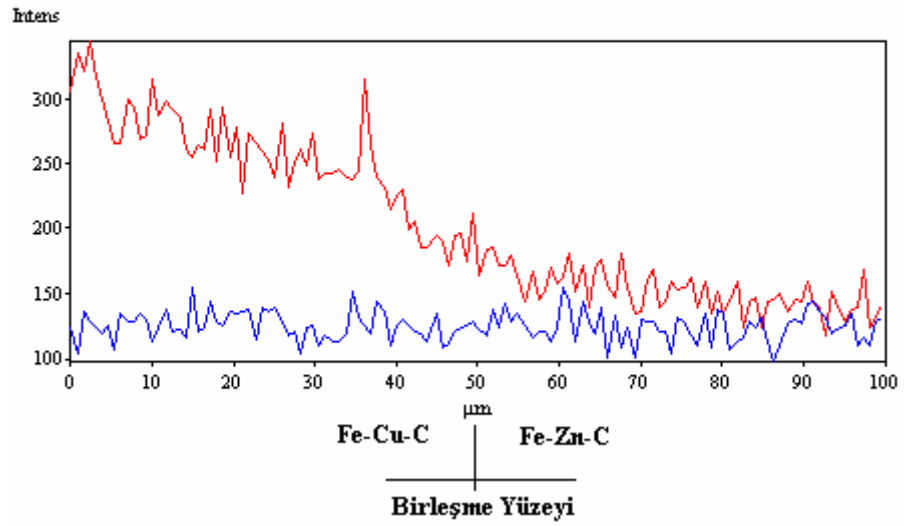
Şekil 4.41 ile 4.43 arasındaki şekillerde değişik presleme basınçları, sinterleme sıcaklıkları ve 60 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağı işlemi uygulanmış toz metal parçaların birleşme bölgesinde yapılmış SEM (Scanning Electron Microscopy) analizi sonuçları verilmiştir. 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı değerinde üretilmiş toz metal parçalara 1050°C sinterleme sıcaklığında uygulanan difüzyon kaynağında kaynaklı birleştirmenin hat analizi (line analyse) incelendiğinde Cu'nun Fe-Zn-C toz metal parçaya nifüziyetinin çok düşük yoğunlukta olduğu görülmektedir (Şekil 4.41). Hatta birleşme bölgesinin hemen bitiminde Cu difüzyonunun kayda alınmayacak kadar düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4.41'de birleşme yüzeyinden itibaren Cu ve Zn dağılımları incelendiğinde, Zn atomlarının her iki parçada yaklaşık eşit dağılım gösterdiği görülmektedir. Ancak Cu atomlarının dağılımında bölgesel farklılıklar vardır. Fe-Cu-C toz metal parça tarafında yüksek oranda Cu olmasına rağmen birleşme yüzeyine yakın bölgelerde Cu oranı daha düşüktür. Cu atomlarının yeterince difüz olmadığı belirlenmiştir. Bu durum literatürde verilen (Tabata ve ark. 1989) sonuçlarla uyum içindedir. Bunun nedeni, bu soğuk presleme basıncında elde edilmiş toz metal numunelerinin yüksek gözenekliliğe sahip olması ve sıcaklığın difüzyon işlemi için yetersiz olmasıdır.

1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş olan toz metal parçalara 1050°C sinterleme sıcaklığında uygulanan difüzyon kaynağında, kaynaklı birleştirmenin hat analizi (line analyse) incelendiğinde Cu'nun Fe-Zn-C toz metal parçaya nifüziyetinin 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş numunelere göre daha iyi olduğu görülmektedir (Şekil 4.42). Burada soğuk preslemeyle elde edilmiş olan toz metal parçalar düşük gözenek miktarına ve yüksek yoğunluğa sahiptirler. Bu da Cu difüzyonuna olumlu olarak etki etmektedir. 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında üretilmiş numunelere 1050°C'de uygulanmış difüzyon kaynağında Cu atomları Fe-Zn-C toz metal malzemeye birleşme bölgesinden itibaren bir miktar difüze olduktan sonra, sinterleme sıcaklığının yetersiz olmasından dolayı difüzyon tam olarak gerçekleşmemiş ve difüzyon miktarında önemli şekilde bir düşüş olmuştur.

Ayrıca, sinterleme sıcaklığı yükseldikçe Cu'nun difüzyonunun iyileştiği görülmektedir. 1200°C sinterleme sıcaklığında birleştirilmiş toz metal parçaların hat analizi incelendiğinde Cu'nun Fe-Zn-C toz metal parçaya daha iyi difüze olduğu görülmektedir (Şekil 4.43). Şekilden görüldüğü gibi, Cu karşı parça içinde belirli bir uzaklığa kadar nifüz etmiş ve dolayısıyla Fe-Zn-C toz metal parçanın mekanik özelliklerinin yükselmesini sağlamıştır. Buradan da, soğuk presleme basıncının artması ve sinterleme sıcaklığının artmasının kaynaklı birleştirmede difüzyon işlemine olumlu olarak etki ettiği anlaşılmaktadır.

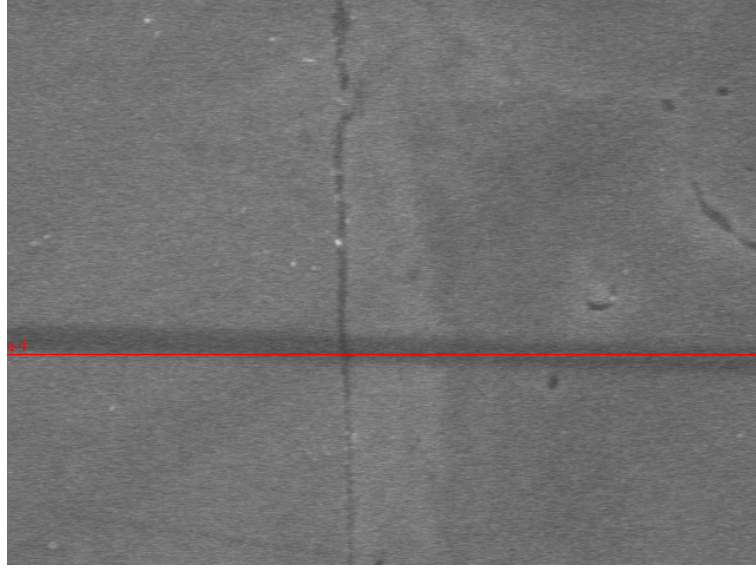


Linescans of **Cu** and **Zn**

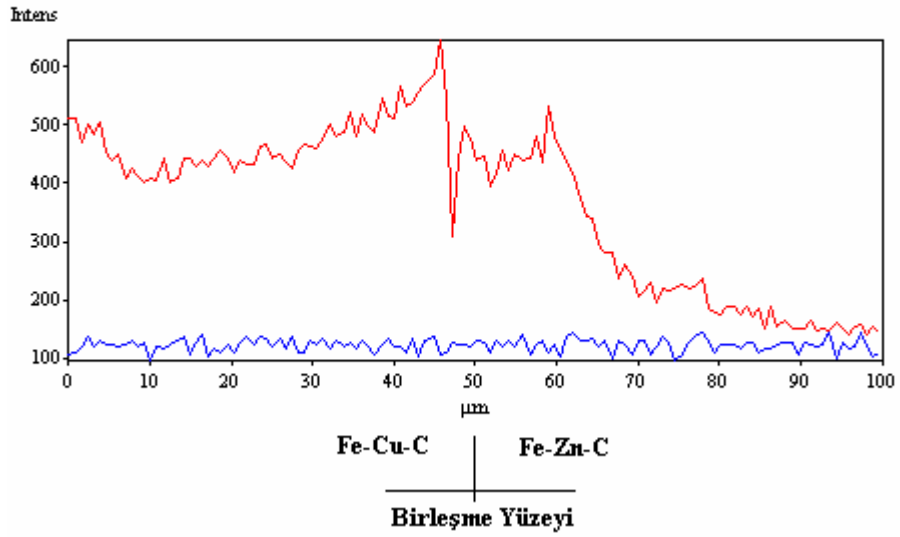


Şekil 4.41  $400 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında elde edilmiş toz metal parçaların  $1050^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklığı ve 60 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağıyla birleştirilmesinde, birleşme bölgesinin SEM analizi.

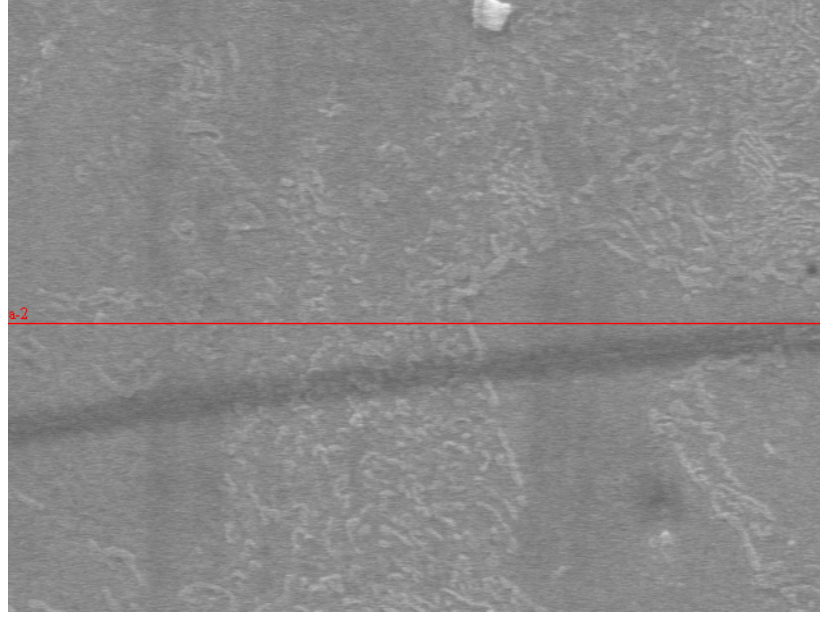




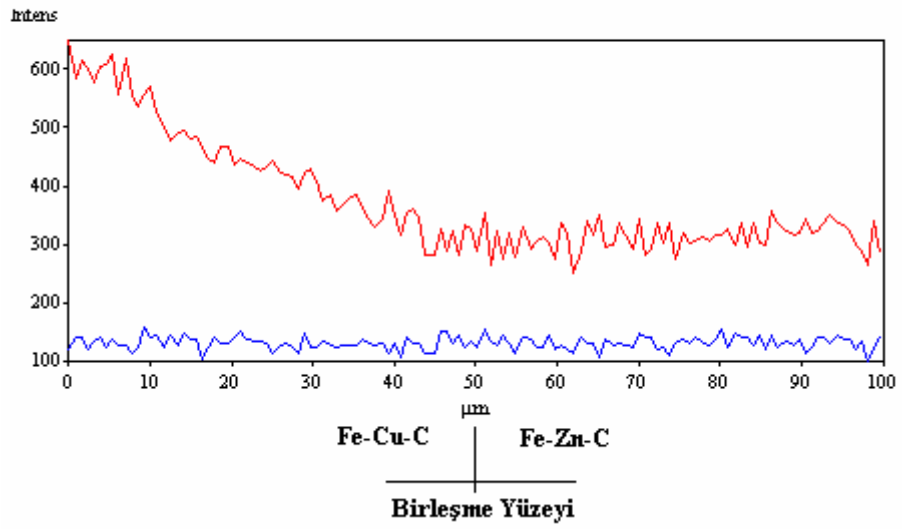
Linescans of **Cu** and **Zn**



Şekil 4.42 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında elde edilmiş toz metal parçaların 1050°C sinterleme sıcaklığı ve 60 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağıyla birleştirilmesinde, birleşme bölgesinin SEM analizi.



Linescans of **Cu** and **Zn**



Şekil 4.43 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında elde edilmiş toz metal parçaların 1200°C sinterleme sıcaklığı ve 60 dakika sinterleme süresinde difüzyon kaynağıyla birleştirilmesinde, birleşme bölgesinin SEM analizi.

## BÖLÜM BEŞ

### SONUÇLAR

#### 5.1 Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı; halen dökme demirden elde edilen döner rotorlu hermetik rotasyon kompresör gövdesinin, toz metalürjisi ve difüzyon kaynağı yöntemleri kullanarak imalatının yapılması ve bu imalat için bu üretim yöntemleri parametrelerinin optimizasyonunu yapmaktır. Karmaşık bir şekle sahip olan kompresör gövdesi iki parça şeklinde soğuk olarak preslendikten sonra, normal geçme olarak montaj edilmiş (şekil 4.1) ve ardından sinterleme fırını içerisinde hem sinterleme ve hem de difüzyon kaynağı işlemlerinin aynı anda yapılması sağlanmıştır. Elde edilen numunelerin mekanik özellikleri ve iç yapıları çeşitli deneyler yapılarak incelenmiştir.

Toz metalürjisi ve difüzyon kaynağı uygulanarak elde edilmiş numunelerin, iki yönde (alt ve üstte) hareketli presleme yöntemiyle yapılmış olan soğuk sıkıştırma işlemleri sonucunda, sıkıştırma basıncının toz metal numunelerin gözeneklilik yüzdesine ve yoğunluğuna etkisi, sinterlenmiş ve birleştirilmiş numunelerin mekanik özelliklerini etkileyen parametreler ve bu parametrelere bağlı olarak oluşacak iç yapılar incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Toz metal parçaların şekillendirilmesinde soğuk sıkıştırma basıncının, çok önemli olduğu, gözeneklilik ve ham yoğunluk parametrelerini çok etkilediği görülmüştür. 400, 700 ve 1000 N/mm<sup>2</sup> sıkıştırma basınçlarında sıkıştırma basıncının artmasıyla gözeneklilikte düşme ve yoğunlukta artış olduğu saptanmıştır. En yüksek gözeneklilik Fe-Cu-C toz metal parça için %23,2 ve Fe-Zn-C toz metal parça için ise %23,59 olarak 400 N/mm<sup>2</sup> sıkıştırma basıncında elde edilmiştir. 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında ham yoğunluk değerleri ise her iki toz metal numune için sırasıyla 6,02 g/cm<sup>3</sup> ve 5,96 g/cm<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. En düşük gözeneklilik ise Fe-Cu-C toz metal parça için %7,78 ve Fe-Zn-C toz metal malzeme için ise % 9,1 olarak 1000 N/mm<sup>2</sup> sıkıştırma

basıncında elde edilmiş olup, bu presleme basıncında ham yoğunluk değerleri ise her iki toz metal numune için sırasıyla  $7,23 \text{ g/cm}^3$  ve  $7,09 \text{ g/cm}^3$  olarak tespit edilmiştir.

2. Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C karışımından elde edilmiş gövde parçalarının difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi prosesinin tam ve doğru olarak işlenmesi için, boyutsal değişimler incelenmiştir. Boyutsal değişim sonuçları incelendiğinde, Fe-Cu-C toz metal parçaların dış ve iç çaplarında bir miktar genişleme olduğu tespit edilmiş olup, bu değer presleme basıncının artmasıyla orantılı olarak artmaktadır. İç ve dış çaplardaki en yüksek genişlemenin  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda Fe-Zn-C toz metal parçanın iç ve dış çaplarındaki büzülmenin de presleme basıncıyla orantılı olarak arttığı, en yüksek artışın  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncında olduğu görülmüştür. Sonuç olarak her iki toz metal parçada meydana gelen boyutsal değişim kaynaklı birleştirme zamanı temas yüzeylerinde difüzyon kaynağının gerçekleşmesi için gerekli olan basıncın oluşmasını sağlamış olurlar.
3. Kaynaklı birleştirmenin kesme mukavemetinin tespiti için yapılan basma deneyi sonuçları incelendiğinde, soğuk presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin artmasıyla birlikte kaynaklı birleşmenin kesme mukavemetinin yükseldiği tespit edilmiştir. Presleme basıncının düşük değerlerinde toz metalürjisi yöntemi ile elde edilmiş parçalar içerisinde olan yüksek gözeneklilik yüzdesi nedeniyle bu parçalara uygulanan sinterleme ve difüzyon kaynağı işlemi sonrası elde edilen numunelerde kaynaklı birleşmenin mukavemet değerleri düşük olmaktadır. Ayrıca sinterleme sıcaklığı ve sürelerinin düşük olmasından kaynaklanan, toz tane sınırları arasında oluşan zayıf bağlar ve keskin biçimli gözenekler nedeniyle mukavemet değeri düşük olmaktadır. Artan soğuk presleme basıncı ile toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen parçaların gözeneklilik yüzdesi azaldığı ve yoğunlukları arttığı için kaynaklı birleşmenin de kesme mukavemet değerlerinin arttığı görülmüştür. Yüksek sinterleme sıcaklığı ve sürelerinde toz tane sınırları arasında oluşan bağ kuvveti arttığından ve keskin köşeli gözenekler küresel şekil aldığından ve boyutları küçüldüğünden kaynaklı birleşmenin kesme mukavemeti değerlerinin de

yükseldiği görülmüştür. Yapılan incelemeler sonucunda en yüksek kesme mukavemeti, 61,88 N/mm<sup>2</sup>, 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncında, 1200°C sinterleme sıcaklığında ve 60 dakika sinterleme süresinde yapılan kaynaklardaki numunelerde elde edilmiştir.

4. Sertlik deneyleri sonucunda elde edilen sertlikler incelendiğinde, birleştirme işlemi uygulanmış numunelerde sertlik değerinin Fe-Cu-C toz metal parçada yüksek olduğu görülmüştür. Sertlik değerleri, sinterleme ve difüzyon kaynağı işlemi uygulanmış tüm numunelerde Fe-Cu-C toz metal parçadan başlayarak Fe-Zn-C toz metal parçaya doğru düşüş göstermektedir. Bu da Fe-Cu-C toz metal parçada olan Cu yüzdesinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak soğuk presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin artmasıyla sertlik değerlerinde de bir artış olmaktadır. Toz metalürjisi ve difüzyon kaynak yöntemleri ile elde edilen numunelerin yapılarında bulunan gözeneklerden dolayı sertlik ölçümü yapılan bazı bölgelerde sertlik değerlerinde ani iniş ve çıkışlar olmaktadır. Optimal sertlik değerleri, 700 N/mm<sup>2</sup> ve 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk sinterleme basınçlarında, 1150°C ve 1200°C sinterleme sıcaklıklarında ve 60 dakikalık sinterleme süresinde yapılan kaynaklarda gözlenmiştir.
5. Aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma kayıpları incelendiğinde, Fe-Cu-C toz metal malzemeden toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen parçanın aşınma kaybı, soğuk presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin artmasıyla birlikte düşmektedir. En fazla ağırlık kaybı 81,7 mg olarak, 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı, 1050°C sinterleme sıcaklığı ve 90 dakika sinterleme süresinde birleştirilen numunede olmuştur. Aşınma direncinin düşük olmasının nedeni, 400 N/mm<sup>2</sup> presleme basıncında elde edilen numunelerin yüksek gözenek yüzdesine sahip olması ve 1050°C sinterleme sıcaklığının sinterleme işlemi için yetersiz olmasıdır. 4 000 metre kayma mesafesi sonunda en düşük ağırlık kaybı, 7,7 mg olarak, 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı, 1200°C sinterleme sıcaklığı ve 60 dakika sinterleme süresinde yapılan kaynaklarda elde edilmiştir.
6. Yapılan çalışmada Fe-Cu-C ve Fe-Zn-C toz metal karışımlarından oluşan parçaların sinterleme fırını içerisinde sinterleme ve difüzyon kaynak işlemleri

uygulanarak elde edilmiş numunelerin kaynaklı birleştirme bölgeleri metalografik muayeneler sonucunda mikro yapıları incelendiğinde; kaynakların düşük presleme basıncında, sinterleme sıcaklığında ve kısa sinterleme sürelerinde gerçekleştirilmesi halinde, yapı içindeki boşlukların keskin köşeli ve düzensiz, yüksek oranda gözenekliğe sahip olduğu görülmüştür. Düşük presleme basıncında elde edilmiş parçaların yapılarının yüksek gözenekliliğe sahip olmasından dolayı birleştirme işleminde yeterli birleşme saptanamamaktadır. Ayrıca 1050<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığının birleştirme işleminin gerçekleştirilmesi için yeterli olmadığı görülmüştür. Sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığı arttıkça gözeneklerin miktarının azaldığı ve kaynaklı birleştirmenin kalitesinin de arttığı tespit edilmiştir. Özellikle 1150 ve 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklıklarında, bileşimde bulunan Cu'nun ergime sıcaklığının üzerine çıkılmasından dolayı Cu'nun sıvı hal difüzyonu söz konusu olduğundan, toz metal parçaların bu sıcaklıklarda gerçekleştirilen difüzyon kaynak işleminde birleşme bölgesinde yeterli birleşmenin meydana geldiği görülmektedir. 1150 ve 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklıklarında tamamen sıvı fazda bulunan Cu atomlarının Fe-C alaşımının tane sınırlarına yerleştiği görülmüştür. Yüksek presleme basınçları ve sinterleme sıcaklıklarında düşük gözenek miktarı ve Fe-C alaşımı taneleri içerisine yerleşen Cu'nun iyi bir bağ kuvveti oluşturmasından dolayı mekanik özellikler iyileşmektedir. 700 ve 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basınçlarında elde edilmiş toz metal numunelerin 1150 ve 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklıklarında, 30 ve 60 dakika sinterleme sürelerinde parçaların temas yüzeylerindeki arakesitin tamamen yok olduğu ve %100 birleşmenin sağlandığı görülmüştür.

7. SEM (Scanning Electron Microscopy) Analizi sonuçları incelendiğinde; 400 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı, 60 dakika sinterleme süresi ve 1050<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında sinterleme ve difüzyon kaynak işlemi uygulanmış numunelerin kaynaklı birleşme bölgelerinde Cu atomlarının Fe-Zn-C toz metal parçaya difüzyonu için yeterli şartların oluşmadığı görülmüştür. 1000 N/mm<sup>2</sup> soğuk presleme basıncı ve 1200<sup>o</sup>C sinterleme sıcaklığında Cu'nun difüzyonunun iyi olduğu tespit edilmiştir. Buradan da yüksek presleme basıncı ve yüksek

sinterleme sıcaklığının birleştirilen parçaların mikro yapı özelliklerine, dolayısıyla mekanik özelliklerine olumlu yönde etki ettiği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmada,  $1000 \text{ N/mm}^2$  soğuk presleme basıncı,  $1200^\circ\text{C}$  sinterleme sıcaklığı ve 60 dakika sinterleme süresi ile vakum altında yapılan sinterleme ve difüzyon kaynak işleminin optimum sonuç verdiği tespit edilmiştir.

**KAYNAKLAR**

- Altay M.C. ve Oktay E. (2006). Karbon ve bakır içeren demir tozlarının sinterleme sonrası özellikleri. *11. Denizli Malzeme Sempozyumu*, 19-21 Nisan, Denizli, s.748-754.
- Altay M.C. ve Oktay E. (2005). Bakır içeren demir tozlarının sinterlemesine fırın atmosferi ve karbon katkısının etkisi. *4. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 18-22 Mayıs, Sakarya, s.1111-1121.
- Ananthanarayanan V. (1988). Diffusion welding of an RS/PM aluminum alloy. *Ph.D. Thesis*, Ohio State University.
- Ateş, Durgutlu, Kurt ve Karacif, (2002). Toz metal demir malzemelerin örtülü elektrod ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi. *3. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 4-8 Eylül, Ankara, s.1199-1206.
- Atık E., Meriç C. ve Yavuz N. (2002). Demir esaslı T/M malzemelerin borlanması. *3. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 4-8 Eylül, Ankara, s. 1048-1053.
- Avcı A. U. (1993). Toz metalürjisi ders notları. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Babayev Y., Karadeniz S. ve Memmedov A. (2005). Fe-Cu karışımı toz malzemenin tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *3. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi*, 16-17 Eylül, Konya, s. 127-130.
- Bıkova A.V. (1991). Xolodilnie kompressorı, spravoçnik.
- Bishop D.P. (1998). Diffusion-based microalloying via reaction sintering. Ph.D. Thesis, Dalhousie University.
- Callister W. D. (2003). Materials science and engineering an introduction (6th edition). USA:Wiley International Edition.



- Çetiner C., Uslan İ. Ve Sarıtaş S. (2002). Toz metal bronz yatağın düşük karbonlu çeliğe difüzyon kaynağında mikroyapısal tespitler. *3. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 4-8 Eylül, s. 1322-1330.
- Çetinkaya Ş., Cumbul M. ve Oktay E. (2004). Ön alaşımli demir tozu ve bakır katkıli demir tozu kompaktlarına karbon ilavesinin sinterleme sonrası özelliklere etkisi. *10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi*, 14-16 Nisan, s. 288-295.
- Çetinkaya Ş. ve Oktay E. (2005). Ön alaşımli demir tozlarına karbon katkısının sinterleme sonrası mekanik özelliklere etkisi. *4. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 18-22 Mayıs, s.1130-1140.
- Ceyhun V., Uzkut M. ve Şahin S. (1996). Difüzyon kaynağı ve uygulamaları. *Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu*, 15-17 Mayıs, s. 178-186.
- Danninger H., Frauendienst G., Streb K. D. ve Ratzi R. (2001). Dissolution of different graphite grades during sintering of PM steels. *Materials Chemistry and Physics*, (67) 72-77.
- Demir A. ve Sarıtaş S. (1993). Toz metal çeliklerin mekanik özellikleri. *Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi* (7), 1-13.
- Demir A. (1992). Toz metal bir çeliğin mekanik özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Demyanenko V.L. ve Polikov V.N. (1998). Sostoyanie i perispektivı razvitiya poroşkovoy metallurgii v otrasli priborostroyaniya. *Pribori i şstvnu upravleniya*, (4) 27-28.
- Dixon R. (1984). Introduction to solid-state welding. American Society for Metals, Metals Handbook, 3 (9th Ed.), (141-142).
- Douib N., Mellanby I.J. & Moon J.R. (1989). Fatigue of inhomogeneous low alloy PM steels. *Journal of Powder Metallurgy*, 32(3) 209 - 212.

- Dutta I., Chen M. W., Peterson K. & Shultz T. (2001). Plastic Deformation and Interfacial Sliding in Al and Cu Thin Film: Si Substrate Systems due to Thermal Cycling. *J. Electron. Mater.* 1537.
- Ermakov S.S. (1991). Termičeskaya obrabotka poroškoviş stalnıx detaley. L.: LDNTP.
- Federçenko İ.M. ve Pugina L.İ. (1980). Kompozıçionnıe speçennıe antifrikçionnıe materialı. Kiev: Nauk
- German, R.M. (1997). Powder Metallurgy Science. Metal Powder (Second Edition) Industries Fedaration, Princeton NJ, ISBN 1-878954-42-3, p. 241-295.
- Goetzel C.G. (1984) "Infiltration", Metals Handbook, Ninth Edition, American Society for Metals, vol.7, p.558.
- Gülsoy H.Ö., Uçar M. ve Özcan E. (1999). Fe-Cu-C kompaktlarına katılan ilave C miktarının işlenebilirlik özelliklerine etkisi. 2. *Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, 15-17 Eylül, Ankara, s.475-482.
- Gülsoy H.Ö. ve Salman S. (1996). Fe-Cu kompaktlarına katılan farklı miktarlardaki grafit ilavelerinin sabit sinter sıcaklığı ve sabit sürelerde, mekanik özelliklere etkisi. 1. *Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, Ankara, 16-17 Eylül, s.559-566.
- Gülsoy Ö., Salman S. ve Koz M. (1997). T/M ile üretilen Fe-Cu kompaktlarında %2 ile %3 arasında değişen Cu'nın mekanik özelliklere etkisi, 7.ci *Denizli Malzeme Sempozyumu*, 2-4 Nisan, Denizli, s. 9-13.
- Güral A. ve Tekeli S. (2002). Mekanik alaşımlanmış Fe-Cu-C sisteminde çift fazlı yapı üretimine yönelik bir çalışma. 3. *Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 4-8 Eylül, Ankara, s.1016-1025.
- Karadeniz S. (1984). Baskı kaynağında birleşme mekanizması. 1. *Ulusal Kaynak Sempozyumu*, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Kırilov V.C. (1993). Raboçie proçessı v rotaçionnie kompressore s kotyaşimsya rotorom. *Xolodilnaya Texnika*, (4) 14-18.
- Klar E. & Fesko W.J. (1984). Gas and water atomization. *Metals Handbook*, 7 (9th Ed.), (25-39). American Society for Metals.
- Krishnardula V.G. (2006). Transient liquid phase bonding of ferritic oxide dispersion strengthened alloys. *Ph.D. Thesis*, Auburn University.
- Kurgan N. (2004). T/M paslanmaz çelik implantların üretimi ve teknolojik özellikleri üzerine bir araştırma. *Doktora tezi*, C.B.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Kurşungöz N. ve Kurşungöz H. (1996). Difüzyon kaynağı. *Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu*, İstanbul, 15-17 Mayıs, s. 203-211.
- Kurt A., Türker M., Aksoy M. ve Orhan N. (1998). Toz metal malzemenin düşük karbonlu çeliğe difüzyon kaynağında gözenekliliğin difüzyona etkisi. *2.ci Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu*, 3-5 Haziran, İstanbul, s. 130-137.
- Kurt A., Gülenç B. ve Türker M. (1996). Saf demir tozlarından sıkıştırılan T/M parçaların düşük karbonlu çeliğe MIG kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması. *1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, 16-17 Eylül, Ankara, s.595-602.
- Kurt A.O. (2006). Toz üretim yöntemleri ve sinterleme. Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Ders Notları, Sakarya.
- Kurt A. (1997). Katı hal birleştirmeler için difüzyon kaynağı. *Kaynak Teknolojisi 1. Ulusal Kongresi*, Ankara, 13-15 Kasım, s. 77-84.
- Laktek Y.M. ve Leonteva V.P. (1990). *Materialovedenie-M.: Maşinostroenie*, 495.
- Lame O., Bellet D., Michiel M. D. & Bouvard D. (2004). Bulk observation of metal powder sintering by X-ray synchrotron microtomography, *Acta Materialia*, Vol 52(4), 977-984.

- Langrat P.G., Krilov A.S. ve Yadin E.V. (1974). Vısokoobratkie germetične rotaçionnie kompressorı. *Xolodilnaya Texnika*, (4) 4-8.
- Mahoney M.W. & Bampton C.C. (1984). Fundamentals of diffusion bonding. American Society for Metals, *Metals Handbook*, 3 (9th Ed.), (156-159).
- Menapace C., Molinari A., Bortolotti F. & Costa P. (2002). Effect of copper infiltration on Fe-based PM parts. 3. *Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 4-8 Eylül, Ankara, s. 355-362.
- Meriç C., Atik E. ve Türüdü T. (2005). Kaynakla birleştirilmiş demir esaslı toz metal parçaların kaynak bölgesinin incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, ISSN:1304-4141, (4) 1-11, [www.teknolojekarastirmalar.com](http://www.teknolojekarastirmalar.com)
- Meskin V.C. (1984). Osnovı leqirovaniya stali. Moskova: *Metallurgiya*.
- Narasimhan K.S. (2001). Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics* (67) 56-65.
- Narva V.K., Laşkareva N.C, Pavlov S.A. ve Bataşev K.V. (1988). Poluçenie i svakva poroşkovoy stali şx15 iz strujkovix otxodov. *Poroşkovaya Metallurgiya*, (8) 20-23.
- Onur A. ve Arslan F. (1996). Yağ atomizasyonu yöntemiyle alüminyum alaşımı ve kalay tozu üretimi. 1. *Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, 16-17 Eylül, Ankara, s.193-206.
- Ordenko V.B. (1987). Proizvodstvo i primeneniya izdeliy iz metalliçeskix poroikov. Kiev.
- Orhan N., Aksoy M. & Eroglu M. (1999). A new model for diffusion bonding and its application to duplex alloys. *Materials Science and Engineering* (A271) 458-468.

- Ozan S., Çaligülü U., Taşkin M., Gür A. K., Dikbaş H. ve Çay V.V. (2006). Sıcak Presleme Yöntemiyle İmal Edilmiş SiCp Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Difüzyon Kaynağında Sıcaklığın Birleşme Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *11. Denizli Malzeme Sempozyumu*, 19-21 Nisan, Denizli, s.233-236.
- Pakdil M. (2001). Difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Ti-alaşımlarının kırılma davranışlarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Antakya.
- Radomiselskiy İ.D., Serdyuk ve Şerban N.İ. (1985). Konstrüksionnie poroşkovie materialı. Kiev: Texnika.
- Radomiselskiy İ.D. (1985). Poroşkovie konstrüksionnie detali. Sovremennoe sostoyanie, perespektivnie razvitiya. *Poroşkovaya Metallurgiya*, (10) 37-41.
- Salak A. (1995). Ferrous powder metallurgy, ISBN:1898326037, Cambridge International Science Publishing, England.
- Salehi M.T. (1990). Isostatic diffusion bonding of some superplastic alloys. Ph.D. Thesis, UMIST. Manchester.
- Sarıtaş S. (1996). Bir titreşimli öğütücü imalatı ve metal tozlarının öğütmeye bağlı özelliklerinin araştırılması. *1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, 16-17 Eylül, Ankara, s.387-397.
- Sarıtaş S. (1995). Toz metalürjisi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 36 (421), 41-50.
- Sarıtaş S. (1994). Toz metalürjisi. Makina Mühendisleri El Kitabı, Cilt 1, (2.Baskı), 64-83. Ankara: MMO Yayınları.
- Skorokod V.V. ve Solenin C.M. (1984). Fiziko metallurgičeskie osnovı spekaniam. Moskova: Metallurgiya, 158-160.
- Skorokod V.V. (1995). Sostoyanie i perispektivı razvitiya nauçnix osnav poroşkovoy metallurgii. *Poroşkovaya Metallurgiya*, (10) 20-24.

- Somunkıran İ. ve Çelik H. (1999). Demir esaslı molibden, nikel, bakır katkılı toz metal alaşımlarının mekanik özelliklerine bakır oranının etkisi. *2. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, 15-17 Eylül, Ankara, s.729-736.
- Somunkıran İ ve Özel S. (2006). Fe esaslı toz alaşımında sinterleme sıcaklığının aşınma direncine etkisi. *11. Denizli Malzeme Sempozyumu*, 19-21 Nisan, Denizli, s.153-157.
- Ştetnbert S.S. (1991). Metallovedenie. Sverdlovsk: Metallurgiya.
- Sudhakar, K.V. ( 2000). Fatigue behavior of a high density powder metallurgy steel. *International Journal of Fatigue*, (22) 729-734.
- Şükürov R.İ. (2002). Metalşünaslıq. Bakü: Çaşioğlu Yayınevi.
- Tabata T., Masaki S., Suzuki H. & Zhu B.Q. (1989). Bond strength of sinter bonded composite perofoms. *The International Journal of Powder Metallurgy*, 27 (1), 265-273.
- Toz metal kataloğu - <http://www.tozmetal.com/turkish/meta.htm>
- Tunay R.F., Varol R. ve Yılmaz S.S. (2002). Borlamanın T/M çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi. *3. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 4-8 Eylül, Ankara, s.1221-1228.
- Ünlü B.S., Yılmaz S.S. ve Kurgan N. (2006). Toz metalurjisi ve kullanım alanları. *Makina Tek*, (99).
- Upadhyaya G.S. (1996). Powder metallurgy technology. Cambrige International Science Publishing.  
<http://site.ebrary.com/lib/deulibrary/Doc?id=10087040&ppg=2>
- Upadhyaya, G.S. (2001). Effect of copper and VCN additions on sintering of low alloy steel. *Materials and Design*, (22) 359-367.

- Varol R., Tunay R.F. ve Tüfekçi K. (2002). Toz metal (T/M) parçaların elektron ışın kaynağı ile birleştirilmesi. *Mühendis ve Makine*, 43(513), 32-35.
- Varol R. ve Sarıtaş S. (1996). Bilyalı dövme işleminin demir esaslı T/M parçaların yorulma özellikleri üzerine etkisinin araştırılması. *1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, : MMO ISBN : 200-1. 16-17 Eylül, Ankara, s.407-417.
- William D. & Callister Jr. (2003). *Materials science and engineering an introduction* (6th edition). NY: Wiley International Edition.
- Yılmaz R. (2006). Toz metalürjisi ile üretilen Fe-Cu-C esaslı parçaların mekanik özellikleri ve mikroyapı karakterizasyonu. *11. Denizli Malzeme Sempozyumu*, 19-21 Nisan, Denizli, s.772-776.
- Yılmaz R. (2005). Fe-Cu-C kompaktlarda presleme basıncı ve toz karışım oranlarının sertliğe ve çekme mukavemetine etkisi. *4. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 18-22 Mayıs, Sakarya, s. 795-806.
- Yılmaz S.S., Ünlü B.S. ve Varol R. (2005) Borlanmış demir esaslı FeCu-Grafit T/M malzemenin aşınma ve mekanik özellikleri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, ISSN:1304-4141, (3) 11-21, [www.teknolojikarastirmalar.com](http://www.teknolojikarastirmalar.com)
- Zavolotny L.V., Şevçuk Y.F., Begun K.İ., Koliniçenko A.F. ve Varçenko V.T. (1994). Poroşkovie antifrukçionnie materialı na osnove matallokonçentrata iz şlifovalnix şlamov. *Poroşkovaya Metallurgiya*, (7/8) 89-92.
- Zhang Z., Sandström R. & Wang L. (2004). Modelling of swelling of Fe–Cu compacts sintered at temperatures above the copper melting point. *Journal of Materials Processing Technolog*, (152) 131-135.
- Zhang Z. & Sandström R. (2004). Fe–Mn–Si master alloy steel by powder metallurgy processing. *Journal of Alloys and Compounds*, (363) 194-202.