

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**BAKIR VE PORSELEN MALZEMELERİN DİFÜZYON**  
**KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN**  
**İNCELENMESİ VE ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**FATMAGÜL TOLUN**

**BALIKESİR, OCAK - 2013**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Fatmagül TOLUN** tarafından hazırlanan “**BAKIR VE PORSELEN MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE ANALİZİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 30.01.2013 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK

Üye  
Prof. Dr. İrfan AY

Üye  
Prof. Dr. Ali BAYRAM

Üye  
Prof. Dr. Agah UĞUZ

Üye  
Yrd. Doç. Dr. Nedim GERGER



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Hilmi NAMLI

.....



## ÖZET

# BAKIR VE PORSELEN MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ  
FATMAGÜL TOLUN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. SARE ÇELİK)

BALIKESİR, OCAK - 2013

Difüzyon kaynağı, aynı ya da farklı cins, iki veya daha fazla malzemenin; akma dayanımlarının çok altındaki bir basınç ve yeniden kristalleşme sıcaklıklarının üzerindeki bir sıcaklıkta, ergitilmeksizin birleştirildikleri bir katı hal kaynağıdır. Porselenlerin kullanım alanlarının genişliği düşünülürse, bu konunun ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Porselen malzemelerle bakırın, bilinen kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Porselenle bakırın difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinin araştırılmasının bu alanlardaki yeni teknolojilerin gelişmesine ışık tutacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada; porselen ve bakır malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Bu amaçla, porselen ve bakırın farklı parametrelerle difüzyon kaynağı deneyleri yapılmıştır. Kaynaklı numunelere kesme testi uygulanarak, kaynak bölgesinin mukavemeti araştırılmıştır. Kaynaklı numunelerin birleşme yüzeyine dik olarak alınan kesit üzerinde mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için, numunelerin SEM görüntüleri alınarak, EDX ve XRD analizleri yapılmıştır.

Kesme testi sonuçlarına göre, deney parametreleri istatistiksel modelleme analizi ile değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemine göre, bilgisayar destekli analiz programında, deney numunelerine, zamana bağlı termal analiz ve zamana bağlı yapısal analiz yapılmıştır.

İnceleme sonunda; vakum uygulaması ve argon gazı atmosferinde, 900 °C sıcaklıkta, 4,5 MPa basınçta, 60 dakika difüzyon süresi parametrelerinde yapılan difüzyon kaynağı deneylerinin en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

Çalışmanın 1. Bölümünde konu ile ilgili literatür çalışması verilmiştir, 2. Bölümde difüzyon teorisi ve difüzyon kaynağı hakkında bilgiler verilmiştir, 3. Bölümde difüzyon kaynağı ile yapılan deneysel çalışmalar incelenmiştir, 4. Bölümde mikroyapı incelemeleri verilmiştir, 5. Bölümde deneysel çalışmalar sonrası yapılan analizler verilmiştir, 6. Bölümde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır, 7. Bölümde genel sonuçlar verilmiştir, 8. Bölümde ise kaynaklar verilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** difüzyon kaynağı / porselen / bakır / sonlu eleman analizi

## **ABSTRACT**

### **EXAMINATION AND ANALYSIS OF JOINABILITY OF COPPER AND PORCELAIN MATERIALS BY DIFFUSION BONDING**

**PH.D THESIS**

**FATMAGÜL TOLUN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. SARE ÇELİK )**

**BALIKESİR, JANUARY 2013**

Diffusion bonding is unmelted bonding of the two or more materials at a pressure well below their yield strengths and a temperature over their recrystallization temperatures. The prevalence of porcelain usage areas clearly show the importance of this subject. Bonding of porcelain to copper is not possible with the known welding techniques. Researching the diffusion bonding of porcelain to copper will develop the new technologies in this field.

In this work, joinability of porcelain and copper by diffusion bonding was examined. With this purpose, diffusion bonding tests of porcelain to copper were done with different parameters. The strength of welded area was examined by applying the shear test to bonded specimens. Microhardness was measured on the profile taken perpendicular to the joining surface of the bonded specimens. For the microstructure examination of specimens, SEM images were taken and EDX and XRD analysis were made.

According to shear test results, the test parameters were evaluated by statistical modeling analysis. According to finite element method, time dependent thermal and structural analysis were done to test specimens by the computer aided analysis program.

End of this examination, was seen that the best result of diffusion bonding tests is at these parameters; at vacuum application and argon gas atmosphere, 900 °C temperature, 4.5 MPa pressure, 60 minutes diffusion time.

At the first part of this work, literature review about the subject was given, at the second part, informations about the diffusion theory and diffusion bonding were given, at the third part, the experimental works about the diffusion bonding were examined, at the fourth part, microstructure examinations were given, at the fifth part, analyzes after the experimental works were given, at the sixth part, results were discussed, at the seventh part general results were given, at the eighth part, references were given.

**KEYWORDS:** diffusion bonding / porcelain / copper / finite element analysis



# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
Sayfa.....	v
TABLO LİSTESİ.....	ix
SEMBOL LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Literatür Araştırması .....	2
2. DİFÜZYON MEKANİZMASI VE DİFÜZYON KAYNAĞI .....	15
2.1 Giriş.....	15
2.2 Difüzyon Teorisi .....	17
2.2.1 Enerji Konumları .....	19
2.2.2 Difüzyon Katsayısı .....	21
2.2.3 Difüzyon Mekanizmaları .....	23
2.2.3.1 Yeralan Mekanizması .....	24
2.2.3.2 Arayer Difüzyonu Mekanizması.....	24
2.2.3.3 Boşluk Mekanizması.....	25
2.2.3.4 Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması .....	26
2.2.3.5 Halka Mekanizması .....	27
2.2.4 Difüzyon Çeşitleri .....	27
2.2.5 Aktivasyon Enerjisi .....	28
2.2.6 Difüzyon Kanunları .....	29
2.2.6.1 I. Fick Kanunu .....	29
2.2.6.2 II. Fick Kanunu .....	29
2.2.7 Difüzyonu Etkileyen Faktörler .....	31
2.2.7.1 Sıcaklık .....	31
2.2.7.2 Yoğunluk (Konsantrasyon).....	31
2.2.7.3 Kristal Yapı.....	32
2.2.7.4 İmpuriteler (Saflığı Bozan Maddeler).....	32
2.2.7.5 Tane Boyutu.....	32
2.2.8 Kimyasal Difüzyon (Kirkendall Olayı) .....	33
2.3 Difüzyon Kaynağı Bağlantı Çeşitleri .....	34
2.3.1 Katı Hal Difüzyon Kaynağı .....	35
2.3.2 Sıvı Hal difüzyon Kaynağı ve Difüzyon Lehimleme .....	35
2.3.3 Süperplastik Şekil Verme ve Difüzyon Kaynağı Kombinasyonu ....	36
2.4 Difüzyon Kaynağına Etki Eden Faktörler.....	36
2.4.1 Kaynak Sıcaklığı .....	37
2.4.2 Kaynak Basıncı.....	38
2.4.3 Kaynak Süresi.....	39
2.4.4 Yüzey Şartları.....	40
2.4.5 Çalışma Ortamı (Kaynak Atmosferi) .....	42
2.4.6 Birleştirilecek Malzemelerin Tane Boyutları ve Mikroyapıları .....	42
2.5 Difüzyon Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Malzemeler .....	43

2.5.1	Difüzyon Kaynağının Uygulama Alanları.....	46
2.6	Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Metotlarıyla Karşılaştırılması .....	47
2.6.1	Difüzyon Kaynağının Avantajları .....	47
2.6.2	Difüzyon Kaynağının Dezavantajları .....	49
2.7	Difüzyon Kaynaklı Bağlantıların Muayene Yöntemleri .....	49
2.7.1	Tahribatlı Muayene Yöntemleri .....	49
2.7.2	Tahribatsız Muayene Yöntemleri .....	50
<b>3.</b>	<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>51</b>
3.1	Çalışmanın Amacı.....	51
3.2	Difüzyon Kaynağı Deney Düzenegi .....	53
3.3	Deneylerde Kullanılan Malzemeler .....	56
3.3.1	Bakır Malzeme .....	56
3.3.2	Genel Seramikler ve Porselen Malzeme.....	57
3.3.2.1	İzolatör Porseleni .....	58
3.4	Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	62
3.5	Difüzyon Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi .....	63
3.6	Deneyin Yapılışı.....	64
3.7	Kesme Testi.....	65
3.7.1	Kesme Test Kalıbının Modellenmesi ve İmalatı .....	66
3.7.2	Kesme Testi ve Sonuçları .....	67
3.8	Mikrosertlik Deneyi .....	73
<b>4.</b>	<b>MİKRO YAPI İNCELEMELERİ .....</b>	<b>77</b>
4.1	Elektron Mikroskopu (SEM) İncelemeleri.....	77
4.2	EDX İncelemeleri ve Faz Analizi .....	87
4.2.1	EDX İncelemeleri.....	87
4.2.2	Faz Analizi.....	107
<b>5.</b>	<b>MODELLEME VE ANALİZLER .....</b>	<b>111</b>
5.1	İstatistiksel Modelleme .....	111
5.1.1	Minitab Programı.....	112
5.1.2	Modelleme Çalışması .....	113
5.2	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sayısal Analizler (ANSYS Analizi).....	117
5.2.1	Difüzyon Kaynağı Analizi.....	120
5.2.1.1	Zamana Bağlı Termal Analiz.....	121
5.2.1.2	Zamana Bağlı Yapısal Analiz .....	126
<b>6.</b>	<b>SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....</b>	<b>134</b>
<b>7.</b>	<b>GENEL SONUÇLAR .....</b>	<b>137</b>
<b>8.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>139</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1:	Difüzyon kaynağının diğer katı hal kaynakları ile.....	16
	karşılaştırılması	
Şekil 2.2:	Difüzyon kaynağı mekanizması.....	17
Şekil 2.3:	Metallerde öz difüzyon süreci .....	18
	(üstte atomik dağılma, altta difüzyon süreci içinde konsantrasyon eğrileri)	
Şekil 2.4:	Atom mesafesinin bir fonksiyonu olarak potansiyel enerji.....	20
	değişim şeması	
Şekil 2.5:	Atom enerjilerinin şematik dağılımı.....	20
Şekil 2.6:	Serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı.....	21
Şekil 2.7:	Konsantrasyon değişiminin şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.8:	Yeralan difüzyonu.....	24
Şekil 2.9:	Arayer difüzyonunun oluşumu.....	25
Şekil 2.10:	Bosluk mekanizmasında atomların yer degistirmesi.....	26
Şekil 2.11:	Atomların karşılıklı yer değiştirilmesi.....	26
Şekil 2.12:	Halka mekanizmasında atomların yer değiştirilmesi.....	27
Şekil 2.13:	Yeralan ve arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon.....	28
	enerjisi	
Şekil 2.14:	Kararsız hal difüzyonu için konsantrasyon profile.....	30
Şekil 2.15:	Kirkendall etkisinin gösterimi.....	33
Şekil 2.16:	Sıcaklığın sürünme eğrisine etkisi.....	37
Şekil 2.17:	Sıcaklığın birleşme alanı üzerindeki etkisi.....	38
Şekil 2.18:	Yüzey kusurları.....	41
Şekil 2.19:	Yüzey deformasyonu ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı...	41
	değişme	
Şekil 3.1:	Vakumlu kesici.....	52
Şekil 3.2:	Difüzyon kaynak cihazı.....	54
Şekil 3.3:	Difüzyon kaynak düzeneğinin şematik gösterilmesi.....	54
Şekil 3.4:	Difüzyon kaynak cihazının kesit resmi.....	55
Şekil 3.5:	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub> faz diyagramı .....	61
Şekil 3.6:	SiO <sub>2</sub> faz diyagramı.....	61
Şekil 3.7:	Deney numunelerinin boyutları.....	62
Şekil 3.8:	Kaynaklı numuneler.....	65
Şekil 3.9:	Kesme kalıbı gövdesi.....	66
Şekil 3.10:	Load-cell ve kesme zımbası bağlantısı.....	67
Şekil 3.11:	Kesme testi .....	68
Şekil 3.12:	Kesme testi uygulanmış porselen numune.....	68



<b>Şekil 3.13:</b>	Kesme testi uygulanmış kaynaklı numuneler.....	69
<b>Şekil 3.14:</b>	11 nolu sırada verilen parametrelerle birleştirilmiş kaynaklı..... numunenin zamana bağlı kesme kuvveti grafiği	69
<b>Şekil 3.15:</b>	Difüzyon kaynağı kesme dayanımı grafiği.....	70
<b>Şekil 3.16:</b>	Difüzyon kaynağı en büyük kesme dayanımı grafiği.....	72
<b>Şekil 3.17:</b>	Su jeti ile kesit alma işlemi.....	73
<b>Şekil 3.18:</b>	Su jeti ile kesit alınmış kaynaklı numune örneği.....	74
<b>Şekil 3.19:</b>	Zımparalama ve parlatma cihazı resmi.....	74
<b>Şekil 3.20:</b>	11 nolu sırada verilen parametrelerle birleştirilmiş Cu-porselen difüzyon kaynaklı numunenin sertlik değişim grafiği	75
<b>Şekil 4.1:</b>	SEM-EDX incelemeleri.....	77
<b>Şekil 4.2:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	78
<b>Şekil 4.3:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	78
<b>Şekil 4.4:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	79
<b>Şekil 4.5:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	79
<b>Şekil 4.6:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	80
<b>Şekil 4.7:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	80
<b>Şekil 4.8:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	81
<b>Şekil 4.9:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	81
<b>Şekil 4.10:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	82
<b>Şekil 4.11:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	82
<b>Şekil 4.12:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	83
<b>Şekil 4.13:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	83
<b>Şekil 4.14:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	84
<b>Şekil 4.15:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin... kırılma yüzeyinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	84
<b>Şekil 4.16:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen..... numunenin kırılma yüzeyinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	85
<b>Şekil 4.17:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin... kırılma yüzeyinin geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü	85
<b>Şekil 4.18:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen..... numunenin kırılma yüzeyinin geri yansıyan elektron incelemesi	86



	ile mikroyapı görüntüsü	
<b>Şekil 4.19:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. EDX analizi	88
<b>Şekil 4.20:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. porselen tarafının EDX analizi	89
<b>Şekil 4.21:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. Cu tarafının EDX analizi	90
<b>Şekil 4.22:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. porselen tarafının EDX analizi	91
<b>Şekil 4.23:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. Cu tarafının EDX analizi	92
<b>Şekil 4.24:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. EDX analizi (Porselen elementlerinin içine yerleşmiş Cu elementi)	93
<b>Şekil 4.25:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. haritalama yöntemi ile incelenmesi	94
<b>Şekil 4.26:</b>	Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. haritalama yöntemi ile element analizi (Porselen elementlerinin içine yerleşmiş Cu elementi)	95
<b>Şekil 4.27:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. Porselen tarafının EDX analizi (Porselen elementlerinin içine yerleşmiş Cu elementi)	96
<b>Şekil 4.28:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. Cu tarafının EDX Analizi (Cu elementinin içine yerleşmiş porselen elementleri)	97
<b>Şekil 4.29:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. porselen tarafının EDX Analizi (Porselen elementinin içine yerleşmiş bakır elementi)	98
<b>Şekil 4.30:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. Cu tarafının EDX Analizi (Cu elementinin içine yerleşmiş porselen elementleri)	99
<b>Şekil 4.31:</b>	Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin. haritalama yöntemi ile element analizi	100
<b>Şekil 4.32:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin... kırılma yüzeyinin EDX analizi. (Cu elementinin arasına yerleşmiş porselen elementleri)	101
<b>Şekil 4.33:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin.... kırılma yüzeyinin EDX analizi. (Cu elementinin arasına yerleşmiş porselen elementleri)	102
<b>Şekil 4.34:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen..... numunenin kırılma yüzeyinin EDX analizi. (Porselen elementlerinin arasına yerleşmiş Cu elementi)	103
<b>Şekil 4.35:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen..... numunenin kırılma yüzeyinin EDX analizi. (Porselen elementlerinin arasına yerleşmiş Cu elementi)	104
<b>Şekil 4.36:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin.... Kırılma yüzeyinin haritalama yöntemi ile element analizi	105
<b>Şekil 4.37:</b>	11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen..... numunenin kırılma yüzeyinin haritalama yöntemi ile element analizi	106

<b>Şekil 4.38:</b>	Kaynaklı numune ve orjinal numune arasındaki cam.....	108
	fazlarındaki değişim grafiği	
<b>Şekil 4.39:</b>	Kaynaklı numune ve orjinal numune arasındaki korund ve.....	108
	mullit oranlarındaki değişim grafiği	
<b>Şekil 4.40</b>	Orjinal numunedeki kristobalit faz grafiği.....	109
<b>Şekil 4.41</b>	Kaynaklı numunedeki kristobalit faz grafiği.....	109
<b>Şekil 5.1:</b>	Konum 1' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon.....	114
	basıncı arayüzey grafiği	
<b>Şekil 5.2:</b>	Konum 1' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon.....	115
	basıncı grafiği	
<b>Şekil 5.3:</b>	Konum 2' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon.....	116
	basıncı arayüzey grafiği	
<b>Şekil.5.4:</b>	Konum 2' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon.....	117
	basıncı grafiği	
<b>Şekil 5.5:</b>	Numunelerin ANSY programında modellemesi.....	120
<b>Şekil 5.6:</b>	Meshlenmiş kaynaklı numune modeli.....	121
<b>Şekil 5.7:</b>	Analiz için ANSY programına girilen zamana bağlı sıcaklık.....	121
	değerleri	
<b>Şekil 5.8:</b>	Deneye başladıktan 9780 saniye sonra ısınma esnasındaki.....	122
	zamana bağlı termal analiz	
<b>Şekil 5.9:</b>	Deneye başladıktan 14525 saniye sonra difüzyon işlemi.....	123
	esnasındaki zamana bağlı termal analiz	
<b>Şekil 5.10:</b>	Deneye başladıktan 18600 saniye sonra difüzyon işlemi.....	124
	bitimindeki zamana bağlı termal analiz	
<b>Şekil 5.11:</b>	Deneye başladıktan 18600 saniye sonra difüzyon işlemi.....	124
	bitimindeki zamana bağlı termal analiz (Porselen ve Cu' ın kaynak ara yüzeyi )	
<b>Şekil 5.12:</b>	Deneye başladıktan 24258 saniye sonra soğutma işlemi.....	125
	esnasındaki zamana bağlı termal analiz	
<b>Şekil 5.13:</b>	Deneye başladıktan 29364 saniye sonra soğutma esnasındaki	126
	zamana bağlı termal analiz	
<b>Şekil 5.14:</b>	Sabitlenmiş numune modeli.....	127
<b>Şekil 5.15:</b>	Zaman bağlı basınç değerleri grafiği.....	127
<b>Şekil 5.16:</b>	Basınç uygulanmaya başladıktan 3600 sn sonra Cu-Porselen....	128
	için eşdeğer gerilme değeri	
<b>Şekil 5.17:</b>	Basınç uygulanmaya başladıktan 3600 sn sonra y yönündeki.....	129
	doğrusal deformasyon değeri	
<b>Şekil 5.18:</b>	Basınç uygulanmaya başladıktan 3600 sn sonra x yönündeki.....	130
	doğrusal deformasyon değeri	
<b>Şekil 5.19:</b>	Basınç uygulanmaya başladıktan 4500 sn sonra Cu-Porselen ....	131
	için eşdeğer gerilme değeri	
<b>Şekil 5.20:</b>	Basınç uygulanmaya başladıktan 4500 sn sonra y yönündeki.....	132
	değeri	
<b>Şekil 5.21:</b>	Basınç uygulanmaya başladıktan 4500 sn sonra x yönündeki.....	133
	doğrusal deformasyon değeri	

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 2.1:</b> Metal ve alaşımlarının difüzyon kaynak yöntemi ile ara yüzey... levhasız ve ara yüzey levha kullanılarak kaynak edilebilirliği	44
<b>Tablo 2.2:</b> Difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka... malzemeleri	45
<b>Tablo 3.1:</b> Difüzyon kaynak cihazının parçaları.....	55
<b>Tablo 3.2:</b> Saf bakır malzemeye ait fiziksel ve mekanik özellikler.....	56
<b>Tablo 3.3:</b> Kullanılan bakırın testler sonucu alınan özellikleri.....	57
<b>Tablo 3.4:</b> Deneylerde kullanılan porselene ait fiziksel özellikler.....	59
<b>Tablo 3.5:</b> Deneylerde kullanılan porselen malzemenin kimyasal yapısı.....	60
<b>Tablo 3.6:</b> Difüzyon kaynağı ön deney parametreleri.....	63
<b>Tablo 3.7:</b> Difüzyon kaynağı deney parametreleri.....	64
<b>Tablo 3.8:</b> Kesme dayanımı sonuçları.....	70
<b>Tablo 3.9:</b> En yüksek kesme dayanımı sonuçları.....	71
<b>Tablo3.10:</b> Kaynaklı numune sertlik değerleri.....	75
<b>Tablo 5.1:</b> Konum 1' de yapılan en yüksek kesme testi sonuçları.....	113
<b>Tablo 5.2:</b> Konum 2' de yapılan en yüksek kesme testi sonuçları.....	116



## SEMBOL LİSTESİ

$E$	=	Sabit Bir Hacim İçin Serbest Enerji
$U$	=	Sistemin İç Enerjisi
$T$	=	Ara Yüzeyin Sıcaklığı
$S$	=	Ara Yüzeyin Entropisi
$q$	=	Birim sürede x eksenine dik bir düzlemde bir birim alandan akan kütle
$p$	=	Difüze olan cismin yoğunluğu
$-\left(\frac{dp}{dx}\right)$	=	Konsantrasyon gradyanı (Yoğunluk derişimi)
$D$	=	Difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ )
$JA$	=	A atomlarının akışı ( $m^2 s^{-1}$ )
$\frac{dc}{dx}$	=	Konsantrasyon gradyanı ( $m^3/m$ ) <sup>-1</sup>
$C_s$	=	Yüzeydeki Konsantrasyon
$C_x$	=	Yüzeyden veya ara kesitten x kadar mesafedeki bir noktanın yoğunluğu
$C_0$	=	Difüzyon çiftinden birinin ilk yoğunluğu
$x$	=	$C_x$ 'in ölçüldüğü noktanın yüzeye olan uzaklığı
$t$	=	difüzyon süresi
$erf$	=	hata fonksiyonu
$N_A$	=	A atomunun mol oranı
$N_B$	=	B atomunun mol oranı
$D_A$	=	A atomunun difüzyon katsayısı
$D_B$	=	B atomunun difüzyon katsayısı
$D_0$	=	Yayınan atomların titreşim frekansına bağlı yayınma katsayısı ( $cm^2/s$ )
$Q$	=	Aktivasyon enerjisi (kcal/mol)
$R$	=	Gaz sabiti (1,987 cal/mol)

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca, bilgisi ve tecrübesiyle hep yanımda olan ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Sare Çelik'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tezimin her aşamasında, önerileri ile bana yol gösteren değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. İrfan Ay ve Sayın Prof. Dr. Ali Bayram'a teşekkür ederim.

Kendilerinden gelen araştırma talebi ile, tez konumun tespit edilmesine vesile olan, mikro yapı araştırmalarında ve malzeme temininde verdikleri destekle yanımda olan Kaleseramik Çanakkale Kalebodur Seramik Sanayi AŞ. Kompozit İzolatör ve Arge Bölümü'ne teşekkürü borç bilirim.

Kesme testi aparatlarının imalatını gerçekleştiren Sayın Doç. Dr. Ali Oral'a, istatistiksel modelleme çalışmalarında yardımcı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Deniz Karaoğlan'a, sonlu eleman analizlerinin yapımında destek olan Araştırma Görevlisi Sayın Tayfur Kerem Demircioğlu'na, mikrosertlik incelemelerinin gerçekleştirildiği K.K. Astsubay Meslek Yüksek Okulu'na ve Sayın Recep Çakır'a, mikroyapı incelemelerinin yapıldığı Eskişehir Seramik Araştırma Merkezi A.Ş.'ne ve çalışanlarına, deneyler sırasında yardımcı olan Makine Mühendiliği Bölümü Atölye teknikerlerine teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen, eşim Hayati'ye, oğlum Batuhan'a ve aileme teşekkür ederim.

## 1. GİRİŞ

Difüzyon kaynağı, aynı ya da farklı cins, iki veya daha çok malzemenin; akma dayanımlarının çok altındaki bir basınç ve yeniden kristalleşme sıcaklıklarının üzerindeki bir sıcaklıkta, ergitilmeksizin birleştirildikleri bir katı hal kaynağıdır.

Difüzyon kaynağı çok eskiden beri bilinmesine rağmen, özellikle son yıllarda uzay teknolojisinde, nükleer santrallerde ve elektronik sanayindeki hızlı gelişmeler, bu yöntemin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Apollo uzay aracı ve uzay kapsülündeki parçalarda, nükleer santrallerdeki yakıt çubuğu koruyucu bağlantısında bu yöntem uygulanmıştır. Uçak sanayinde askeri ve yolcu uçaklarının, uzun ve dayanıklı olan kanat parçalarında, difüzyon kaynağı uygulamaları bulunmaktadır. Soğuk hava depolarında, gaz dolum tesislerinde ve silah teknolojisinde aynı yöntem kullanılmaktadır [1].

Yirminci asrın ikinci yarısında teknolojinin gelişmesi, beraberinde sanayinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminde gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır [2].

Malzeme bilimindeki gelişmeler; yeni teknolojik malzemeleri ve bu malzemelerin kullanım alanlarını ortaya çıkarmıştır. Porselenler bilinen en eski malzemelerden olmasıyla birlikte, günümüzde endüstrinin farklı alanlarında kullanımı nedeniyle, yeni ve önemli bir teknolojik malzeme olarak, yerini almıştır. Porselenlerin kullanım alanlarının genişliği düşünülürse bu konunun ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Porselen malzemeler; inşaat, elektromekanik, otomotiv, elektrik elektronik, uzay sanayinde; yüksek yalıtım özelliği, ısı dayanımı ve darbelere dayanım gibi özellikleriyle oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Bakır (Cu) ise; üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle; elektrik elektronik, inşaat, ulaşım sanayinde ve pek çok diğer alanda tercih edilen önemli bir metaldir. Cu' ın yüksek iletkenlik özelliği ve porselenin de yalıtkanlık özelliği nedeniyle; elektrik elektronik sanayi, elektromekanik sanayi ve uzay sanayi; gibi alanlarda bir arada kullanımları yaygınlaşmıştır. Porselen ve Cu malzemelerin birleştirme teknolojilerinde, bilinen kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi mümkün değildir, bu nedenle; özel kaynak yöntemleri tercih edilmektedir. Difüzyon kaynağıyla kusursuz bir ara yüzey ve yüksek sıcaklıkta mekanik direnç elde



edilebilmektedir. Bu özelliğinden dolayı; Cu ve porselenin birleştirilmesinde; difüzyon kaynağı avantajlı bir tekniktir. Porselen malzemelerin metallere difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi, üzerinde çok az çalışılmış bir konudur. Bu nedenle bu konunun araştırılmasının bu alanlardaki yeni teknolojilerin gelişmesine ışık tutacağı düşünülmektedir.

Elektrik sanayinde kullanılan SF6 gazlı kesicilerde ve vakumlu kesicilerde, Cu ve porselen malzeme çifti birlikte kullanılmaktadır. Bu malzeme çiftinin birleştirilmesi için yeni bir tekniğe ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla çalışmada; porselen ve Cu malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Ön çalışmalar ve literatür araştırması sonucunda; kaynak parametreleri belirlenmiş ve difüzyon kaynağı denemeleri yapılmıştır. Kaynaklanma işlemi sonrasında, başarılı olan numunelere; kesme testi uygulanarak, kaynak bölgesinin mukavemeti araştırılmıştır ve ayrıca mikrosertlik deneyleri yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için, Seramik Araştırma Merkezi'nde, numunelerin, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınarak, Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) analizi yapılmıştır. Ayrıca kaynak sonrası faz değişimlerinin incelenmesi için porselen numunelere, X ışını kırınımı (XRD) faz analizi yapılmıştır.

Kesme testi sonuçlarına göre, deney parametreleri istatistiksel modelleme analizi ile değerlendirilmiştir. Bu analiz için, Minitab programı kullanılmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemine göre, bilgisayar destekli analiz programında, deney numunelerine zamana bağlı termal analiz ve zamana bağlı yapısal analiz yapılmıştır. Bunun için ise ANSYS programı kullanılmıştır.

Yapılan incelemelerde; vakum uygulaması ve argon gazı atmosferinde, 900 °C difüzyon sıcaklığı, 4,5 Mega Pascal (MPa) kaynak basıncı, 60 dakika (dak) difüzyon süresi parametrelerinde yapılan porselen ve Cu malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi deneyinin en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

## 1.1 Literatür Araştırması

Z. Zhong ve çalışma arkadaşlarının 2010 yılında yaptıkları çalışmada, W / Ni aratabaka çiftini kullanarak, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş, SiC ve ferritik paslanmaz çelik malzemelerinin mikroyapısını ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesi SiC ve çeliğin

kaynağının başarılı olduğunu göstermiştir. Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve XRD faz analizleri SiC/W arayüzeyinde,  $W_5Si_3$  ve WC intermetalik fazlarının, W/Ni arayüzeyinde ise  $Ni_4W$  intermetalik fazının oluştuğunu ortaya çıkarmıştır [3].

S. B. Sinnotta, E. C. Dickey'in 2003 yılında yaptıkları araştırmada; seramik metal arayüzeylerinin atomik yapı özellikleri incelenmiştir. Çalışmada; seramik metal arayüzey yapılarındaki sağlanan son ilerlemeler ve gelişmelerle ilgili teorik ve deneysel çalışmalar kritik edilmiştir [4].

M. Aydın ve çalışma arkadaşlarının 2007 yılında yaptıkları araştırmada; difüzyon kaynağı bağlantısı ile kartuş seramik filtre üretimi incelenmiştir. Çalışmada farklı aratabakalar kullanarak gözenekli seramik ve paslanmaz çelik difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemeleri ve kesme testi sonuçlarına göre, deneylerde gümüş aratabaka kullanarak, 875 °C sıcaklıkta, 0.2 MPa basınçta, 45 dak sürede difüzyon kaynağı ile filtre üretiminin uygun olduğu görülmüştür [5].

Z. Yong ve çalışma arkadaşlarının 2006 yılında yaptıkları araştırmada; seramik metal birleştirmelerdeki ilerlemeler incelenmiştir. Çalışmada seramik metal birleştirmelerinde kullanılan, özel lehimleme tekniği, difüzyon kaynağı tekniği ve kısmi geçiş sıvı faz kaynağı tekniğindeki ilerlemeler ve araştırmalar incelenmiştir [6].

O. M. Akselsen 1992 yılında yaptığı çalışmada; seramiklerin seramiklerle ve metallerle difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliğini incelenmiştir. Difüzyon kaynağı ile birleştirmelerde, difüzyon sıcaklığı, difüzyon basıncı ve difüzyon süresi parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Ek olarak ortamdaki kaynak atmosferinin etkileri, aratabaka olarak kullanılan malzemeler, kaynak yapılacak olan malzemelerin ısıl genleşme uyumsuzlukları incelenmiştir. Sonuç olarak; çeşitli seramik malzemelerin, seramik ve metal malzemeler ile difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi konusunda yapılacak çalışmalarda, kullanılacak parametreler ve aratabakalar konusunda klavuz olacak bir tablo ortaya çıkarılmıştır [7].

H.J. Liu ve çalışma arkadaşlarının 2000 yılında yaptıkları araştırmada, SiC seramiği ile TiAl bazlı alaşımın difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir.



Çalışmada birleştirme sırasında arayüzeyde oluşan faz yapılarını ve kaynak oluşum mekanizmalarını araştırılmıştır [8].

M. A. Martinez ve çalışma arkadaşlarının 1992 yılında yaptıkları çalışmada; yoğun alümina ve alüminyumun, plastik deformasyonu ve difüzyon kaynağı incelenmiştir. Çalışmada, optik mikroskopla ve geçişli elektron mikroskopu (TEM) ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır, EDX analizi ile de element analizleri yapılmıştır. Yapılan incelemelerde metalin seramik yüzeyindeki gözeneklere ve çatlaklara dolduğu tespit edilmiştir. Ayrıca hızlı soğutmanın seramikte çatlak oluşumuna sebep olduğu gözlenmiştir [9].

M. L. Hattali ve çalışma arkadaşlarının 2012 yılında yaptıkları çalışmada,  $Al_2O_3$  ile HAYNES® 214TM alaşımının katı hal kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Çalışmada,  $Al_2O_3$ /HAYNES® 214TM, Ni ve Cu-Ni-Cu aratabakaları kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Çalışma sonrasında deney numunelerinde oluşan artık gerilme dağılımını ölçmek için, XRD metodu kullanılmıştır. Kesme testi ile kaynaklı bölgenin dayanımı ölçülmüştür.  $Al_2O_3$ /Cu<sub>2</sub>O–Cu/Ni/Cu/HAYNES® 214TM birleştirmesinin,  $Al_2O_3$ /Ni/HAYNES® 214TM birleştirmesine göre kaynak dayanımının çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir [10].

M. I. Barrena ve çalışma arkadaşlarının 2009 yılında yaptıkları çalışmada,  $Al_2O_3$  seramiği ile Ti6Al4V alaşımının difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi tekniği incelenmiştir. Difüzyon kaynağını, 750 °C sıcaklık, 3MPa basınç, 10 ile 60 dak arasındaki kaynak sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Aratabaka olarak Ag-Cu kullanılmıştır. Çalışma sonrasında numunelerin, SEM ve TEM görüntüleri alınarak ve EDX analizi ile element analizleri yapılmıştır. Ayrıca mekanik özelliklerin araştırılması için de numuneler kesme testi uygulanmıştır. Yapılan incelemeler sonrasında,  $Al_2O_3$  seramiği ile Ti6Al4V alaşımının; Ag-Cu aratabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde en uygun parametrelerin, 750 °C difüzyon sıcaklığı, 3MPa difüzyon basıncı, 10 ile 30 dak arasındaki difüzyon sürelerinde olduğu tespit edilmiştir [11].

2002 yılında D. Travessa ve çalışma arkadaşlarının yaptıkları çalışmada,  $Al_2O_3$  alüminyum oksit ve AISI 304 paslanmaz çeliğinin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde gerilim giderici aratabaka kullanımı incelenmiştir. Deneylerde aratabaka olara; Ti, Mo, Cu, Ti-Mo ve Ti- Cu kullanılmıştır. Çalışma sonrasında

numunelerin mikroyapı incelemeleri için SEM görüntüleri alınarak, EDS analizleri yapılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için kesme testi uygulanmıştır. Ayrıca numunelerde sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellenerek, difüzyon kaynağı sonrası meydana gelen artık gerilmeleri ve dağılımını analiz etmişlerdir. Çalışmada 700 °C ile 900 °C kaynak sıcaklıkları arasında çalışılmıştır. Kaynak süresi olarak da 15 dak ile 180 dak arasındaki sürelerde çalışılmıştır. Ti aratabaka kullanarak yapılan çalışmalarda, 700 °C de 15 dakika sürede yapılan denemelerde bile birleştirme gerçekleşmiştir. Ancak 0,5 mm titanyum aratabaka kullanarak yapılan birleştirmelerin kesme testi sonuçlarına göre dayanımı en yüksek birleştirmenin; 800° C difüzyon sıcaklığında, 15 MPa kaynak basıncında ve 60 dak kaynak süresinde gerçekleştiği görülmektedir. Ti-Mo ve Ti-Cu aratabakaları kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş olan numunelerde kaynak sonrasında oluşan artık gerilmelerin azaldığı tespit edilmiştir. Kesme testi sonuçları incelendiğinde, Ti ile birleştirilmiş numunelere göre Ti-Mo ve Ti-Cu ile birleştirilmiş numunelerin sırasıyla %35 ve %210 oranlarında kesme dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir [12].

B. Serier ve çalışma arkadaşlarının 2011 yılında yaptıkları araştırmada, katı hal kaynağı ile gümüş aratabaka kullanılarak birleştirilmiş  $Al_2O_3$  (Alüminanın) deneysel analizi incelenmiştir. Numunelerin birleştirilmesinde deney parametreleri olarak, 2 MPa ile 10 MPa arasındaki difüzyon basıncı, 500 °C ile 900 °C difüzyon sıcaklığı ve 1 ile 7 saat arasındaki difüzyon süreleri uygulanmıştır. Deney sonrasında mekanik test olarak; numunelerin kaynak dayanımını tespit etmek için kesme testi uygulanmıştır. Difüzyon kaynağı sonrasında kaynaklı bölgede; birleşme yüzeyinde seramik yüzeyindeki pürüzleri kaplayan metalin sebep olduğu mekanik ve morfolojik mekanizma ve güçlü kimyasal bağlar nedeniyle oluşan temel adezyon mekanizması şeklinde 2 çeşit mekanizma oluştuğu tespit edilmiştir [13].

S. Xiaoqin ve çalışma arkadaşlarının 2009 yılında yaptıkları araştırmada,  $Al_2O_3$ -TiC seramik matrisli kompozit malzemesi ile W18Cr4V yüksek hız takım çeliğinin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak sonrası oluşan artık gerilmelerin sonlu elemanlar metodu ile analizi incelenmiştir. Numunelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde Ti ve Ti-Cu-Ti aratabakaları kullanılmıştır. Deneyler, 1130 °C difüzyon sıcaklığında, 5-30 MPa difüzyon basıncında ve 60 dak difüzyon süresinde  $10^{-5}$  Pascal (Pa) vakum altında yapılmıştır. Kaynaklı numunelere mekanik



test olarak kesme testi uygulanarak, kaynaklı bölgenin dayanımı belirlenmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar metodu ile de numunelere termal, elastik ve plastik gerilme analizi uygulanmıştır. 1130 °C de, 60 dak' da, 15 MPa basınçta ve 0.02Ti–0.06Cu–0.02Ti ara tabakası ile birleştirilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiC ve W18Cr4V kaynaklı numunesine yapılan sonlu eleman analiz sonuçlarına göre; maksimum aksel artık gerilme basıncının W18Cr4V yüksek hız takım çeliği tarafında ve maksimum aksel artık gerilmesinin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiC seramik matrisli kompozit tarafında olduğu kesme testi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında yakın değerler gözlenmiştir. Çalışma sonucunda kaynak basıncının iyileştirilmesi ile aksel artık gerilmelerde bir miktar düşüş ve kesme gerilmesinde bir miktar yükselme tespit edilmiştir. Ayrıca; Ti aratabaka yerine Ti-Cu-Ti aratabakası kullanıldığında, aksel artık gerilmelerinde az miktarda, kesme artık gerilmelerinde büyük ölçüde azalma tespit edilmiştir [14].

A.M. Kliuga ve çalışma arkadaşlarının 2001 yılında yaptıkları çalışmada, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alümina) ve AISI 304 paslanmaz çeliğini Ti aratabakası kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde, iki arayüzeyin mikroyapı karakterizasyonlarının araştırılması konusu incelenmiştir. 900 °C difüzyon sıcaklığında, 15 MPa difüzyon basıncında ve  $2 \times 10^{-3}$  Pa vakum altında, Ti folyo aratabakasıyla birleştirilen kaynaklı numunelere, mikroyapı incelemeleri için, SEM ve TEM görüntüleri alınarak, EDX analizleri yapılmıştır. Numunelere mikrosertlik ölçümü de yapılmıştır. Difüzyon kaynağı sonrasında AISI 304 ve Ti arayüzeyinde, yavaş soğutma ile  $\lambda$ -(Fe,Cr)<sub>2</sub>Ti,  $\chi$  ve  $\sigma$  ara metalik fazları oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca çelik tarafında Ti difüzyonunun sebep olduğu Ferrit ve TiC oluşumuna rastlanmıştır [15].

L.I. Duarte ve çalışma arkadaşlarının 2012 yılında yaptıkları çalışmada; gamma-TiAl alaşımının Ti/Al nano tabakası kullanılarak, difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Çalışmada gamma-TiAl alaşımı, 900 °C difüzyon sıcaklığında, 50 MPa difüzyon basıncında, 1 saat difüzyon süresinde, vakum altında, Ti-Al ve Ti-Cu-Al nano tabakaları ile difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak sonrası numuneler, mikroyapı incelemeleri için; SEM ve TEM görüntüleri alınarak ve EDX analizine tabii tutulmuştur. Cu takviyeli Ti-Al çok katmanlı tabaka ile yapılan difüzyon kaynağı birleştirmelerin sağlam ve hatasız olduğu tespit edilmiştir. Cu takviyeli Ti-Al çok katmanlı ara tabaka ile yapılan birleştirmelerin Cu katkısız Ti-Al tabakayla yapılanlara göre; düşük sıcaklıklarda, kaynak kalitesini arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Ti-Al tabakasındaki Cu katkısının, yüzey sertliğinin

düşürülmesinde etkili olan TiCuAl üçlü fazının oluşumuna da etki ettiği gözlenmiştir [16].

A. Çalık 2009 yılında yaptığı çalışmasında; Ni<sub>3</sub>Al intermetalik alaşımı ile, paslanmaz çeliğin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde ara yüzeylerin mikro yapıları incelenmiştir. 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda, 6 MPa basınçta ve 30 dak difüzyon süresinde birleştirilen numuneler, oda sıcaklığına kadar 15 °C dak<sup>-1</sup> oranında soğutulmuşlardır. Numunelere kaynak sonrası mikro yapı incelemeleri için SEM görüntüleri alınarak, EDX, XRD analizleri yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı numunelerin; mekanik özelliklerinin incelenmesi için kesme testi uygulanarak, mikrosertlik deneyleri yapılmıştır. Kaynak sonrası yapılan incelemelerde, difüzyon nedeniyle önceden gelişen mikro boşlukların difüzyon sıcaklığının artırılması ile azaldığı tespit edilmiştir. Ni<sub>3</sub>Al tarafında Al<sub>3</sub>Ni oluşumu tespit edilmiştir. Bu fazın Nikelin 316 paslanmaz çeliğine difüze olması sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Ni<sub>3</sub>Al tarafında yüzey sertliğinin düştüğü tespit edilmiştir [17].

R. Kara ve çalışma arkadaşlarının 2006 yılında yaptıkları araştırmada, difüzyon kaynağı ile birleştirilen Fe- Cu çiftinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada AISI 1020 çeliği ve elektrolitik Cu malzemeleri kullanılmıştır. Deneyler, atmosfer korumalı düşey bir fırında argon gazı atmosferinde ve izostatik yük altında gerçekleştirilmiştir. Difüzyon kaynağı ile yapılan birleştirme işleminden sonra kaynak bölgesinin mikro yapı incelemesi, çekme deneyi, darbe deneyi ve sertlik ölçümü yapılmıştır. Genel olarak yapılan analizler sonucunda sıcaklık, basınç ve süre gibi deney parametreleri göz önüne alındığında, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş numuneler içerisinde en iyi özellikleri, 800 °C de 3 N/mm<sup>2</sup> basınç altında 15 dak beklenen numunelerin sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durumda bu deney şartlarının üstündeki sıcaklıklara çıkılmasının bir avantajı olmadığı saptanmıştır [18].

S. Kolukisa'nın 2007 yılında yaptığı çalışmada, sfero dökme demir AISI 420 paslanmaz çeliğinin difüzyon kaynağında kaynak sıcaklığının kaynak kabiliyeti üzerine etkileri incelenmiştir. Deneyler 800- 900- 1000- 1100 °C sıcaklıklarda, 12 MPa basınçta, 20 dak sürede ve koruyucu atmosfer altında yapılmıştır. Kaynak sonrası numunelere, mikroyapı incelemeleri için SEM görüntüleri alınarak EDS analizi yapılmıştır. Kaynaklı numunelere mekanik özelliklerinin araştırılması için kesme testi uygulanarak ve yüzey sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikro yapı



incelemeleri ve kesme testi sonuçlarına göre en iyi birleştirmenin; 1100 °C sıcaklığında, 12 MPa basınçta, 20 dak sürede gerçekleştiği tespit edilmiştir [19].

R. Gürler ve çalışma arkadaşlarının 2007 yılında yaptıkları araştırmalarında; Fe-40 Al alaşımının difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Fe-40Al alaşımının difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde, Fe, Cu ve Ni aratabakalar kullanılmıştır. Kaynak işlemi; 1000- 1100 °C sıcaklıklarda, 2 MPa basınçta, 1 ile 4 saatlik sürelerde ve  $1-2 \cdot 10^{-5}$  Pa vakumda uygulanmıştır. Kaynaklı numunelere ve orijinal numunelere mekanik özelliklerin tespiti için kesme testleri ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Kaynaklı numunelerin mikro yapı incelemeleri için; SEM görüntüleri alınarak, EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Maksimum kesme dayanımının demir aratabakalıda ve 463 MPa basınçta olduğu tespit edilmiştir [20].

S. Çelik'in 1996 yılında yaptığı doktora çalışmasında, koruyucu gaz altında difüzyon kaynağı ve uygulaması incelenmiştir. Çalışmada elektrolitik saf bakır ve alüminyum, argon gazı altında difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Deneyler sonrasında kaynaklı numunelerin mikro yapı araştırmaları için, optik mikroskopla ve SEM ile incelenerek görüntüleri alınıp, EDS analizleri yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinin araştırılması için çekme testi ve mikrosertlik analizleri yapılmıştır. Çekme testi ve mikro yapı incelemeleri sonuçlarına göre en iyi birleştirmenin; 560 °C difüzyon sıcaklığında, 4,5 MPa difüzyon basıncında ve 60 dakika difüzyon süresinde gerçekleştiği tespit edilmiştir [21].

M. Taşkın ve çalışma arkadaşının 2004 yılında yaptıkları çalışmada, ferritik paslanmaz çelik ve AISI 1010 çeliğinin argon atmosferi altında farklı sıcaklıklarda difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Difüzyon kaynakları, 15 MPa'lık sabit basınçta, 20 dak'lık sabit sürelerde ve 800, 900, 1000 ve 1100 °C sıcaklıklarda ve argon atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Kaynak sonrası, numuneler birleşme ara yüzeyine dik doğrultuda kesilerek birleşme ara yüzeyinde meydana gelen mikro yapısal değişiklikler optik mikroskobu ve SEM ile belirlenerek numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bütün kaynaklarda, birleşme ara yüzeyinin her iki tarafında belirgin bir sertlik artışı gözlenmiştir. 1100 °C' de 20 dak bekleme süresinde yapılan kaynakta Cu ara tabakanın tamamen difüze olduğu ve sıcaklıkla ilişkili olarak difüzyon miktarının ve birleşme kalitesinin arttığı ancak tanelerin irileştiği gözlenmiştir [22].

Ş. Talaş'ın 2004 yılında yaptığı çalışmasında; Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo(%) alaşımının difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde basınç ve yüzey özelliklerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün, basınç ve sıcaklık etkenlerinin Titanyum aluminadların (Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo) 1000 °C maksimum sıcaklıkta ve 1 saat bekletme süresinde difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo süper alpha 2 Titanyum aluminad numuneleri 800G/15MPa ve 180Grit/20MPa yüzey pürüzlülüğü kombinasyonu kullanılarak metalurjik olarak iyi bir difüzyon kaynak bağlantısı elde edilmiştir. Basınç ve yüzey pürüzlülüğü kombinasyonunun difüzyon kaynak hattının mikro yapısını etkilediği bulunmuştur [23].

B. Kurt ve çalışma arkadaşının 2005 yılında yaptıkları araştırmada; difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Ti-6Al-4V alaşımı ve 316 paslanmaz çelik çiftinin ara yüzey mikroyapısı incelenmiştir. Ti-6Al-4V alaşımı ile AISI 316L tipi paslanmaz çelik 820, 885, 930 ve 980 °C sıcaklık, 5 MPa basınç ve 15 dak sürede, argon gazı atmosferinde difüzyon kaynağı tekniği kullanılarak birleştirilmiş ve deney sıcaklığının ara yüzey oluşumları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, Ti-6Al-4V ve paslanmaz çelik ara yüzeyinde oluşan fazlar, SEM ve EDS analizleriyle tespit edilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, ara bölgede FeTi ve Fe<sub>2</sub>Ti intermetalik fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir [24].

J. Li ve çalışma arkadaşlarının 2009 yılında yaptıkları araştırmada, vakum altında difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş AgNi alaşımı ile saf alüminyumun mikroyapı ve dayanımı incelenmiştir. Kaynak işlemi dört farklı sıcaklıkta yapılmıştır. 500, 530, 560, 600 °C sıcaklıklarda, 60 dak ve 2MPa basınçta, katı hal modunda ara malzemesiz denemeler yapılmıştır. 600 °C sıcaklıkta ise; geçici sıvı hal modunda (TLP) ara malzemeli denemeler yapılmıştır. TLP modunda numuneler önce 5MPa basınç altında, 530 °C ye kadar ısıtılıp, 30 dak tutulmuş; daha sonra 600 °C' ye kadar ısıtılıp, 30 dak' da bu sıcaklıkta difüzyona tabi tutulmuştur. İki modun, mikroyapıya ve kesme dayanımı değerlerine etkileri araştırılmıştır. Mikro yapı incelemeleri için numunelerin SEM görüntüleri alınarak, XRD analizi yapılmıştır. Katı hal modunda AgNi alaşımı tarafında Ag<sub>2</sub>Al fazı, TLP modunda ise; Al ve Ag arasında (Ag<sub>2</sub>Al + Al) ötektik fazı tespit edilmiştir [25].



B. Ravisankar ve çalışma arkadaşlarının 2009 yılında yaptıkları araştırmada, SU 263 alaşımının difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Çalışma da mikroyapı incelemesi yapıp, yüzey sertliği araştırılmıştır. Kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinin araştırılması için, kesme testi uygulanmıştır. Yapılan incelemeler sonrasında en başarılı sonucun 1323 °K difüzyon sıcaklığında, 0,9 MPa difüzyon basıncında ve 24 saat sürede yapılan birleştirme olduğu tespit edilmiştir [26].

K. Aydın ve çalışma arkadaşlarının 2012 yılında yaptıkları araştırmada; Ti ve Cu' ın difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Çalışmada Ti-6Al-4V alaşımı ile elektrolitik Cu; 875-890-900 °C sıcaklıkta, 15-30-60 dak sürelerde, 3 MPa basınç altında difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler, mikroyapı incelemeleri için optik mikroskop ve SEM görüntüleri alınarak, EDS analizine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin mekanik özelliklerinin araştırılması için kesme testi uygulanarak, sertlikleri ölçülmüştür. Yapılan incelemeler sonrasında 890 °C sıcaklıkta, 60 dak sürede, 3 MPa basınç altında birleştirilen numunenin, en büyük kesme kuvvetini (2173 N) sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca ara yüzeylerinde yapılan incelemede;  $\beta$  Cu<sub>4</sub>Ti, Cu<sub>2</sub>Ti, Cu<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub>, Cu<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub> and CuTi fazları tespit edilmiştir [27].

X.J. Yuan ve çalışma arkadaşlarının 2008 yılında yaptıkları araştırmada, TA17 titanyum alaşımı ile 0Cr18Ni9Ti östenitik paslanmaz çeliğinin difüzyon kaynağında, impuls basıncı incelenmiştir. Kaynaklı numuneler, mikroyapı incelemeleri için optik mikroskop, SEM, Elektron Prob Mikro Analiz (EPMA) ve XRD araştırmaları yapılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerinin araştırılması için çekme testi uygulanarak, mikrosertlikleri ölçülmüştür. Araştırma sonuçlarına göre optimum kaynak parametreleri tespit edilmiştir. Difüzyon sıcaklığı olarak 825 °C, maksimum impuls basıncı olarak 50 MPa, minimum impuls basıncı olarak 8 MPa, impuls sayısı olarak 50, impuls frekansı olarak 0,5 Hz, etkili difüzyon süresi olarak 180 saniye ve çekme dayanımı olarak da 321 MPa tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan inceleme sonrasında kaynak ara yüzeyinde FeTi, Fe<sub>2</sub>Ti,  $\sigma$  fazı ve  $\beta$ -Ti fazlarına rastlanmıştır [28].

A. Elrefaey ve çalışma arkadaşının 2009 yılında yaptıkları araştırmada, Ti ve çeliğin, Cu alaşımı aratabakası ile difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Kaynaklı numuneler mikroyapı incelemeleri için, SEM incelemeleri ve XRD

analizleri yapılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerin incelenmesi için kesme testi uygulanarak, mikrosertlik deneyi yapılmıştır. Deney parametreleri olarak,  $2 \times 10^{-5}$  Pa vakum atmosferinde, 3 MPa basınçta ve 30-180 dak difüzyon sürelerinde çalışılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; 800 °C nin altındaki sıcaklıklarda difüzyon süresi olarak 180 dak uygulama yapılsa bile başarılı olunamamıştır. 850 °C de ise, her difüzyon süresinde başarılı olunmuştur. Ayrıca incelemeler sonrasında birleştirme yüzeylerinde, Fe-Ti ve Ti-C intermetalik fazlarının da oluşmadığı tespit edilmiştir [29].

E. Atasoy ve çalışma arkadaşının 2008 yılında yaptıkları araştırmada, titanyum ve düşük karbonlu çeliğin gümüş aratabaka kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Kaynaklı numuneler mikroyapı incelemeleri için, optik mikroskop ve SEM görüntüleri alınarak, EDS analizi yapılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerin incelenmesi için kesme testi uygulanarak, sertlik deneyi yapılmıştır. Deney parametreleri olarak, 3 MPa basınçta ve 30-120 dak difüzyon sürelerinde ve 700-850 °C sıcaklıklarda çalışılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; 850 °C sıcaklıkta, 90 dak sürede, 3 MPa basınç altında birleştirilen kaynaklı numune en büyük kesme dayanımına sahiptir. Bu numunenin kesme kuvveti değeri, 3222,8 N bulunmuştur [30].

J. Zhang ve çalışma arkadaşlarının 2012 yılında yaptıkları incelemede, Mo ve Cu' ın nikel ara tabaka kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde, mikroyapı ve kaynak dayanımı araştırılmıştır. Kaynak sonrası numunelerin mikroyapı incelemeleri için SEM görüntüleri alınarak EPMA ve XRD analizleri yapılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerin incelenmesi için çekme testi uygulanmıştır. Deney parametreleri olarak, 5 MPa basınçta ve 10-60 dak difüzyon sürelerinde ve 730-850 °C sıcaklıklarda çalışılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; 800 °C sıcaklıkta, 30 dak sürede, 5 MPa basınç altında birleştirilen kaynaklı numune en büyük kesme dayanımına sahiptir. Bu numunenin kesme dayanımı, 97 MPa bulunmuştur [31].

H. Sabetghadam ve çalışma arkadaşlarının 2010 yılında yaptıkları araştırmada, 410 paslanmaz çelik ile Cu' ın Ni aratabaka kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Kaynaklı numuneler mikroyapı incelemeleri için, optik mikroskop ve SEM görüntüleri alınarak, EDS ve XRD analizine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin mekanik özelliklerin incelenmesi için kesme testi



uygulanarak, mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Deney parametreleri olarak, 12 MPa basınçta ve 60 dak difüzyon süresinde, 800-850-900-950 °C sıcaklıklarda ve  $10^{-4}$  torr vakum altında çalışılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; 900 °C sıcaklıkta, 60 dak sürede, 12 MPa basınç altında birleştirilen kaynaklı numune en büyük kesme dayanımına sahiptir. Bu numunenin kesme dayanımı, 145 MPa bulunmuştur [32].

O. Torun ve çalışma arkadaşlarının 2008 yılında yaptıkları araştırmada,  $Fe_{72}Al_{28}$  alaşımının Cu aratabaka kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Kaynaklı numuneler mikroyapı incelemeleri için, SEM görüntüleri alınarak, EDS ve XRD analizine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin mekanik özelliklerin incelenmesi için kesme testi uygulanmıştır. Deney parametreleri olarak, 3,2 MPa basınçta ve 1-2-4-6 saat difüzyon süresinde, 1075 °C sıcaklıklarda ve vakum altında çalışılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; 6 saat difüzyon süresinde birleştirilen kaynaklı numune en büyük kesme dayanımına sahiptir. Bu numunenin kesme dayanımı, 298 MPa' dır. Ayrıca mikroyapı incelemeleri sonrasında kaynak ara yüzeyinde  $Cu_3Al$  and  $B_2-FeAl$  ana fazları tespit edilmiştir [33].

L. Huijie ve çalışma arkadaşının 2009 yılında yaptıkları araştırmada, ince taneli TC21 Ti alaşımının difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. 2 µm gözenek boyutuna sahip TC21 Ti alaşımı, 780-980 °C sıcaklıkta, 5-90 dak sürede,  $6.6 \times 10^{-3}$  Pa vakum altında, 10 MPa basınçta tabi tutularak difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. 880 °C sıcaklıkta 15-30 dak sürede yapılan uygulamanın sonucunda kaynaklanma oranının %100 ve plastik deformasyon oranının %10 olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı numuneler mikroyapı incelemeleri için, optik mikroskop ve SEM görüntüleri alınarak, mikrosertlik ölçümü yapılmıştır [34].

Y. Li ve çalışma arkadaşlarının 2007 yılında yaptıkları araştırmada, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Mg ve Al malzemelerin arayüzeylerinin SEM ve XRD analizi ile araştırılması incelenmiştir. Kaynaklı numuneler mikroyapı incelemeleri için SEM ve TEM görüntüleri alınarak, XRD analizi yapılmıştır. Mg ve Al malzemeleri 460-480 °C sıcaklıkta, 60 dak sürede,  $6.5 \times 10^{-4}$  Pa vakum altında, 0,08-0,1 MPa basınca tabi tutularak difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonrasında, kaynak ara yüzeyinde  $Mg_xAl_y$  faz tiplerine rastlanmıştır. Geçiş bölgesinde Mg tarafında kübik kafes yapısına sahip  $Mg_3Al_2$  şeklinde yeni bir faz yapısı tespit edilmiştir [35].

H. Klaasen ve çalışma arkadaşlarının 2010 yılında yaptıkları araştırmada, difüzyon kaynağı ile karpit kompozit ve çelik ikili bileşiğinin üretiminde güvenilirlik konusu incelenmiştir. Çalışmada TiC bazlı kompozit malzeme ve çelik kullanılmıştır. Kaynaklı numuneler mikroyapı SEM ve EPMA ile incelenmiştir. Mekanik özelliklerin incelenmesi için kesme testi yapılmıştır. Difüzyon kaynağı denemeleri; 1100–1150 °C arası sıcaklıklarda, 6–12MPa arası basınç değerlerinde ve 12 dak difüzyon süresinde yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonrasında referans olarak kullanılan vakumlu lehimleme yöntemi yerine, difüzyon kaynağı kullanımının güvenilirliği saptanmıştır [36].

H. Kejanlı'nın 2009 yılında yaptığı çalışmada, Ti<sub>51</sub>Ni<sub>49</sub> kompozitinin Cu-Ni ara tabakalı difüzyon kaynağında sıcaklık ve sürenin birleşmeye etkisi araştırılmıştır. Difüzyon kaynakları argon koruyucu gaz atmosferinde, 5 MPa'lık dinamik yükleme ile 910-940-970°C'lik sıcaklıklarda, 40 ve 60 dak'lık sürelerde, Cu ve Ni ara tabaka kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda mikroyapı özellikleri optik mikroskop, SEM ve X-Ray analizleri ile incelenmiştir. Kaynaklı numunelere bindirme kayma ve sertlik testleri uygulanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda homojen Ti-Ni dağılımı ve yüksek ara tabaka difüzyonu gözlenmiştir. Bütün birleştirmelerde, artan sıcaklığa ve süreye paralel olarak kaynağın mekanik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir [37]. H.Kejanlı ve çalışma arkadaşlarının 2008 yılında yaptıkları araştırmada; toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Ni-Ti-Cu kompozitlerin Ni ve Cu aratabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak sıcaklığının bağlantı karakteristiği üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen, Ni-Ti-Cu kompozitlerin, Ni ve Cu aratabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak sıcaklığının bağlantı karakteristiği üzerine etkisi araştırılmıştır. Kompozit malzemeler ortalama 44±5µm boyutlarında Ni-Ti ve 37–105±5 µm boyutunda Cu tozları karıştırılarak üretilmiştir. Üretilen numunelerin difüzyon kaynakları, argon atmosferinde, 5 MPa'lık dinamik yükleme ile 60 dak'lık sabit süre, 910, 940 ve 970 °C'lik sıcaklıklarda Ni ve Cu aratabaka kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda mikroyapı özellikleri optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD analizleri ile incelenmiş, numunelere bindirme kayma ve mikrosertlik testleri uygulanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda homojen Ni-Ti-Cu dağılımı gözlenmiş ve artan sıcaklığa paralel olarak kaynağın mekanik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir [38].



H. Küçükçkara ve çalışma arkadaşlarının 2009 yılında yaptıkları araştırmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al-SiC<sub>p</sub> kompozitlerinin difüzyon kaynak kabiliyeti incelenmiştir. Bu çalışmada, toz metalurjisi (TM) yöntemiyle üretilen Al-SiC<sub>p</sub> kompozitinin 6063 Al alaşımı ile difüzyon kaynak kabiliyeti incelenmiştir. Farklı oranlarda SiC içeren Al-SiC<sub>p</sub> kompoziti 6063 Al çiftinin difüzyon kaynağı, 600 °C'de 3,5 saat ve 2 MPa basınç uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleşmelerin mikroyapı, korozyon ve mekanik özellikleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, genel olarak, kompozitin homojen bir karışıma sahip olduğu, SiC<sub>p</sub> artışıyla sertliğin arttığı ve SiC<sub>p</sub> artışıyla kesme makaslama mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Korozyon testi sonuçları ise SiC<sub>p</sub> artışıyla korozyon direncinin arttığı görülmüştür [39].

M.I. Barrena ve çalışma arkadaşlarının 2009 yılında, yaptıkları çalışmada; 90MnCrV8 yüksek dayanım çeliği ile W-Co kompozit malzemesi Cu-Ni alaşımını aratabaka olarak kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Deneyler iki adımda ve dinamik basınç yüklemesi ile yapılmıştır. İlk adımda 850 °C de, 10 dak süre ile 30±4 MPa ve 4 Hz frekansa basınç uygulanmıştır. İkinci adımda ise, 600 °C' de, 5 dak süre ile 15±4 MPa ve 4 Hz frekansa basınç uygulanmıştır. Deneyler sonucunda mikroyapı özellikleri, SEM ve XRD analizleri ile incelenmiştir. Mekanik özelliklerin incelenmesi için çekme testi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre; dinamik basınç yüklemesi ile yapılan sermet ve çeliğin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi endüstriyel uygulamalar için umut verici olduğu tespit edilmiştir [40].

T. Feng ve çalışma arkadaşlarının 2006 yılında yaptıkları araştırmada, SiC<sub>p</sub>/2014A1 kompozit malzemesini Ni aratabaka kullanarak vakumlu difüzyon kaynağı tekniği ile birleştirilmesi incelenmiştir. Deneyler 610 °C, 60 dak' da ve 1x10<sup>-3</sup> Pa vakumda yapılmıştır. Deneyler sonucunda mikroyapı özellikleri, SEM ve EPMA analizleri ile incelenmiştir. Çalışmada difüzyon mesafesi ve element konsantrasyonu arasındaki ilişki 2. Fick kanunu ile hesaplanmıştır. Difüzyon konsantrasyonu ile difüzyon kaynağı parametreleri arasındaki ilişki hesaplanmıştır. Sıcaklık ve sıcaklığı muhafaza süresi arttırıldığında difüzyon mesafesinin de arttığı tespit edilmiştir [41].

## 2. DİFÜZYON MEKANİZMASI VE DİFÜZYON KAYNAĞI

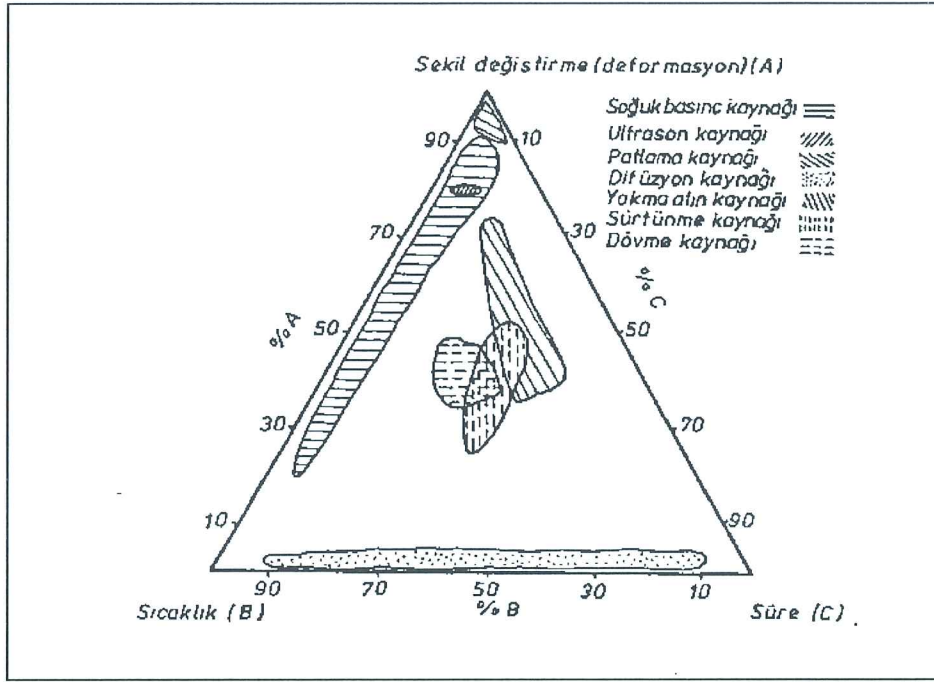
### 2.1 Giriş

Difüzyon kaynağı birbirleri ile temasta olan yüzeyler arasında minimum makroskopik deformasyon ile belirli bir süre ısı ve basınç uygulayarak, kontrollü difüzyonla oluşturulan katı hal (faz) kaynağıdır. Bu tanımdan görüleceği üzere, difüzyon kaynağının birinci aşaması, birleştirilecek parçaların, genelde bir vakum ortamında ısıtılması ve basma kuvvetinin uygulanmasıdır. İkinci aşamada ise metal atomlarının bir parçadan diğerine yayılması ve kuvvetli bir bağın oluşmasıdır. Bazı hallerde ince bir metal ara tabaka da kullanılmaktadır [42].

Difüzyon kaynağı ile temas yüzeyleri uygun bir şekilde hazırlanmış, kimyasal ve metalurjik özelliklerinin uygunluklarına dikkat edilen, bütün malzemeleri birleştirmek mümkündür. Modern teknolojinin geliştirdiği yeni malzemelerin birçoğu, bilinen kaynak yöntemleriyle birleştirilememektedir. Difüzyon kaynağı aralarında seramik ve kompozitlerin de yer aldığı, birçok yeni ve birbirleriyle birleştirilmeleri ergitme kaynağı ile mümkün olmayan demirli ve demir dışı metal ve alaşımlarının birleştirilmesini mümkün kılmıştır [43].

Uluslararası Kaynak Enstitüsü tarafından, birleştirilecek parçaların ara yüzey tabakalarında difüzyonu sağlayacak kadar yüksek sıcaklıklarda, aradaki boşlukların plastik deformasyonla kapanmasıyla atomik seviyede bağların oluştuğu bir katı hal kaynağı olarak tanımlanır [44].

Difüzyon kaynağı, kaynak yöntemlerinin sınıflandırılmasında; sürtünme kaynağı, patlatma kaynağı, soğuk basınç kaynağı ve ultrason kaynağının dahil olduğu katı hal birleştirme yöntemlerinden biridir [45,46]. Difüzyon kaynağının diğer katı hal kaynaklarının arasındaki konumu, Şekil 2.1' de gösterilmiştir [47].



Şekil 2.1: Difüzyon kaynağının diğer katı hal kaynakları ile karşılaştırılması

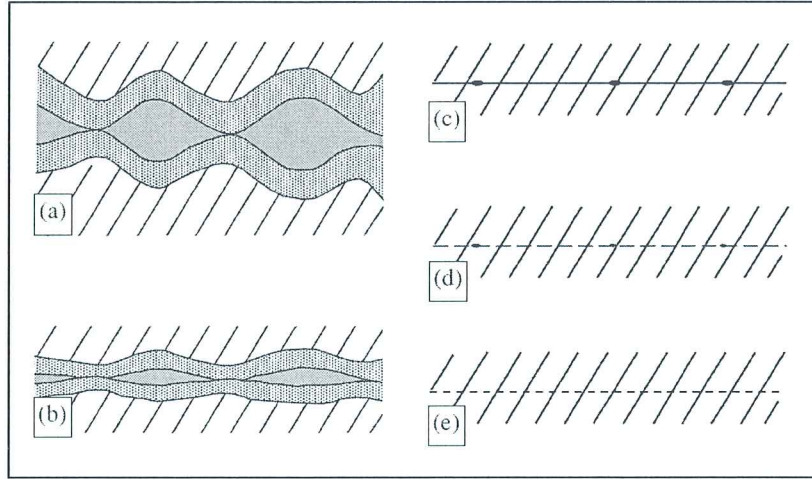
Diğer katı hal kaynağı yöntemleri ile kıyaslandığında difüzyon kaynağının, kaynak süresinin uzun olduğu, deformasyon miktarının az olduğu ve kaynak sıcaklığının düşük olduğu bilinmektedir [44].

Difüzyon kontrollü birleşme işlemini başlatabilmek için, iki yüzey artıklarından ve makro pürüzlülüklerden arındırılmış bir şekilde temas haline getirilmelidir. Bu temas, atomlar arasında bağ oluşumuna imkan verecek bir yakınlıkta olmalıdır. İlk bağ oluştuğundan sonra, sıcaklık yardımıyla difüzyon başlar ve yüzeylerin ara kesitindeki boşluklar doldurulur. Bir difüzyon kaynağı mekanizması şu şekilde genelleştirilebilir.

- 1-Yük altında plastik deformasyon,
- 2-Sürünme deformasyonu,
- 3-Difüzyon,
- 4-Yeniden kristalleşme ve tane sınır göçü.

Şekil 2.2' de difüzyon kaynağı mekanizmaları görülmektedir [63].





Şekil 2.2: Difüzyon kaynağı mekanizması

- Yüzeyler arasında ilk noktasal temas ve kalın bir oksit tabakası varlığı,
- Plastik deformasyon ve sürünme sonrası, daha ince bir oksit tabakası ve geniş boşluklar,
- Akma ve sürünme sonrası, boşluk kalıntıları ve çok ince bir oksit tabakası,
- Yüzey ve hacim difüzyonu sonrası, oksit tabakasının tamamen yok olması, küçük ve az sayıda boşluk kalıntıları,
- Tamamlanmış kaynak.

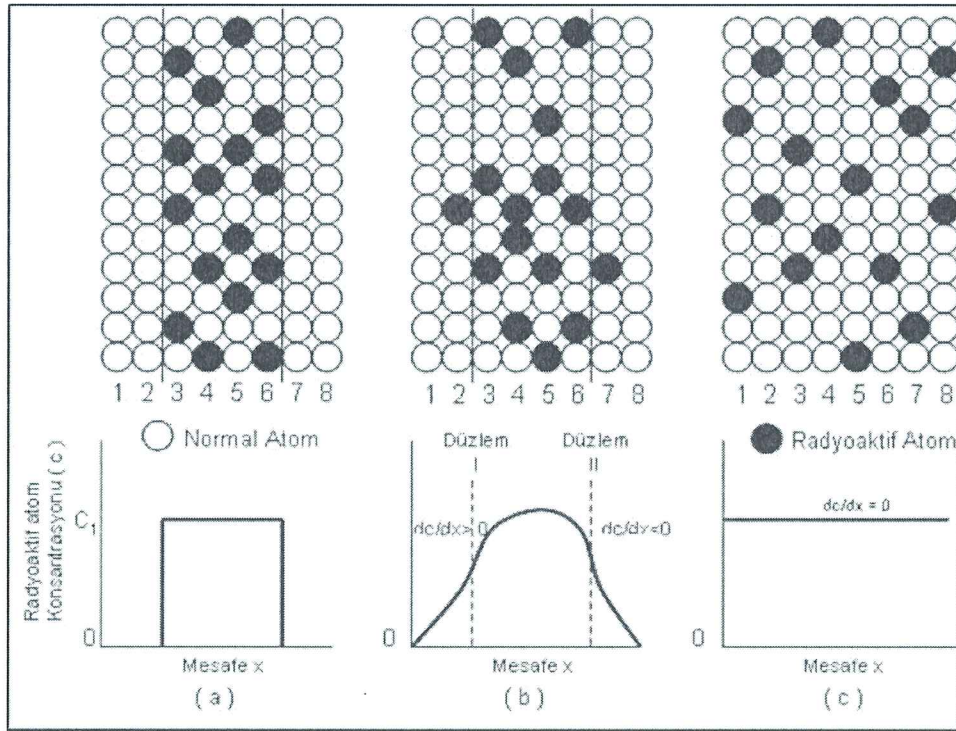
## 2.2 Difüzyon Teorisi

Atomların, moleküllerin ve iyonların sıcaklığa bağlı olarak yer değiştirmeleri sonucu meydana gelen kütle akışı difüzyon (yayınma) olarak adlandırılır [49, 50]. Difüzyon bir element atomunun başka bir elementin kafes yapısı içerisinde kendine yer bulma olayıdır. Metalurjik dönüşümlerin meydana geldiği hızı kontrol eden en temel olay atomların difüzyonudur [51]. Difüzyon, moleküllerin rast gele hareketinin meydana getirdiği, kendiliğinden oluşan yayılma, dağılma ya da madde hareketidir. Atomlar yüksek konsantrasyonda buldukları bir bölgeden konsantrasyonlarının daha düşük olduğu bir bölgeye göç ederler [52]. Bu olaya öz difüzyon denir. Öz difüzyon olayında atomların hareketi radyoaktif izotoplar ile saptanabilir. Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon olaylarına ise hetero difüzyon denir. Hetero difüzyon olayı teknik açıdan daha önemlidir. Her iki difüzyonda da atomların kafes

içindeki göçlerini sağlayacak bir enerji birikimi gereklidir [53]. Gereken enerji atomdan atoma farklılık gösterir.

En hızlı difüzyon gazlarda meydana gelir. Difüzyon, sıvı ve katılarda daha yavaş olur. Difüzyon katılarda, atomların titreşimleri ve etraflarındaki boş noktalara sıçraması ile meydana gelir. Elektrik ve magnetik atomlar gibi değişik tipte kuvvetlerin varlığı molekül hareketlerini etkileyebilir. Difüzyon, sıcaklıkla doğru orantılı olarak artar. Sıcaklık arttıkça moleküllerin hareket alanı artar ve difüzyon için gerekli olan moleküllerin yer değişim hızı artar [54].

Şekil 2.3, merkezde üniform  $C$ , radyoaktif atomlar içeren bir merkez bölgesiyle, sadece normal atomlar içeren iki komşu bölge arasındaki öz difüzyonun bir şemasıdır [49, 55].



Şekil 2.3: Metallerde öz difüzyon süreci (üstte atomik dağılım, altta difüzyon süreci içinde konsantrasyon eğrileri)

Şekil 2.3 a 'da gösterildiği gibi her atom kendi pozisyonundan, komşu pozisyonların birine atlamak eğiliminde olacaktır. Şekil 2.3 b'de gösterilen atomik dağılım, atomların atlamasından sonra oluşmaktadır. Radyoaktif atomlara gelince,

baştaki her sütunda dörder tane mevcuttur ve her atom sağa, sola, aşağıya ve yukarıya atlamak olanağına sahiptir. Atomların rast gele atlaması sütun 4 ve 5 'deki radyoaktif atom sayısını değiştirmez. Bununla birlikte, bir radyoaktif atom sütun 3 'ü terk edip sütun 2 'ye gidecek ve benzer şekilde bir atom sütun 6 'yi terk edip sütun 7 'ye girecektir. Daha ileri atlamalarla sonunda radyoaktif atomlar homojen dağılımı elde edinceye kadar (Şekil 2.3 c) yayılmaya devam edecektir. Bu aşamanın sonunda, atomlar hareketlerini sürdürseler de konsantrasyon eğrisi değişmeden kalmakta ve difüzyonu gözlemek artık mümkün olmamaktadır [21].

### 2.2.1 Enerji Konumları

İki yüzeyin birleşmesi için atomların kuvvetli bir bağ oluşumuna yetecek kadar birbirine yaklaşması gereklidir. Atomların etkileşimi için gerekli minimum enerji, şu formülle bulunur [56].

$$E = U - TS \quad (2.1)$$

$E$ = Sabit Bir Hacim İçin Serbest Enerji,

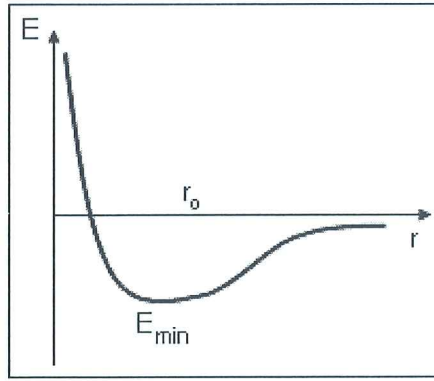
$U$ = Sistemin İç Enerjisi,

$T$ = Ara Yüzeyin Sıcaklığı,

$S$  = Ara Yüzeyin Entropisi'dir.

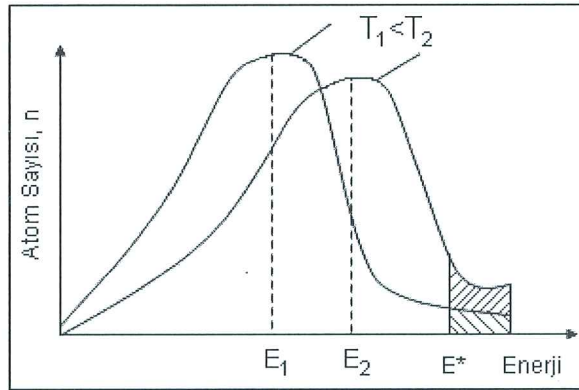
Kararlı bir sistemi oluşturmak üzere atomlar  $r_0$  mesafesi kadar yakınlaştığında mesafedeki en ufak bir artma ya da azalma enerjisi arttıracaktır (Şekil 2.4). Pratikte bu olayın gerçekleşmesi ancak özel şartlardaki örneğin iyi hazırlanmış ve yüksek vakumda (  $1.33 \times 10^{-6}$  Pa ) tutulmuş yüzeyler için geçerlidir.





**Şekil 2.4:** Atom mesafesinin bir fonksiyonu olarak potansiyel enerji değişim şeması

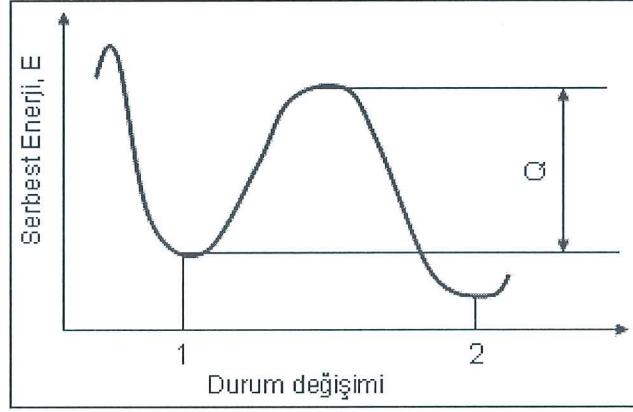
Bir kütle içinde bulunan atomlar veya moleküller herhangi bir anda aynı enerjiye sahip olmayacaklardır. Şekil 2.5 'de görülen enerji dağılımı eğrisine göre bir  $T_1$  sıcaklığında bazı atomların enerjisi sıfıra yakınken, bazılarının ki ise çok yüksek olabilir ve çoğunun ki ortalama  $E_1$  enerjisi civarındadır. Sıcaklık arttıkça ortalama enerji de artar. Uygulamada belirli bir  $E$  enerjisinden fazla enerjiye sahip atomların sayısı önemlidir. Bu da şekildeki gibi eğrinin altında kalan taralı alanla gösterilir. Sıcaklık arttıkça yüksek enerjiye sahip atomların sayısı da artar. Gazlar için verilen bu enerji dağılımı katılar için de geçerli sayılır. Katı yapı içinde yeterli düzeyde yüksek enerjiye sahip atomlar bir denge konumundan diğerine atlayarak atomsal yayını oluşturur.



**Şekil 2.5:** Atom enerjilerinin şematik dağılımı

Şekil 2.6 görüldüğü üzere atomların yer değiştirmesi kademeli olarak ve sistemin serbest enerjisinin azalması koşuluyla devam edebilir. Böylece kararlı (stabil) denge durumuna ulaşıldığında serbest enerji minimuma ulaşır (2. durum).

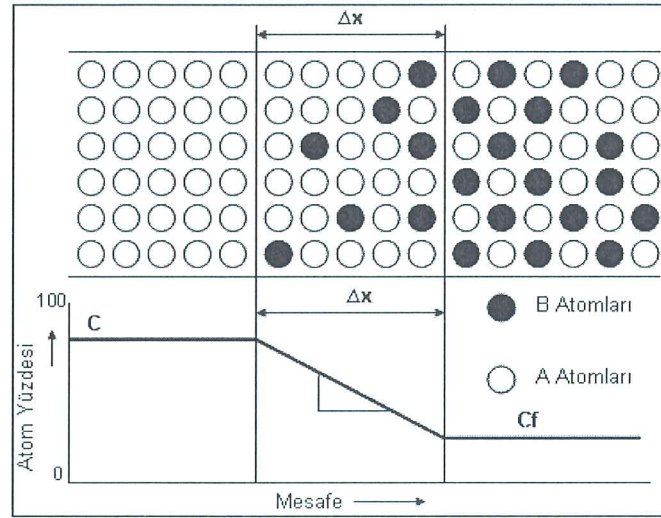
Yüksek enerjili kademeler ise (1. durum) yarı kararlı (metastabil) denge olarak adlandırılır. 1'den 2'ye geçiş için sisteme önce Q enerjisinin verilmesi gerekir, ancak o zaman serbest enerjide gerekli azalmayla 2 durumuna ulaşılabilir. Yani yaygın bir atomun bir enerji engelini aşması için atomların aktive edilmesi gerekmektedir ve bu Q değerine aktivasyon enerjisi denir [21].



Şekil 2.6: Serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı

### 2.2.2 Difüzyon Katsayısı

Difüzyon katsayısı birim yüzeyden geçen malzeme miktarının, bu yüzeye dik konsantrasyon değişimine oranıdır. Bu katsayı bilindiğinde, difüze olan ve bir sistem için konsantrasyonlar ve geçiş oranları matematiksel analizle belirlenebilir. Yaygın cismin yoğunluğunun farklı noktalarda değişik olması halinde, yüksek yoğunluklu noktadan düşük yoğunluklu alana doğru difüzyon başlar ve konsantrasyon her yerde aynı oluncaya kadar devam eder. Bunun sonucu olarak difüzyon hızı herhangi bir nokta ve yönde, yoğunluk değişimine bağlı olur. Bu nedenle difüzyon katsayısı, herhangi bir kesit alanında akan toplam kütle, bu kesite dik yöndeki mesafeyle, yoğunluk değişimine oranı olarak tanımlanır. Şekil 2.7'de konsantrasyon değişimi şematik olarak gösterilmiştir [57].



Şekil 2.7: Konsantrasyon değişiminin şematik gösterimi

X eksenine paralel bir sabit difüzyon durumunda, difüzyon katsayısını veren denklem ;  $\rho$  difüze olan cismin yoğunluğu,  $\rho$ 'da birim sürede x eksenine dikey bir düzlemdeki birim alan içinde akan kütle ise, konsantrasyon gradyanı  $-(dp / dx)$  ve  $q$ 'nun konsantrasyon gradyanına oranı difüzyon katsayısı  $D$  (2.2) formülü ile bulunur.

$$q = -D * \left(\frac{dp}{dx}\right) \quad (2.2)$$

$q$ = Birim sürede x eksenine dik bir düzlemde bir birim alandan akan kütle

$p$ = Difüze olan cismin yoğunluğu

$-\left(\frac{dp}{dx}\right)$ = Konsantrasyon gradyanı (Yoğunluk derişimi)

$D$ = Difüzyon katsayısı

olur. Ayrıca  $x$  ve  $x+dx$  mesafeleri arasında bir kütle içindeki cismin miktarının artış derecesi, iki yüzün iç ve dışındaki akış derecelerinin farkına eşit olup hidrodinamikte olduğu gibi, (2.3) denklemi yazılabilir.

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{dq}{dx} \quad (2.3)$$



Bunun sonucu olarak da difüzyon denklemi, (2.4) denkleminde verildiği şekilde olur.

$$- \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dx} * (D * \frac{dp}{dx}) \quad (2.4)$$

Difüzyon katsayısı D 'nin değeri 105 cm<sup>2</sup> /s 'den fazla 1011 cm<sup>2</sup> /s 'den azına kadar geniş sınırlar içinde değişir. Bu farklılığa bağlı olarak difüzyonun her ölçümü kendine özgü sorun ve özellikler gösterip kendi özel tekniklerini gerektirir. Örneğin, sıvılar içinde difüzyonun ölçülmesinde, konveksiyon çok rahatsızlık verici bir olayken katılarda başlıca sorun, uygun süre periyotları içinde etkinin çok ufak oluşudur. Konsantrasyon değişimlerinin ölçüldüğü analitik yöntemler de çok sayıda mevcuttur. Gazlar ya da eriyikler içinde konsantrasyon, kimyasal analiz, refraktometre, polarimetre veya kütle spektrometresi yardımıyla bulunabilir. İnce metal dilimlerinde konsantrasyon X-ışın difraksiyonu ile spektrografik olarak, radyoaktif indikatörler yardımıyla ya da kimyasal analizle saptanabilir [21].

### 2.2.3 Difüzyon Mekanizmaları

Denge konumundaki atomlar sıcaklığın artması ile birlikte titreşirler ve titreşimin şiddeti arttıkça atomlar yer değiştirirler. Katı malzemelerde atomların bir yerden başka bir yere geçmeleri difüzyon olayıdır [21]. Homojen malzemelerde, yer değiştirme olayları istatistiksel olarak düzensizdir ve bu olay esnasında kütle taşınımı görülmez. Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon ise teknik açıdan daha önemlidir [58]. Difüzyon mekanizmaları 5 gruba ayrılır.

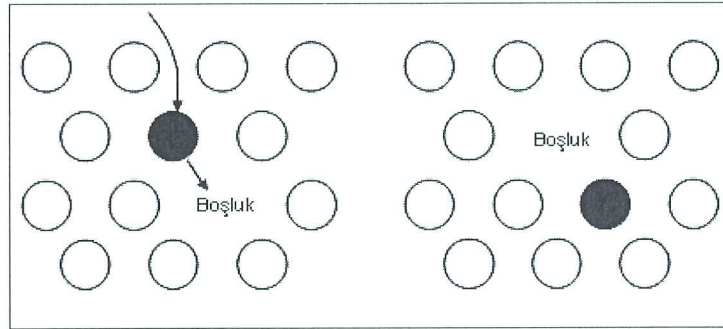
1. Yeralan mekanizması,
2. Arayer mekanizması,
3. Boşluk mekanizması,
4. Karşılıklı yer değiştirme mekanizması,
5. Halka mekanizması.

### 2.2.3.1 Yeralan Mekanizması

Bu difüzyon mekanizmasında kafes içerisinde mevcut bir boşluğun olması gerekir. Bu yüzden yeralan difüzyonunun oluşması arayer difüzyonuna göre daha zordur [54]. Yeralan difüzyonunda atomun sıçrayabilmesi için, komşu kafes noktalarından birinin boş olması gerekir. Boş yerler yardımı ile yer değiştirme çok küçük bir aktivasyon enerjisi gerektirir. Artan sıcaklıkla birlikte atomların titreşim ve boş yer yoğunluğu artar, dolayısıyla yayınma kolaylaşır [59].

Yeralan atomları genellikle bir boşluk mekanizması ile difüze olurlar. Küçük çaplı arayer atomları, büyük çaplı atomlar arasında zorlanarak ilerlerler. Normal olarak, bir arayer atomunun hareketi, komşular tarafından sınırlandırılmıştır ve atom bir başka kafes noktasına hareket edemez. Bir atomun katı içerisinde yer değiştirebilme oranı boşluk konsantrasyonuna bağlıdır. Boşluğa sıçrama ihtimali ve boşluk konsantrasyonu sıcaklıkla yakından ilişkilidir [51].

Yeralan difüzyonuna örnek olarak Cu-Ni, Au-ag, Fe-Cr, Ti-Zr gibi alaşımlar gösterilebilir. Şekil 2.8 de YMK kafes içerisinde atomun boş bir konuma hareketi gösterilmektedir [54].

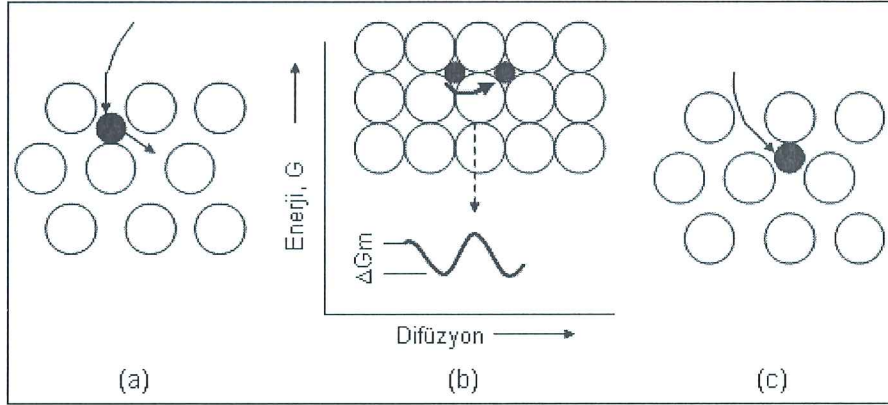


Şekil 2.8: Yeralan difüzyonu

### 2.2.3.2 Arayer Difüzyonu Mekanizması

Bu mekanizmada matriks atomları yer değiştirmezler. Sadece arayer sıkışmış atomlar yer değiştirirler. Arayerlerden birindeki bir atomun başka bir arayer pozisyonuna geçmesi atomun sıçraması ile gerçekleşir [21]. Arayer atomlarının kafes

örgüsü içindeki başka bir arayer noktasına transferi şeklinde gerçekleşen difüzyona “arayer difüzyonu” denir. Fe, Cr, Ni, Mn, W, Ti gibi geçiş elementleri B, C, H, N, ve F gibi atom yarıçapı küçük elementlerle arayer katı çözeltisi oluşturur. Malzemelerde, arayer noktaları kübik kafesin köşeleri arasındaki mesafenin ortasıdır. Bunlar oktahedral noktalar olarak bilinir. Şekil 2.9’ da arayer difüzyonunun oluşumu şematik olarak görülmektedir [57].



Şekil 2.9: Arayer difüzyonunun oluşumu

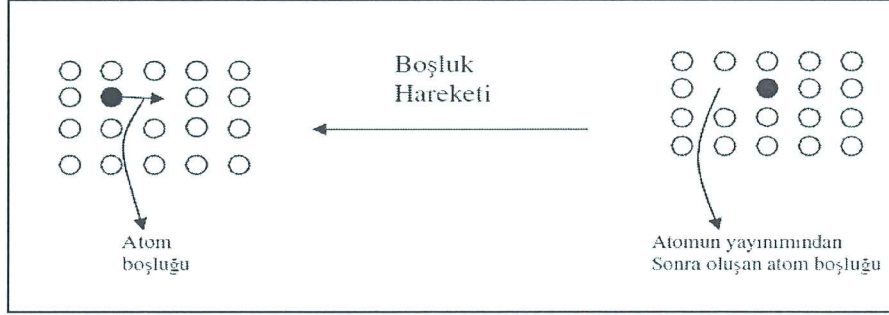
Arayer atomlarının denge pozisyonları en az potansiyel enerjiye sahip oldukları (a) pozisyonudur. Bir arayer atomunu komşu bir arayere hareket ettirmek için, komşu kafesin atomları arasından geçmeye zorlaması gerekir. Neticede (b) pozisyonunda olduğu gibi bir durum oluşur ve en yüksek enerji seviyesine ulaşır. Bu olayın gerçekleşmesi için verilen iş, sistemin serbest enerjisindeki değişimi oluşturur ve (c)’de ki gibi  $\Delta G_m$  kadar artırır.  $\Delta G$  Gibbs enerjisi olarak bilinir [54].

### 2.2.3.3 Boşluk Mekanizması

Eğer kristal kafesi içerisinde bir atom boşluğu varsa, komşu atomlardan bir tanesi kendi yerini terk ederek bu boşluğu doldurur. Hareket eden atomun kendi yeri ise boş kalır. Atomların bu şekildeki hareketlerine boşluk difüzyonu denir. Kristal kafesi içerisinde ne kadar atom boşluğu varsa, boşluk difüzyonu o kadar çok etkilidir. Metaller yüksek sıcaklıklara çıkartıldıkları zaman, atom boşlukları artmaktadır. Dolayısıyla metallerin yüksek sıcaklıklardaki difüzyonunda, bu mekanizma oldukça önemli bir rol oynar. Bu mekanizma yüzey merkezli kübik



(YMK) metallerde çok önemli bir mekanizma olduğu gibi hacim merkezli kübik (HMK) metallerde, iyonik bileşikler ve oksitler gibi hegzagonal kristal kafesi metallerde de başarılı bir yöntem olduğu gösterilmiştir. Şekil 2.10'da boşluk difüzyon mekanizması şematik olarak gösterilmektedir [59].



Şekil 2.10: Boşluk mekanizmasında atomların yer değiştirmesi

#### 2.2.3.4 Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması

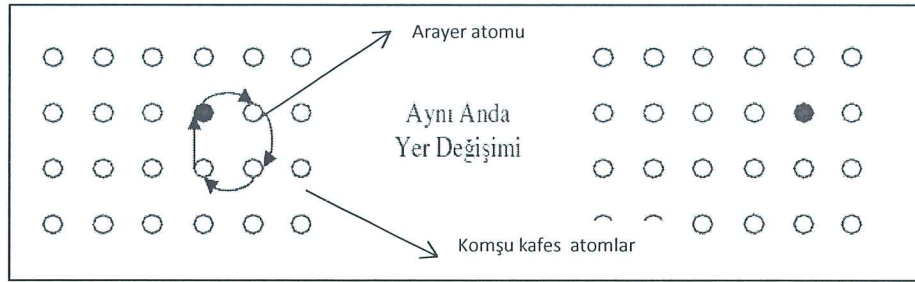
Enerji nedeniyle iki atomun karşılıklı olarak doğrudan yer değiştirme olasılığı düşüktür (Şekil 2.11). Metallerde içyapı kusurları oldukça yüksek olduğundan gerekli de değildir. Çünkü her atom iki atom çapı kadar hareket edebilir. Ayrıca mekanizmanın oluşabilmesi için kafesin bölgesel olarak çarpılması da gereklidir [21]. Şekil 2.11'de karşılıklı yer değiştirme mekanizması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.11: Atomların karşılıklı yer değiştirmesi

### 2.2.3.5 Halka Mekanizması

Metallerde en yaygın olarak boşluk ve ara yer difüzyon mekanizmaları görüldüğü halde, nadiren de olsa karşılaşılan diğer bir difüzyon mekanizması ise, halka difüzyonudur. Kristal yapı içerisinde birbirlerine temas halinde halka oluşturan atomların, aynı anda ve aynı yönde hareket etmeleri suretiyle birbirlerinin yerini almaları ve yeni konumlarına geçebilmeleridir. Şekil 2.12’de halka mekanizması modeli gösterilmiştir [57].



Şekil 2.12: Halka mekanizmasında atomların yer değiştirmesi.

### 2.2.4 Difüzyon Çeşitleri

Katı malzemelerde difüzyon 3 ana grupta toplanabilir.

- Hacimsel difüzyon
- Tane sınırları difüzyonu
- Yüzey difüzyonu

Tane sınırları malzemelerin diğer bölgelerine göre atomik seviyede hatalı birer bölge oldukları için bir difüzyon olayı tane sınırları boyunca daha kolay gerçekleşir. Tane sınırı difüzyonu tane içinde olan difüzyona göre milyon kez daha hızlı olur. Tane sınırları boyunca difüzyon için gerekli aktivasyon enerjisi de, hacim difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisinin yarısı kadar olduğu bildirilmektedir [49,52].

Bir metalin yüzeyinde atomlar, kafes içinde belli bir pozisyona daha zayıf bağlı olup, yüzey difüzyonu tane sınırları difüzyonundan da daha hızlıdır. Her ne kadar yüzey ve tane sınırları difüzyonunun hızı hacim difüzyonundan çok daha yüksek ise de, bunların toplam difüzyona katkısı, yüzey ve tane sınır bölgelerinde

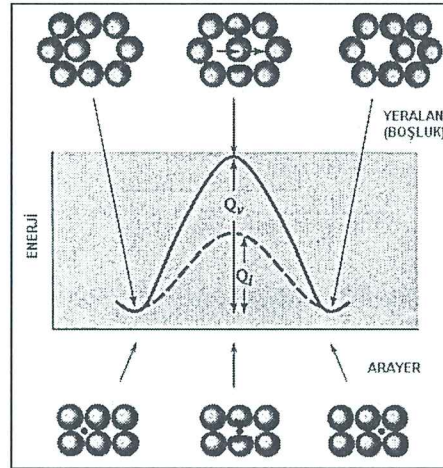
atom sayısının az olması nedeniyle daha az olur. Yüzey difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisi aşağıdaki şekilde yazılabilir [21].

$$\Delta Q \text{ Yüzey Dif.} < \Delta Q \text{ Tane Sınırı Dif} < \Delta Q \text{ Hacim Dif.}$$

### 2.2.5 Aktivasyon Enerjisi

Difüze eden bir atom yeni yerine ulaşmak için komşu atomlarını sıkıştırıp geçmek zorundadır. Bunun gerçekleşebilmesi için atomların yeni yerine geçmesini sağlayacak enerjiye ihtiyaç vardır. Bu durum Şekil 2.13 'de yer alan ve ara yer difüzyonu için şematik olarak gösterilmiştir. Burada atom, orijinal olarak nispeten kararlı konumda ve düşük enerjili haldedir. Yeni bir noktaya hareket etmek için, enerji engelini aşmak zorundadır. Bu gerekli olan enerjiye "aktivasyon enerjisi" denir ve "Q" ile gösterilir. Bu enerji engeli sınırını aşması için atomun ısıtılması gerekir.

Normal olarak bir ara yer atomunun, komşu atomları geçmek için sıkıştırması daha az enerji gerektirir. Bunun sonucu olarak da, ara yer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi, yer alan difüzyonu için gerekli alandan daha azdır. Düşük bir aktivasyon enerjisi daha kolay bir difüzyon gerçekleştiğini gösterir [58].



Şekil 2.13: Yeralan ve arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi (Q)



## 2.2.6 Difüzyon Kanunları

### 2.2.6.1 I. Fick Kanunu

Homojen olmayan malzemelerde bulunan konsantrasyon farkları buradaki parçacıkların belirli bir yönde hareket etmesine neden olmaktadır. Bu nedenle homojen olmayan malzemeler arasındaki difüzyon teknik açıdan daha önemlidir [21]. Bu olay matematiksel olarak I. Fick kanunu ile ifade edilebilmektedir.

$$JA = -D * \left( \frac{dc}{dx} \right) \quad (2.5)$$

$$JA = A \text{ atomlarının akışı } (m^2 s)^{-1}$$

$$D = \text{Difüzyon katsayısı } (m^2/s)$$

$$\frac{dc}{dx} = \text{Konsantrasyon gradyanı } (m^3/m)^{-1}$$

Konsantrasyon gradyanı malzeme kompozisyonunun uzaklık ile nasıl değiştiğini gösterir; dc, dx uzaklığındaki konsantrasyon farkıdır. Akı difüzyon sırasında birim zamanda birim alandan geçen atom sayısıdır [58].

### 2.2.6.2 II. Fick Kanunu

I. Fick Kanununa göre kararlı hal söz konusudur. Oysa ki gerçekte bu durum böyle değildir. Sabit konsantrasyon farkında kütle akışının tespitinin zor olması ve metallerde difüzyon olaylarının çözümünde I.Fick Kanununun yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle; difüzyon katsayısının deneysel tespitinde ve bir çok kullanımda II.Fick Kanunundan yararlanılmaktadır. I.Fick Kanununun II.Fick Kanununa dönüştürülmesi için, aralarında dx kadar mesafe bulunan iki paralel yüzeyle sınırlandırılmış hacim elemanı kullanılır [60]. Bu durumda konsantrasyon x ve t'ye bağımlı kalacağından, bir çok pratik problemler için (2.6) matematiksel ifadesi kullanılır. Kararlı olmayan bir yayınmayı ifade eden II. Fick kanunu, I.Fick kanunu'nun türevi alınarak çıkarılır.

$$\frac{dc}{dt} = D * \left( \frac{d^2 c}{dx^2} \right) \quad (2.6)$$

Bu denklemin çözümü bazı sınır değerlerine bağlıdır. Bu değerler (2.7) denklemindeki şekilde ifade edilir.

$$\frac{(C_s - C_x)}{(C_s - C_0)} = \text{erf}\left(\frac{x}{2 * \sqrt{D_t}}\right) \quad (2.7)$$

$C_s$  = Yüzeydeki Konsantrasyon

$C_x$  = Yüzeyden veya ara kesitten x kadar mesafedeki bir noktanın yoğunluğu

$C_0$  = Difüzyon çiftinden birinin ilk yoğunluğu

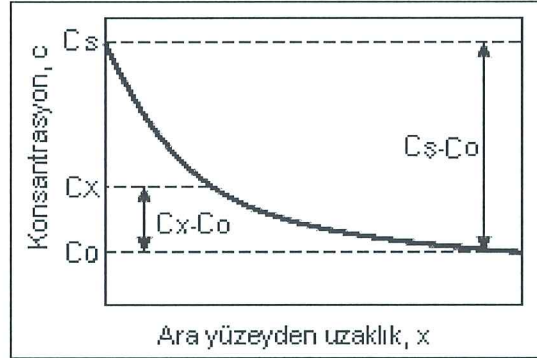
$x = C_x$ 'in ölçüldüğü noktanın yüzeye olan uzaklığı

$D$ : ortak difüzyon katsayısı

$t$ : difüzyon süresi

$\text{erf}$ : hata fonksiyonu

Denklemin fiziksel anlamına göre yayılım olayı başlangıçta çok hızlıdır. Zamanla konsantrasyon gradyanı azaldığından hız düşer ve tam homojen yapı için sonsuz süreye gerek vardır [53]. Bu eşitlikte verilen konsantrasyon parametreleri Şekil 2.14 'de konsantrasyon profili olarak görülmektedir. Burada konsantrasyon ve difüzyon mesafesi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.14: Kararsız hal difüzyonu için konsantrasyon profili

II. Fick Kanunu aşağıdaki uygulama alanlarına sahiptir:

- Çeliğin karbürleşmesi (Sementasyon),
- Çeliğin dekarbürleşmesi,
- Kaynak ve lehimleme,

- Galvanizasyon [21].

### 2.2.7 Difüzyonu Etkileyen Faktörler

- Sıcaklık,
- Konsantrasyon (yoğunluk),
- Kristal doku,
- İmpuriteler (Safılığı bozan maddeler),
- Tane boyutu.

#### 2.2.7.1 Sıcaklık

Sıcaklığın difüzyon üzerindeki etkisi çok önemlidir. Sıcaklığın her 20 °C' lik artışında difüzyon sabiti iki katına çıkmaktadır. (2.8) denkleminde sıcaklık ile difüzyon sabiti arasındaki bağıntı gösterilmektedir.

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (2.8)$$

$D_0$  = Yayınan atomların titreşim frekansına bağlı yayınma katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),

$Q$  = Aktivasyon enerjisi (kcal/mol),

$R$  = Gaz sabiti (1,987 cal/mol),

$T$  = Mutlak sıcaklık (K).

$D_0$ ,  $Q$  ve  $R$  sıcaklıktan bağımsızdır. Bir malzemenin sıcaklığı arttırıldığı zaman, difüzyon katsayısı ve atomların akısı (J) artar. Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyonu için sağlanan enerji, atomların aktivasyon enerjisi engelini aşmasını ve daha kolaylıkla yeni kafes yerlerine hareket etmesini sağlar [21, 54].

#### 2.2.7.2 Yoğunluk (Konsantrasyon)

Yoğunluk değişimi bir difüzyon çiftinde, kimyasal bileşimin mesafeye bağlı olarak değişimidir. Konsantrasyonun etkisi arayer katı eriyiklerinde daha kolay incelenebilir. Çünkü bu durumda eriyen atomların yayınmasının tesiri ihmal



edilebilir. Karbonun östenit içerisinde 927 °C sıcaklıkta eriyebilmesinin sınırı olan % 1,3 C' a kadar difüzyon katsayısında az bir değişme olduğu bilinmektedir [51].

D'nin büyük ölçüde konsantrasyona bağlı olduğu sistemlerde bile, difüzyonun hafif eriyik içinde veya küçük bir konsantrasyon alanı içinde olması kaydıyla, D'yi sabit kabul etmekle büyük bir hata yapılmış olmaz [21].

### **2.2.7.3 Kristal Yapı**

Kristal kafes yapısında sıcaklık değişimi önemli bir faktördür. Yüksek sıcaklıklarda ergimiş demirde; HMK yapıdan YMK yapıya Allotropik bir dönüşüm ile kristal yapıdaki karbon ergitebilirliğini değiştirmiştir [55,61].

### **2.2.7.4 İmpuritelere (Saflığı Bozan Maddeler)**

Difüzyonun birkaç değişkeninden biri olan alaşım elementi ya da impuritelere genellikle difüzyon üzerinde az etki yapmaktadırlar. Ancak; demir alaşımlarında diğer alaşımlara nazaran daha fazla bir etki yapmaktadır. Demir atomlarının yer değiştirme kabiliyetine, alaşım elementlerinin etkisi oldukça önemlidir ve karbon çok kuvvetli etki yapar. Ostenitte karbon miktarı yükseldiğinde, Q ve Do değerlerinin azalması ile difüzyon artar [21, 51, 54].

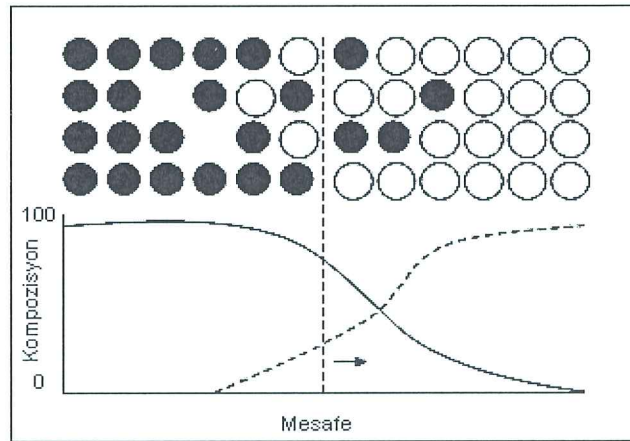
### **2.2.7.5 Tane Boyutu**

Tane sınır difüzyonu, tanelerin içindekinden daha hızlı olduğundan genel difüzyon derecesinin ince taneli metalde daha yüksek olması beklenir. Bununla birlikte alışılmış, tane boyları ölçülerinde, difüzyon hesapları yapılırken tane boyutunu hesaba katmak gerekmez [21].

### 2.2.8 Kimyasal Difüzyon (Kirkendall Olayı)

İkili bir alaşımda konsantrasyon farkı olduğunda, temas eden yüzeylerin difüzyon katsayısı farklılığından dolayı akış meydana gelir. Eğer iyi bir temas olursa difüzyon bölgesinde madde taşınımı meydana gelir [49]. Difüze eden iki atom birbirleri ile pozisyonlarını değiştirmez ancak bunun yerine boşlukları doldurarak hareket eder [51].

Kirkendall bu olayı 1947 yılında Cu ve pirinç çifti için incelemiş ve bu ikiliyi yüksek sıcaklıklarda ısıttıktan sonra teller arasındaki mesafenin arttığını gözlemlemiştir. Bu olay Kirkendall olayı olarak bilinmektedir. Kirkendall olayının etkisi Al-Au çiftinde incelenirse, alüminyum atomlarının altına difüzyonunun, altın atomlarının alüminyuma difüzyonundan daha hızlı olduğu bulunur. Sonunda daha fazla atom, orijinal alüminyum ara yüzeyinden daha çok altın tarafında bulunacaktır (Şekil 2.15). Bu sonuç orijinal ara yüzeyin önceki fiziksel konumunun, çiftin alüminyum tarafına doğru hareket etmesine neden olur. Ara yüzeyde, önce sıkışmış yabancı parçacıklar da ara yüzeyle beraber hareket ederler. Farklı difüzyon hızlarından dolayı, difüzyon çifti ara yüzeyinin hareketi Kirkendall etkisi olarak adlandırılır. Farklı malzemelerde difüzyon iki metal arasındaki orijinal ara yüzeyin kaymasına neden olur [21, 51]. Şekil 2.15’de kirkendall etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.15: Kirkendall etkisinin gösterimi

Kirkendall etkisinin incelenebilmesi nedeniyle pek çok deney yapılmıştır. Deneylemlerin sonucunda genel olarak; bir difüzyon çiftinde düşük ergime noktalı malzeme atomlarının yüksek bir difüzyon oranına (D) sahip oldukları belirlenmiştir.

Ancak  $\bar{D}$ 'nin tam değeri alaşım bileşimine bağlı olarak değişir. İki bileşenli alaşımlarda ortak difüzyon katsayısı  $D$ ; 1. Darken denklemi (2.9) ile açıklanabilir [51].

$$\bar{D} = N_B * D_A + N_A * D_B \dots \dots \left( \frac{cm^2}{sn} \right) \quad (2.9)$$

$N_A$  = A atomunun mol oranı,

$N_B$  = B atomunun mol oranı,

$D_A$  = A atomunun difüzyon katsayısı,

$D_B$  = B atomunun difüzyon katsayısı,

Arayüzeyden yavaş hızla ayrılan boşlukların denklemini ise, 2. Darken Denklemi (2.10) vermektedir [51].

$$V = (D_A - D_B) * \left( \frac{dN_A}{dx} \right) \quad (2.10)$$

$D_A$  = A atomunun doğal difüzyon katsayısı,

$D_B$  = B atomunun doğal difüzyon katsayısı,

$\frac{dN_A}{dx}$  = Kirkendall ara kesitindeki yoğunluk değişimi eğrisinin eğimi.

Genel olarak bir difüzyon çiftinde, düşük ergime noktalı malzeme atomlarının yüksek bir difüzyon hızına ( $D$ ) sahip oldukları tespit edilmiştir [50]. Belirli durumlarda Kirkendall etkisinin bir sonucu olarak ara yüzeyin hemen yakınında boşluklar oluşur [62].

### 2.3 Difüzyon Kaynağı Bağlantı Çeşitleri

Birçok benzer ya da farklı malzeme kombinasyonları difüzyon kaynağı ile bağlanabilir. Ergime noktası, yoğunluk, lineer genleşme katsayısı, kafes şekli ve kafes katsayıları farklı olduğu için farklı metal ve alaşımların birleştirilmesi zordur [21]. Bu etkileri azaltabilmek için geliştirilen difüzyon kaynağı, ara tabaka kullanılıp kullanılmamasına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:



- Katı hal difüzyon kaynağı,
- Sıvı hal difüzyon kaynağı (transient liquid phase bonding) ve difüzyon lehimleme,
- Süperplastik şekil verme-difüzyon kaynağı kombinasyonu.

### 2.3.1 Katı Hal Difüzyon Kaynağı

Katı hal difüzyon kaynağı, genellikle vakum veya argon gibi koruyucu gaz atmosferi altında yapılır. Isı radyasyonla, direkt veya endirekt rezistansla ya da indüksiyon ile sağlanır. Basınç, tek eksenli veya izostatik bir şekilde uygulanabilir. Difüzyon kaynağı mekanizmasına plastik akma katkısının az olmasından dolayı birleştirilecek yüzeylerin iyi hazırlanması gerekmektedir. Birleştirilmesi problemli olan metal ve seramik gibi uyumsuz malzemelerin, katı halde birleştirilmelerinin gerektiği durumlarda, farklı malzemelerden bir veya birkaç ara tabaka kullanılarak difüzyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ara tabaka kullanımı; parçalarda birleştirme sonrası oluşabilecek gerilmeleri azaltmaktadır [21, 57].

### 2.3.2 Sıvı Hal difüzyon Kaynağı ve Difüzyon Lehimleme

Sıvı hal difüzyon kaynağı ve sert lehimleme, geçiş sıvı faz kaynağı olarak da bilinmektedir. Bu yöntemle sadece farklı malzemelerin birleştirilmesi veya farklı malzemelerin ara tabaka olarak kullanılması durumunda uygulanabilir. Katı hal difüzyon kaynağı işlemleri sonrasında, kaynak yüzeylerinde bir bileşim değişimi oluşmaktadır. Kaynak işlemi sırasında uygulanan kaynak sıcaklığı, yeni oluşacak fazın sıvılaşıacağı şekilde seçilir. Bu durumda ara tabaka daha hızlı bir difüzyon sağlar veya yüzeyler arasındaki tam teması sağlamak için bağlantıda mikro deformasyona izin verir. Bu ince sıvı katman ana metallerin ikisinin de ergime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta birleştirme olacak şekilde araya yayılır [21, 57].

### 2.3.3 Süperplastik Şekil Verme ve Difüzyon Kaynağı Kombinasyonu

Süperplastik şekil verme ve difüzyon kaynağı (SPF-DK) kombinasyonu özellikle uzay endüstrisi için geliştirilmiştir. Bu kombinasyon o kadar önemlidir ki, farklı bir difüzyon kaynağı işlemi olarak değerlendirilir. Bu yöntem özellikle belirli yükleme hızı şartlarında, yüksek sıcaklıklarda, süperplastik özellik gösteren Ti ve alaşımlarında ticari olarak uygulanmaktadır. Süperplastik şekil verme sıcaklık ve basınç şartları, difüzyon kaynağı için gerekli şartlarla benzerlik gösterdiğinden iki işlem tek üretim işlemi haline getirilmiştir [21, 57,73].

### 2.4 Difüzyon Kaynağına Etki Eden Faktörler

Difüzyon kaynak yönteminin temel parametreleri sıcaklık, süre ve basınçtır. Ancak birleştirilecek parçaların yüzey şartları ve kaynak atmosferi de birleştirme kalitesine etki eden önemli faktörlerdir. Difüzyon kaynağında sıcaklık, deformasyona, oksit çözünürlüğüne, allotropik dönüşüme, yeniden kristalleşmeye, difüzyona ve işlemin kısa sürede oluşmasına etkili olduğundan en önemli parametredir.

#### 1. Kaynak şartları

- Sıcaklık,
- Zaman,
- Basınç,
- Yüzey şartları,
- Çalışma ortamı.

2. Birleştirilecek malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri: Mekanik özellikler, kristal yapıları, tane boyutu, atom yarıçapı, yeniden kristalleşme sıcaklıkları ve yüzey enerjileri.

3. Metalürjik özellikler: Farklı metal ya da malzeme çiftlerinin karşılıklı çözünürlüğü ve metaller arası bileşik teşekkülü.

### 2.4.1 Kaynak Sıcaklığı

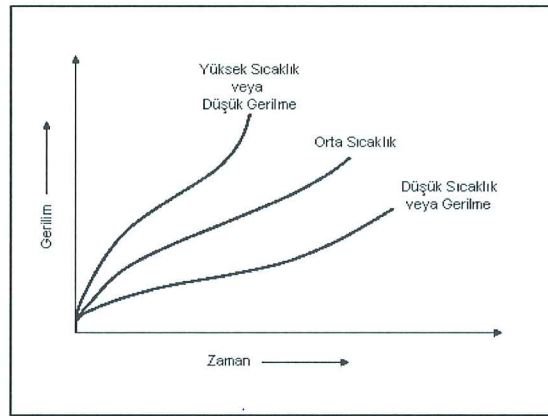
Difüzyon kaynağında sıcaklık, deformasyon oksit çözünürlüğü, allotropik dönüşüm, yeniden kristalleşme, sürünme; difüzyonun en önemli kaynak parametreleridir. Sıcaklık arttıkça ana malzemelerin akma gerilmeleri azalır. Böylece hem ilk deformasyon hem de yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır. Dolayısıyla kaynak için gerekli temas alanını elde etme süresi azalır. Difüzyon kaynağı sıcaklığının tespitinde pratikte (2.11) denklemi kullanılır.

$$T_k = (0,5 - 0,7) * T_m \quad (2.11)$$

$T_k$  = İşlem sıcaklığı

$T_m$  = Metalin ergime sıcaklığı

Difüzyon kaynağında sıcaklık kadar ısıtma ve soğutma hızı da önemlidir. Endüstriyel çalışma için 50 °C/dak'lık ısıtma hızı olumlu sonuçlar verirken, farklı metallerin birleştirilmesinde doğrusal ısıl genleşme katsayılarına bağlı olarak 15°C/dak'lık bir maksimum ısıtma hızı önerilmektedir. Sıcaklık arttıkça ana malzemelerin akma gerilmeleri azalır. Böylece hem ilk plastik deformasyon, hem de yüzey pürüzlerinin şekil değiştirmesi kolaylaşır. Dolayısıyla kaynak için gerekli temas alanını elde etme süresi kısalmıştır. Şekil 2.16' da uygulanan basınç ve sıcaklığın sürünme eğrisine tesiri görülmektedir [51].

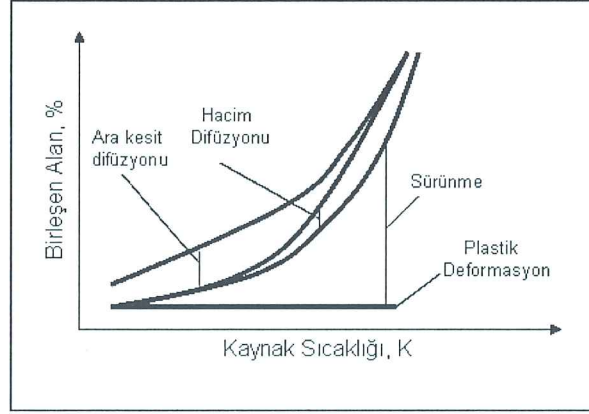


Şekil 2.16: Sıcaklığın sürünme eğrisine etkisi

Pratikte difüzyon kaynağında kullanılan sıcaklığın değeri malzemenin mutlak ergime sıcaklığından daha küçük olan sıcaklık değerleridir. Bu sıcaklığın, mümkün



olduğu kadar yüksek, sabit ve üniform olarak uygulanması gerekir [66]. Şekil 2.17'de sıcaklığın birleşme alanı üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 2.17: Sıcaklığın birleşme alanı üzerindeki etkisi

#### 2.4.2 Kaynak Basıncı

Basınç difüzyon kaynağı için önemli bir değişkendir. Basınçla malzemedeki difüzyon oranı kontrol edilir. Difüzyon kaynak işleminde basınç uygulanmasının ana sebebi, yeterli birleşme olması için iki yüzeyin tam temasını sağlamaktır. Yeterli basınç, normal boşluk alanlarını doldurmak için plastik akışın, deformasyonun oluşmasını engelleyecek miktarda olması gerekir. Basınç çok düşük olursa, küçük boşluklar ara yüzeyde kalır ve kaynaklı birleştirmenin mekanik ve mikro yapı özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Basınç uygulanmasının ikinci bir fonksiyonu da, birleşme ara yüzeyinde temiz bir ara yüzey elde etmek için yüzey oksitlerinin kırılmasını sağlamaktır [21,66].

Kaynak sırasında uygulanan basıncın difüzyon kaynağına etkileri şunlardır.

- Yüzey pürüzlerinin plastik akmasına yardımcı olur,
- Çözülmesi mümkün olmayan yüzey oksitlerini kırar ve metalin metale temas alanını artırır,
- Birleşecek yüzeyleri birbirlerine atomlar arası mesafede yaklaştırarak, atomlar arası çekim kuvvetlerinin faaliyete geçmesini temin eder,
- Difüzyon için kimyasal potansiyel farkı meydana getirir.

Uygulanacak basınç, yüzey pürüzlerinin sürünme hızı ve plastik deformasyonunu arttıracak kadar büyük, kaynak edilecek parçaların makroskobik deformasyonuna yol açmayacak kadar küçük seçilir. Kaynak basıncı, birleştirilecek parçaların plastik hacim deformasyonunu en aza indirmek için, akma gerilmesinin belirgin şekilde altında tutulur. Uygulanacak basınç izostatiktir. Basıncın uygulama hızının kaynak deformasyonu veya mukavemeti üzerinde herhangi bir tesiri yoktur. Temas alanındaki deformasyon miktarı arttıkça difüzyon hızı da artmaktadır [65].

### 2.4.3 Kaynak Süresi

Kaynak süresi kaynak kalitesini tek başına belirleyici bir etken değildir. İyi bir kaynaklı bağlantı elde etmek için gereken süre; sıcaklık ve basınca bağlıdır. Sıcaklık ve basınç artırılarak süre kısaltılabilir. Birleştirilecek alanın kirli olması, sıcaklığın düşük olması durumlarında kaynak süresi artmaktadır [51].

Kaynak süresi gerekenden az olduğunda kaynaklı birleştirmenin kalitesi düşebilmekte, gerekenden daha uzun süre uygulandığında ise metaller arasında bileşik oluşumu ya da tane büyümesi gibi istenmeyen durumlar meydana gelebilmektedir [51].

Sabit basınç ve sıcaklıkta, kaynak süresini arttırılarak, kaynaklı bağlantı mukavemeti bir miktar arttırılabilmektedir [65].

Difüzyon zamanı sıcaklıkla yakından ilişkili olup, difüzyon kontrollü birçok reaksiyon, zamanla değişmektedir. Difüzyon mesafesi  $X$ , difüzyon işlemi sırasında ortalama nüfuz eden atom mesafesidir ve (2.12) denklemi ile ifade edilir [67].

$$X = C * \sqrt{D * t} \quad (2.12)$$

$X$ : Difüzyon mesafesi,

$D$ : Difüzyon katsayısı,

$t$ : zaman (saniye (s)),

$C$ : Bir sabit .

#### 2.4.4 Yüzey Şartları

Difüzyon kaynağı uygulamalarında yüzey şartlarının kaynak işlemine olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu etkileri şu şekilde sıralayabiliriz.

- Yüzey pürüzlülüğü,
- Yüzey filmleri,
- Yüzey artıkları .

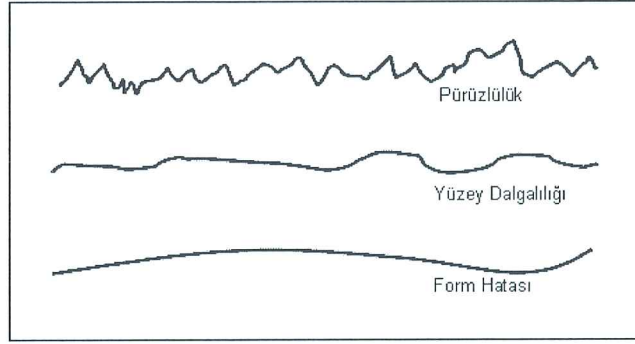
Difüzyon kaynağında, kaynak edilecek malzemelerin yüzey şartları iki metal arasında temasın sağlanması ve dolayısıyla kaliteli kaynak edilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle kaynak işleminden önce birleştirilecek olan numunelerin kaynak yüzeyleri dikkatli bir şekilde hazırlanmalıdır.

Yüzey hazırlama işleminde yüzeydeki pürüzlülüklerden, film ve artıklardan kurtulmak için numuneler bilenir, taşlanır, zımparalanır, parlatılır ve alkol ya da aseton gibi kimyasal bir arındırıcı yardımı ile birleşme yüzeyi istenmeyen artıklardan temizlenir. Pürüzlülüklerin giderilmesi ve yüzeyin çok düzgün olması, numunelerin birleşme yüzeyinin alın altına tam olarak oturması çok önemlidir.

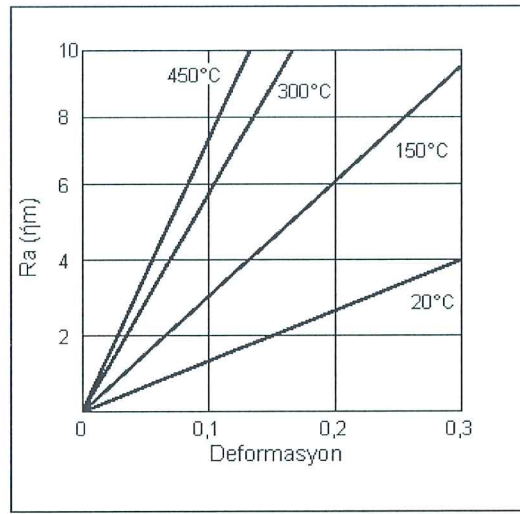
Pürüzlülük, yüzeyler arasında tam temasa ulaşmak için gereken süreyi etkiler. Pratikte bir metal, yükseklik ve dalga boyu küçük olan bir yüzey pürüzlülüğüne sahiptir, yani yüzey dalgalılığı hakim özelliştir. Difüzyon kaynağında ise, özellikle, uzun dalga boyuna sahip olan pürüzler önemlidir. Çünkü; difüzyon kaynağının kendisi sıcaklık ve mesafeye bağlı olduğundan, boşlukların yok edilmesi için hem çok yönlü basınç uygulaması, hem de uzun zamana gerek olmaktadır [21, 51, 54, 65].

Yüzey pürüzleri 1. safha sonundaki kalıntı gözeneklerinin başlıca sebebidir. Pürüzlülük, sıcaklık ve deformasyonla artarak, tane sınırı hareketine katılmaktadır. Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'da sırasıyla, yüzey kusurlarını ve pürüzlülüğün sıcaklıkla değişimini göstermektedir [68].





Şekil 2.18: Yüzey kusurları



Şekil 2.19: Yüzey deformasyonu ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı değişme

Yüzey artıkları deneysel değişkenler olmakla beraber, hemen hemen bütün yüzeylerde, bazı şekillerde mevcuttur. Bunlar iki gruba ayrılırlar.

- Normalde çok kırılman olan oksit filmleri,
- Yağ, gres, toz gibi organik ya da inorganik tabakalar.

Oksit filmleri; yaklaşık olarak 10-20 atom mertebesinde bir derinliğe nüfuz eden tabakalardır. Bütün sıcaklık değerlerinde  $H_2O$ ,  $CO_2$  ve  $SO_2$  gibi gazlar, oksit film kalınlığını arttırmaktadır. Oksit tabakaları birleşecek yüzeylerin temasını önleyip, birleşme esnasında difüzyon yoluyla sinterlemeye yol açarak, bağ teşekkülünü geciktirir ve ara kesitte tane sınırı difüzyonunu engelleyerek, boşluk kalmasına sebep olur [54, 70]. Oluşması muhtemel makro, mikro ve başlangıç teması boşluklardan sonuncusunun sebebi oksit filmleridir [54, 68].

Yağ giderme, yüzey temizleme işleminin genel bir parçasıdır. Alkol, trikloretilen, aseton, arıtıcılar ve diğer birçok temizleme aracı kullanılabilir. Genellikle tavsiye edilen yağ giderme teknikleri karışıktır ve çeşitli çözücülerde kademeli olarak asitle temizleme işlemlerini kapsar. Bu temizleyicilerin bazıları zehirli olduğundan kullanıldıklarında emniyet için tedbirler alınmalıdır [54, 64].

#### 2.4.5 Çalışma Ortamı (Kaynak Atmosferi)

Difüzyon kaynak işlemi sırasında, kaynaklanacak malzemelerin birleşme yüzeyinde oksitlenme oluşmaması için koruyucu atmosfer oluşturmak gereklidir. Kaynak sırasında vakum yapılarak ve veya bir soy gaz kullanılarak içerideki ortamın oksijenden arındırılması sağlanmaktadır.

Soy gaz olarak argon, azot ve helyum gazlarından herhangi birisi kullanılabilir. Oksijen miktarını en aza indirmeye yardım eden hidrojenin indirgeyici bir atmosfer ortamı olduğu düşünülebilir. Ancak hidrojen, titanyum, zirkonyum, kolombiyum ve tantal alaşımlarında hidrat oluşturduğundan bu malzemelerin kaynağında tercih ve tavsiye edilmez [65].

Soy gazlar atmosferdeki oksijenin tesirini belli bir dereceye kadar azalttığından, kararlı oksitlere sahip metallerde vakum kullanılmaktadır.  $1,3 \times 10^{-3}$  Pa' dan daha fazla bir vakum oksit filmlerinin çözünmesini sağlayabilmekte ise de uygulamada  $1,3 \times 10^{-2}$  ile  $1,3 \times 10^{-5}$  Pa' lık basınçlar altında difüzyon kaynağı yapılmaktadır [65].

#### 2.4.6 Birleştirilecek Malzemelerin Tane Boyutları ve Mikroyapıları

Difüzyon kaynağına tesir eden birçok metalurjik faktör mevcuttur. Mikroyapı, tane boyutu, ara metal kullanımı en fazla etki oluşturan faktörlerdir.

Çift fazlı titanyum alaşımları üzerinde yapılan araştırmalar farklı mikro yapıların farklı sürünme hızına sahip olduğunu göstermiştir. Bu yapılar;

- İnce taneli küresel,

- Lamelli,
- Tabaka tipi olmak üzere üç grupta incelenir [21].

Difüzyon kaynağı için en ideal yapının ince taneli yapı olduğu tespit edilmiştir. Bu yapı süperplastik alaşımlarda mevcuttur. Tabaka tipi yapıda tane sayısı arttıkça sürünme hızı azalmakta ve sonuçta ara kesitte boşluklar kalmaktadır. Lamelli yapının, diğer iki yapı ile karşılaştırıldığında daha düşük sürünme hızına sahip olduğu görülür. İki fazlı alaşımlarda, iki fazın oranı difüze olabilme ve sertlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek difüzyon hızına sahip fazın, düşük difüzyon hızına sahip faza oranı, sıcaklığın tesiriyle arttıkça bağ oluşumu olumlu yönde etkilenmektedir [21].

## 2.5 Difüzyon Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Malzemeler

Endüstrinin gelişmesi nedeni ile çok farklı uygulama alanlarında kullanılacak olan malzemelerin özel birleştirilme yöntemlerine ihtiyacı doğmuştur. Bunun yanısıra malzeme bilimindeki gelişmeler, farklı malzemelerin ortaya çıkması da üretimde özel tekniklerin kullanımı ihtiyacını doğurmuştur.

Difüzyon kaynağı uygulaması ile pek çok uygulama alanlarında farklı amaçlarla kullanılan malzemeler; birbiri ile ya da farklı malzemeler ile birleştirilmesi mümkündür. En başarılı ve yaygın uygulama titanyum alaşımlarından uçak parçaları yapımında görülmektedir. Son zamanlarda Ti-alüminidleri, yüksek mukavemetli Al-alaşımları, Ni-esaslı alaşımlar, Cu malzemeler, çelik malzemeler, metal-matrisli kompozitler ve seramik malzemeler difüzyon kaynağıyla birleştirilmiştir [1-56].

Benzer olmayan metal ve alaşımlarda, kaynak sonrası birleşme bölgesinde kırılma intermetalik faz oluşuyor ya da yeniden ergime ile malzeme gevrekleşiyorsa, ya da dayanım azalıyorsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir [21,54]. Metal ve alaşımlarının difüzyon kaynak yöntemi ile ara yüzey levhasız ve ara yüzey levha kullanılarak kaynak edilebilirliği Tablo 2.1' de görülmektedir [71]. Difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka malzemeleri Tablo 2.2' de görülmektedir [57].



**Tablo 2.1:** Metal ve alaşımlarının difüzyon kaynak yöntemi ile ara yüzey levhasız ve ara yüzey levha kullanılarak kaynak edilebilirliği

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	x	x		x		x		x				x					x	x	x	x						1	
2		x			x	x						x									x					2	
3																x								x		3	
4				x				x		x																4	
5	x	x			x	x		x	x	x			x						x	x	x				x	5	
6						x		x																		6	
7							x		x																	7	
8								x	x	x	x	x		x	x	x				x	x					8	
9					x			x	x	x	x	x			x	x	x			x	x	x	x		x	x	9
10									x	x				x	x	x				x	x			x		x	10
11											x									x	x						11
12												x															12
13	x												x								x						13
14										x					x	x				x					x	x	14
15					x											x			x	x	x			x	x		15
16					x												x			x				x			16
17	x																	x									17
18																			x								18
19	x				x			x	x	x					x					x		x			x		19
20	x			x				x	x						x					x				x	x		20
21									x											x	x	x					21
22																							x			x	22
23																											23
24									x		x					x					x				x		24
25																											25
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	Alüminyum ve alaşımları														14	Tantal ve alaşımları											
2	Berilyum ve alaşımları														15	Titanyum, zirkonyum ve alaş.											
3	Krom ve alaşımları														16	Tungsten ve alaşımları											
4	Kobalt ve alaşımları														17	Uranyum ve alaşımları											
5	Bakır ve alaşımları														18	Vanadyum ve alaşımları											
6	Altın ve alaşımları														19	Düşük karbonlu çelikler											
7	Magnezyum ve alaşımları														20	Paslanmaz çelik											
8	Molibden ve alaşımları														21	Dökme demir											
9	Nikel ve alaşımları														22	Karbürler											
10	Niobyum ve alaşımları														23	Grafit											
11	Paldyum ve alaşımları														24	Seramikler											
12	Platin, İndiyum ve alaşımları														25	Cam											
13	Gümüş ve alaşımları																										

**Tablo 2.2:** Difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka malzemeleri

Metal 1	Ara Tabaka	Metal 2
Molibden	Titanyum	Molibden
Mo-% 0.5 Ti	Titanyum	Mo-% 0.5 Ti
Tungsten	Niobyum	Tungsten
Niobyum	Zirkonyum	Niobyum
Tantalyum	Zirkonyum	Tantalyum
Yüksek Alaşımli Çelik	Berilyum	Yüksek Alaşımli Çelik
Yüksek Alaşımli Çelik	Niobyum- Berilyum	Yüksek Alaşımli Çelik
Titanyum	Molibden	Bakır
Titanyum	Niobyum	Bakır
Molibden	Nikel	Yüksek Alaşımli Çelik
Zircaloy	Bakır	Zircaloy
Berilyum	Altın	Bakır
Berilyum	Ag-Cu	Bakır
Berilyum	Ag-Cu-In	Bakır
Aliminyum	Bakır	Kovar
(%53 Fe, %29 Ni, %17 Co)		

Difüzyon kaynağının en yaygın uygulandığı malzeme titanyum ve titanyum alaşımlarıdır. Titanyum, yüksek sıcaklıklarda kendi oksitlerini yüzey artıklarını çözme kabiliyeti, ara malzemesiz de kaynaklanabilmesi ile difüzyon kaynağı uygulamalarında oldukça elverişlidir. Kaynak birleşme yüzeylerinde yüzey temizliğine ihtiyaç olmaması da difüzyon kaynağı uygulamasını kolaylaştıran başka bir etkidir. Ancak ergitme kaynağı uygulamasına uygun olmayışı da bu malzemenin katı hal kaynağı uygulamasını zorunlu kılmaktadır.

Nikel esaslı alaşımlar, süper plastik malzemelerin titanyumdan sonraki en önemli grubudur. Nikel esaslı alaşımların difüzyon kaynağıyla birleştirilip, süper plastik olarak şekillendirildiği gösterilmiştir.

Kısa veya uzun fiberli, metal matrisli kompozitlerin, seramiğin seramikle ve metallerin seramiklerle difüzyon kaynağında, son yıllarda önemli ilerlemeler sağlanmıştır.

Seramiklerin ( $Al_2O_3$ , SiC,  $Si_3N_4$ ) difüzyon kaynağı, seramiklerin mükemmel korozyon ve aşınma dirençleri, yalıtım özellikleri nedeni ile pek çok alanda kullanılması sebebiyle, difüzyon kaynağı uygulamaları araştırılmaktadır.

Alüminyum ile metalürjik olarak uyum göstermeyen bakır arasında da pek çok difüzyon kaynağı uygulaması yapılmıştır [21,54,65].

### 2.5.1 Difüzyon Kaynağının Uygulama Alanları

Difüzyon kaynağı birçok üstünlüklere sahip bir özel kaynak yöntemidir. Kullanım alanları şunlardır.

- Genel mühendislik,
- Havacılık ve uzay sanayi,
- Nükleer sanayi,
- Elektronik sanayi .

Genel mühendislik alanında difüzyon kaynağı; kaynak çatlama ve gevrek metallere arası kaynak sonrası istenmeyen yapıların oluşumu durumlarında kullanılmaktadır. Genel mühendislik alanında kullanımına örnek olarak; yüzey kaplama, kompleks parçaların birleştirilmesi, döküm ve dövme parçalarda difüzyon kaynağı uygulamaları verilebilir.

Havacılık sanayinde difüzyon kaynağı; daha ucuz, daha verimli, daha hafif ve difüzyona daha yatkın parçaların üretimini mümkün kılarak, havacılık sanayinin gelişimine yardımcı olmaktadır. Havacılık sektöründeki imal edilen parçalara örnek olarak; uçak türbin kanatları, bombardıman uçakları için patlama lülesi, F15 füze yuvaları, uçak iniş kapısı, rüzgar kanatçıkları, pistonlar, silindir blokları, hidrolik elemanlar verilebilir [48, 51.54, 71].

Silah sanayi difüzyon kaynağı uygulamalarında amaç ise; diğer tekniklerle daha ekonomik ve entegre olarak üretilemeyen yapı ve elemanları üretmektir.

Nükleer sanayinde difüzyon kaynağı uygulamaları çok yaygın kullanılmamaktadır. Reaktörlerde kullanılan çeşitli ekipmanların üretimi bu yöntemle yapılabilmektedir.

Elektronik sanayinde ise; elektronik devre üreticileri silikon bir parçadan entegre devre üretildikten sonra, çipin bir alt tabakaya bağlanması, çip ve devrelerin



elektrikli iletken malzemelerle bağlanması gibi işlemlerde difüzyon kaynağı uygulamaları kullanılmaktadır.

Mikro elektrik sanayinde, silikon çiplerin bakır veya nikel- demir esaslı led çerçevesine altın ara tabaka kullanılarak bağlanmasında kullanılmaktadır.

Plastik sanayinde difüzyon kaynağı; ekstrüzyon hatlarında kullanılan basınca dayanıklı ve sızdırmaz enjektörlerin üretiminde kullanılmaktadır [48, 51.54, 71].

## **2.6 Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Metotlarıyla Karşılaştırılması**

Difüzyon kaynağı diğer kaynak metotlarıyla kıyaslandığında pek çok avantajlı yönüyle sanayide ve mühendislik uygulamalarında tercih edilen özel bir kaynak metodudur. Diğer kaynak metotlarından çok farklı özellikleri ile ayrılan bir yöntemdir. Avantajlarının yanısıra, uygulanması sırasında problem oluşturan bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar nedeni ile diğer kaynak yöntemlerinin yerini alması güçtür. Ancak; özel kaynak problemlerinin çözümünde oldukça etkilidir.

### **2.6.1 Difüzyon Kaynağının Avantajları**

1. Difüzyon kaynağı, çok farklı malzemelerde homojen ve gerilmemiş bağlantılar hazırlanmasını mümkün kılar. Diğer kaynak yöntemlerinde en büyük problem, oluşan gerilmelerin fazlalığı ve ısı sebebiyle malzemede meydana gelen mikro yapı bozukluklarıdır. Difüzyon kaynağında bu problemler büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır.
2. Birleştirme esnasında, ana malzemede istenmeyen metalürjik yapıların oluşma ihtimali difüzyon kaynağında düşüktür. Ana malzemede oluşan bu istenmeyen metalürjik yapılar malzeme yapısını bozmakta ve kötü bir kaynak elde edilmesine sebep olmaktadır.
3. Bazı malzemelerin ergitme kaynağı ile birleştirilmesi mümkün olamamaktadır. Ergitme kaynağında ısının tesiri altındaki bölgede malzemelerin ergimesi

sebebiyle malzeme mikro yapısı değişmektedir. Bu da homojenliği bozmaktadır. Homojenlik söz konusu olduğunda difüzyon kaynağı tercih edilmelidir. Çünkü difüzyon kaynağı, malzemeler arasındaki potansiyel farkıyla yapılan bir katı hal birleştirme kaynağıdır.

4. Difüzyon kaynağı, herhangi bir özel ihtiyaca cevap vermeyen farklı yüzey geometrilerine sahip parçaların birleştirilmesini mümkün kılar. Birleşme süresi, bağlantı alanından bağımsızdır. Dolayısıyla bir kerede geniş alanı ya da karmaşık şekilli bağlantılar birleştirilebilmektedir. Bununla beraber basınç uygulanması sınırlayıcı bir faktör olabilir.
5. Malzemeler katı halde birleştirilir. Metalürjik şartlar genellikle uygun ve kolayca etkilenebilir durumdadır. Çünkü çekme az, gerilmeler küçüktür. İşte bu durum da difüzyon kaynağını diğer kaynak yöntemlerinden ayırır.
6. Difüzyon kaynağı, uzay (yerçekimsiz) ortamında bile iyi bir birleştirmeye imkân sağlamaktadır. Fakat bununla birlikte koruyucu gaz atmosferi kullanılması da kaynak kalitesinin daha iyi olmasını sağlar.
7. Parçalardaki deformasyon, difüzyon kaynağında çok küçük sınırlar içerisinde tutulabilir, dolayısıyla da pek çok uygulamada ikinci bir işleme gereksinim duyulmaz. Ergitme kaynağında öngörülen deformasyonlar, ön ve son tavlama ihtiyaçları, bu teknikte görülmez.
8. Kaynak işlemi, difüzyon kaynağında tam otomatik hale getirilebilir. Dolayısıyla, kalifiye eleman ihtiyacı diğer kaynak yöntemlerine göre azalır.
9. Metalürjik açıdan uyumsuz ve birbirinden tamamen farklı iki metal ya da bir metalle, metal olmayan bir malzeme birleştirilebilir.
10. Katı hal kaynakları ile kıyaslandığında difüzyon kaynağı, esas itibari ile difüzyon kontrollü bir tekniktir.
11. Seramik ve kompozitlerin, metal ve diğer malzemelerle birleştirilmesinde, günümüzde en verimli ve en etkili metottur. Seramiklerin kaynak tekniğini belirleyen en önemli faktör, bu malzemelerin gevrekliğidir. Bu durum, kaynakta deformasyon kullanmanın mümkün olmadığı anlamına gelir. Dolayısıyla, seramiklerin kaynağında difüzyon kaynağı katı hal kaynakları içerisinde mümkün olan en iyi metottur [21,54, 65].

## 2.6.2 Difüzyon Kaynağının Dezavantajları

1. Diğer kaynak yöntemlerine göre donanım maliyeti yüksektir.
2. Çok temiz ve hassas yüzey hazırlanmasına ihtiyaç gösterir ve koruyucu (gaz) atmosferi gerektirir.
3. Bu kaynak işleminde bazen çok uzun süreler gerekebilir.
4. Özel bir kaynak hücresi gerektiği için, parça boyutları büyüdükçe maliyet artar.
5. Metalürjik açıdan dikkat edilmesi gereken en önemli yönü ise, ara kesitte metallar arası bileşiklerde ara fazların oluşması ihtimalinin yüksek oluşudur [21,54,65].

## 2.7 Difüzyon Kaynaklı Bağlantıların Muayene Yöntemleri

Difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin bağlantı özelliklerinin ve kalitesinin incelenmesi için tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere iki grup muayene yöntemi uygulanır.

### 2.7.1 Tahribatlı Muayene Yöntemleri

Bu yöntemlerle muayene, kaynaklı malzemenin tahrip edilmesi ile gerçekleşmektedir. Tahribatlı muayene yöntemlerinin belli başlıcaları şunlardır.

- Çekme testi,
- Bindirme kayma testi,
- Kesme testi,
- Darbe testi,
- Eğme testi.

Çekme testi uygulanabilmesi için kaynaklı malzemenin çekme numunesi yapılmış özelliğine sahip olması gerekmektedir. Bazı malzemeler bu işlemin yapılmasına uygun değildir.

Bindirme kayma testi levha şeklindeki malzemelerin kaynak mukavemetinin tespitinde kullanılır.



Darbe testi ise genellikle elik malzemelerin mukavemetinin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Uygulama sırasında bazı zorlukları bulunmaktadır.

Kesme testi, kompozit malzemelerin ve seramik malzemelerin kaynak işlemi sonrasında, birleşme yuzyeyinin mukavemet özelliklerinin incelenmesi için uygulanmaktadır.

Eğme testi uygulanırken numune U şeklinde bükulur ve eğme sırasında numunenin çatlaması incelenerek kaynaklı malzemenin mukavemeti tespit edilmektedir [21, 51].

### 2.7.2 Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Bu yöntemlerin uygulanması sırasında kaynaklı malzeme herhangi bir zarar görmez. Bunların belli başlıları şunlardır.

- Optik mikroskopla inceleme,
- Potansiyel değişmesi (Elektrik direnç değişmesi),
- Transmisyon akustik mikroskobisi,
- Elektron mikroskobisi,
- Fotoemisyonlu elektron mikroskobisi.

Optik mikroskop ile yapılan incelemeler sonrasında kaynaklı malzemenin iç yapısı hakkında bilgi edinilir. Ancak optik mikroskopla küçük boşlukların tespiti tam olarak yapılamadığından, kaynak kalitesinin tam olarak tespit edilmesi güçtür.

Potansiyel büyümesi metodu yorulma çatlağının büyümesinde ve büyük boşlukların tespitinde uygulanmaktadır.

Elektron mikroskobisi ile kaynaklı malzemelerin kaynak yuzyeyinde ara tabakaların kalınlılarının tespiti yapılmaktadır. Ancak; kaynak mukavemeti tespit edilememektedir.

Fotoemisyonlu elektron mikroskobisi ile difüzyon kaynağı işlemi uygulama sırasında, kademe kademe incelenebilmektedir.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Çalışmanın Amacı

Teknolojinin gelişmesiyle yeni teknolojik malzemeler ve bu malzemelerin bir arada kullanıldıkları alanlar ortaya çıkmıştır. Porselenler bilinen en eski malzemelerden olmasıyla birlikte, günümüzde yeni kullanım alanları nedeniyle; önemli bir malzeme olarak, endüstrinin farklı alanlarında yer almaktadırlar. Porselen malzemeler; inşaat, elektromekanik, otomotiv, elektrik elektronik, uzay sanayilerinde; yüksek yalıtım özelliği, ısıya ve darbelere dayanım gibi özellikleriyle oldukça önemli miktarda kullanılmaktadırlar. Cu ise; üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle elektrik elektronik, inşaat, ulaşım sanayilerinde ve pek çok diğer alanda tercih edilen önemli bir metaldir.

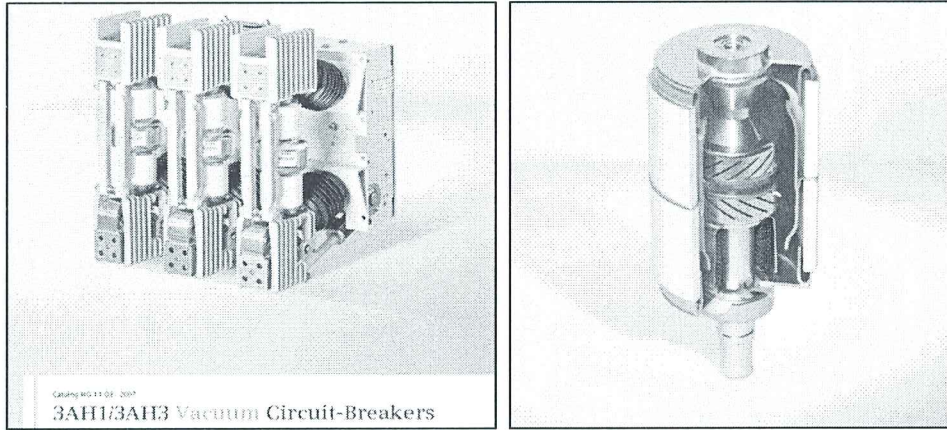
Cu' ın yüksek iletkenlik özelliği ve porselenin de yalıtkanlık özelliği nedeniyle; bir arada kullanımları yaygınlaşmıştır. Elektrik elektronik sanayi, elektromekanik sanayi ve uzay sanayi; Cu ve porselen malzemelerin bir arada kullanıldıkları alanlardan bazılarıdır. Cu ve porselen malzemelerin birleştirme teknolojilerinde, özel kaynak yöntemleri tercih edilmektedir [1].

Difüzyon kaynağı aralarında seramik ve kompozitlerin de yer aldığı, bir çok yeni ve birbirleriyle birleştirilmeleri ergitme kaynağı ile mümkün olmayan demirli ve demir dışı metal ve alaşımlarının birleştirilmesini mümkün kılmıştır. Difüzyon kaynağıyla kusursuz bir ara yüzey ve yüksek sıcaklıkta mekanik direnç elde edilebilmektedir. Bu nedenle Cu ve porselenin birleştirilmesinde; difüzyon kaynağı avantajlı bir tekniktir. Bu konuyla ilgili yapılmış çok fazla bir çalışma bulunmamaktadır.

Difüzyon kaynağıyla kusursuz bir ara yüzey ve yüksek sıcaklıkta mekanik direnç avantajıyla birlikte; birleşme için gerekli olan kaynak sıcaklığının ara yüzeyde termal gerilmeye sebep olması ve bazı reaksiyonların oluşması bu yöntemin dezavantajlarından birisidir. Genellikle oluşan gerilmeleri minimize etmek için metal

ve seramik malzemenin termal genleşmelerini birbirine yaklaştıracak uygun bir ara tabakalar kullanılmıştır [73].

Elektromekanik sanayinde kullanılmakta olan kesiciler, Kaleseramik Çanakkale Kalebodur Seramik Sanayi A.Ş. Kompozit İzolatör Bölümü kapsamında üretilen ürünlerden biridir. SF6 gazlı kesiciler ve vakumlu kesicilerde Cu ve porselen malzemeler bir arada kullanılmaktadır. Gazlı ve vakumlu kesicilerde Cu ve porselen malzemeyi bağlamak için difüzyon kaynağının uygulanabilirliği ile ilgili bir araştırmaya ihtiyaç olduğu firma tarafından bildirilmiştir. Mevcut izolatörlerde Cu ve porselen malzemeler lehimli yapıştırma tekniği ile bağlanmaktadır. Cu ve porselen malzemenin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği sağlandığı takdirde, bu yöntem vakumlu kesicilerin üretimi sırasında kullanılacak önemli bir teknik olacaktır. Şekil 3.1’de vakumlu kesiciler gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Vakumlu kesici

Ayrıca; TRT’nin orta ve yüksek frekanslı vericilerinde kullanılan elektron tüplerinde de Cu ve porselen malzemeler birarada kullanılmaktadır ve henüz ülkemizde üretim sağlanamamaktadır. Bu tüpler radyo yayınında elektronları düzenleyerek paraziti engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Cu ve porselen malzemelerin difüzyonla birleştirilebilirliğinin incelenmesi ve başarılması; yurt dışından alınan elektron tüplerinin Türkiye’de de üretilmesi adına önemli bir gelişme olacaktır.



### 3.2 Difüzyon Kaynağı Deney Düzenegi

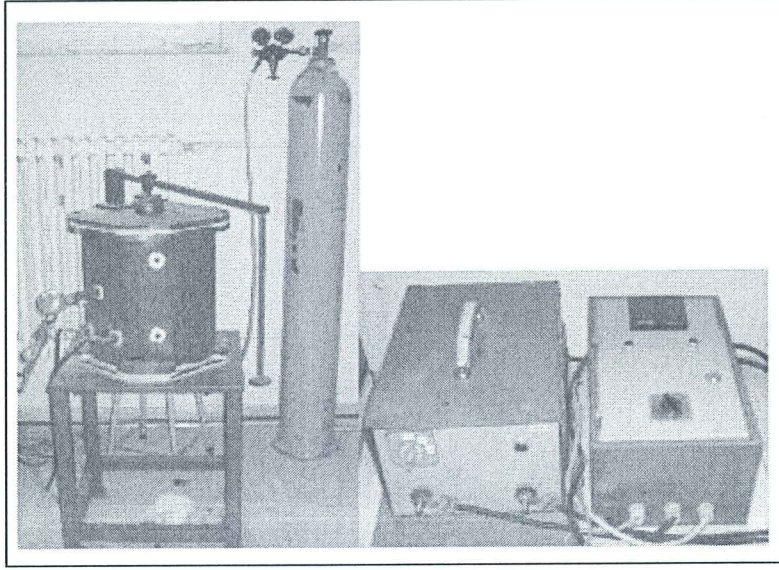
Difüzyon kaynağının uygulanmasında geçmişte farklı cihazlar kullanılmıştır. Günümüzde ise kaynak parametrelerinin kontrolünün rahatlıkla yapılabildiği difüzyon kaynak cihazı bu yöntemin uygulanmasında kullanılmaktadır. Difüzyon kaynak cihazı kullanılarak yapılan uygulamalarda; sıcaklık, basınç, kaynak atmosferi gibi kaynağı etkileyen faktörler kontrol edilebilmektedir.

Difüzyon kaynağı uygulamalarında, Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Bölümü Laboratuvarındaki difüzyon kaynak cihazı kullanılmıştır. Cihaz; yüksek sıcaklığa dayanıklı paslanmaz çelikten yapılmış, tutuculara numuneler takılarak alın yüzeylerini merkezleyip ısıtıcı içine yerleştirilebilecek şekilde tasarlanmıştır [21].

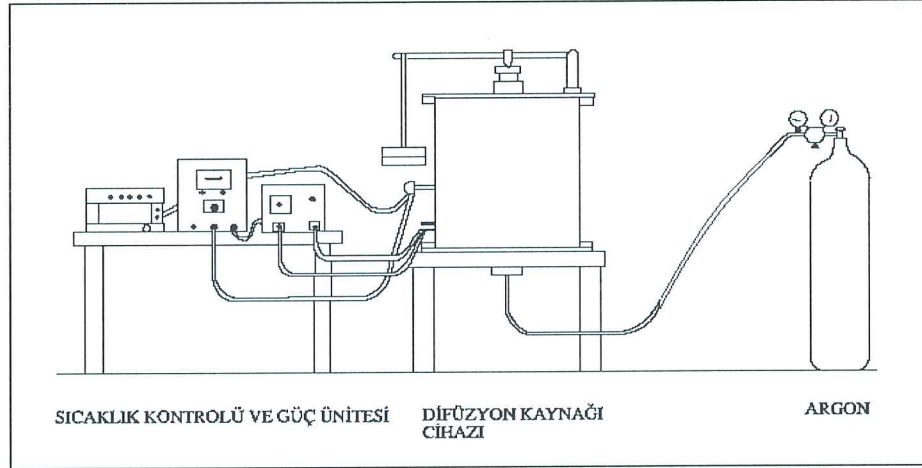
Birleştirilecek parçalara uygulanan basınç manivela kolu vasıtasıyla yapılmaktadır. Manivela kolu uç kısmına asılan yükün ve diğer parçaların numuneler üzerine yaptığı baskı kuvveti hesaplanarak kaynaklama basıncı bulunmuştur. Cihaz içerisinde oksijeni ve nemi ortamdan uzaklaştırmak amacıyla; sıcaklık uygulanmadan difüzyon cihazının iç atmosferi öncelikle vakumlanıp daha sonra % 99,998 saflıktaki argon gazı ile doldurulmuştur. Bu işlem beş kez tekrarlandıktan sonra kaynak işlemine geçilmiştir. Koruyucu ortamın devamlılığı için cihazın bağlantı yerleri, termokupl ve gaz giriş yerlerinde sızdırmazlık sağlanmıştır.

Isıtmanın sağlandığı güç ünitesi 220 voltu (V), 34 V' a indirgeyecek özel bir voltaj ayarlayıcısı içermektedir. Sıcaklık ölçümü, S tipi Platin %10 Rodyum–Platin alaşımli termokupl ile numunelerin dış yüzeylerinden ölçülerek yapılmaktadır [21].

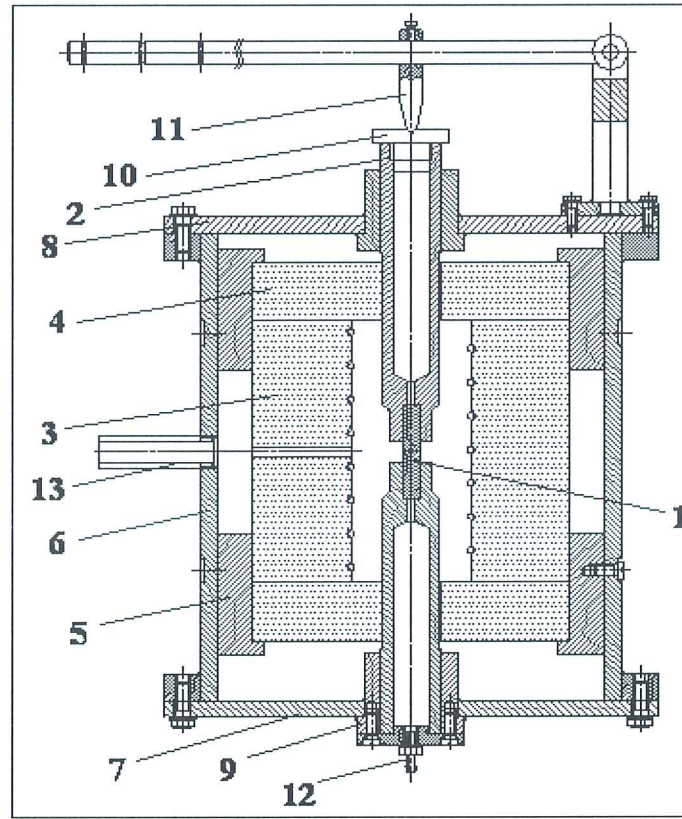
Cihaza ait resimler ise Şekil 3.2' de gösterilmektedir. Cihazın şematik resmi, Şekil 3.3, Şekil 3.4' de ve parça listesi Tablo 3.1' de gösterilmektedir [21].



Şekil 3.2: Difüzyon kaynak cihazı



Şekil 3.3: Difüzyon kaynak düzeneğinin şematik gösterilmesi



Şekil 3.4: Difüzyon kaynak cihazının kesit resmi

Tablo 3.1: Difüzyon kaynak cihazının parçaları

1	Termokupl Giriş Parçası	13	St 37
1	Gaz Giriş Parçası	12	St 37
1	Mekanik Baskı Mekanizması	11	St 60
2	Piston Kapağı	10	316 Paslanmaz Çelik
2	Piston Tutucu	9	316 Paslanmaz Çelik
1	Üst Kapak	8	St 60
1	Alt Kapak	7	St 60
1	Silindirik Gövde	6	St 60
6	Pabuç	5	Dökme Demir
2	Isıtıcı Kapağı	4	
1	Isıtıcı (RAC 100/200)	3	
2	Piston	2	316 Paslanmaz Çelik
2	Numuneler	1	Cu-Al
Parça Sayısı	Parça Adı	No	Malzemesi
DİFÜZYON KAYNAK CİHAZI			



### 3.3 DeneYlerde Kullanılan Malzemeler

DeneYlerde elektrolitik saf Cu ve özel olarak üretilmiş izolatör porseleninin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi araştırılmıştır.

#### 3.3.1 Bakır Malzeme

Cu ve alaşımları yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine, korozyon direncine ve yatak olmaya elverişlilik (kayma-sürtünme özelliği) özelliklerine sahiptir ve bu özelliklere bağlı olarak ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılmaktadır. Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği özellikleri Cu' ı, elektrik santralleri ve iletken malzemenin vazgeçilmez girdisi haline getirmektedir. Soğuk hava makine ve teçhizatında, kaplamalarda bakırın büyük kullanım alanları bulunmaktadır. Bunlara ilaveten Cu' ın kaynak işlerinde, metalürjide ve bronz üretiminde, kimya, gıda endüstrisinde önemli yeri olup, birçok kullanımı vardır. Ayrıca havacılık endüstrisinde uçak, helikopter ve uzay araçlarındaki bağlantı elemanlarında da bu yöntem kullanılabilir.

Çalışmada kullanılan Cu malzeme elektrolitik (oksijeni alınmış) saf Cu' dır. Tablo 3.2 literatürden alınan Cu' a ait genel özellikleri, Tablo 3.3' de ise yapılan deneYler sonucu elde edilen özellikler verilmiştir [21].

**Tablo 3.2:** Saf bakır malzemeye ait fiziksel ve mekanik özellikler

ÖZELLİK	BİRİM	TAVLİ SERT BAKIR	
Yoğunluk	gr/cm	8,89	
Ergime Noktası	°C	1083±0,1	
Kaynama Noktası	°C	2595	
Özgül Isı	Cal./gr/°C	0,93	
Lineer Genleşme Katsayısı	1/°C	17×10	
Isı İletkenliği	Cal./cm.sn°C	0,934	
Elektrik İletkenliği	m/ohm,mm <sup>2</sup>	58	55,0-56,5
Kopma Uzaması	%	10 1940	0,5-2,5
Kopma Mukavemeti	kg/mm <sup>2</sup>	19-26	30-50
Hacimsal Özdirenç (20 °Cda)	ohm.mm <sup>2</sup> /m Micron.ohm.cm	0,017241 1,7241	0,018181 0,017699 1,8181 1,7699
Kütlele Özdirenç	ohm.gr/m <sup>2</sup>	0,15328	0,16162 0,15734
Temperatür Katsayı	1/°C	0,00393	0,00381
Elastiklik Modülü	kg/mm <sup>2</sup>	9000-10500	12500
Sertlik	Brinell	45-70	85-105

**Tablo 3.3:** Kullanılan bakırın testler sonucu alınan özellikleri

<b>Deneylerde Kullanılan Bakır Malzemeye Ait Test Sonuçları</b>	
<b>Çekme Mukavemeti</b>	<b>250 MPa</b>
<b>% Kopma Uzaması</b>	<b>8,1</b>
<b>Sertlik</b>	<b>80 HB</b>
<b>% Cu</b>	<b>99,93</b>
<b>İletkenlik</b>	<b>57,53 m/Ohm,mm<sup>2</sup></b>

### 3.3.2 Genel Seramikler ve Porselen Malzeme

Seramik endüstrisi birçok diğer endüstrinin temel taşıdır. Refrakterler; metallurji endüstrisinde, aşındırıcılar, makina-takım ve oto endüstrisinde; cam; inşaat, elektronik ve oto endüstrisinde, son yıllarda geliştirilen özel seramikler; bilgisayar, elektrik elektronik, mekatronik, havacılık, uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik malzemelere ilginin artmasının başlıca nedenler aşağıdaki gibi sıralanabilir [75].

- a) Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık,
- b) Yüksek kimyasal kararlılık,
- c) Sertlikleri, çok sert olabilmeleri,
- d) Metallerden hafif olmaları ( % 40 'a varan hafiflik),
- e) Hammade kaynağının bol ve metallere göre ucuz olması,
- f) Pahalı ve stratejik metallere gerek duyulmaması,
- g) Erozyon ve aşınmaya dayanıklı olmaları,
- h) Oksitlenmeye dirençli olmaları,
- i) Sürtünme katsayısının düşük olması,
- j) Basma kuvvetinin yüksek olması.

Teknik seramikler temel olarak, alüminyum, silisyum ya da titanyum oksitleri, nitrürleri ya da karbürleri gibi basit maddelerin ikili bileşimleri kullanılır; tüm bu hammaddeler yer kabuğunda son derece yaygın olarak bulunmaktadır. Çıkarılması, işletilmesi ve temini oldukça kolay maddelerdir. Buna karşın söz konusu maddelerin toz ya da lif haline getirilmesi ve sanayi ölçeğinde biçimlendirilmesi ağır araç ve tesisler gerektirmektedir. Teknik seramikler, genel olarak, iki grupta incelenmektedir.

**1) Oksitler:** Alümina( $Al_2O_3$ ), Silis( $SiO_2$ ), Zirkonya( $ZrO_2$ ), Zirkon( $ZrO_2.SiO_2$ ) Magnezya( $MgO$ ), Bariya( $BaO$ ), Berilya( $BeO$ ), Yitriya( $Y_2O_3$ ), Hafniya ( $HfO_2$ ), Torya( $ThO_2$ ) ve Titan oksit( $TiO_2$ ) gibi klasik seramikleri içermektedir.

**2) Oksit olmayanlar:** Silisyum( $SiC$ ), Titan ( $TiC$ ), ya da Bor( $B_4C$ ) karbürlerini kapsar. Bor ve silisyum karbürler elmas dışında bilinen en sert malzemelerdir. Nitrürler, Silisyum( $Si_3N_4$ ), Titan( $TiN$ ), Borürler Bor( $BN$ ) ya da Alüminyum( $AlN$ ) temellidir. Bunlara Grafit (C) ile Karbon fiberleri (lifleri) 'de katmak olanaklıdır.

Bu çalışmada izolatörlerde kullanılan oksitli teknik seramikler grubuna giren porselen malzeme kullanılmıştır [75].

### 3.3.2.1 İzolatör Porseleni

İzolatörler, elektrik enerjisinin havai hatlarda taşınması sırasında iletken tellerdeki elektrik akımının direğe ve oradan da toprağa geçmesini engelleyen yalıtkan görevini görürler. Buradan da anlaşılacağı gibi izolatörlerin, iletken teli taşımak ve elektrik yalıtımını sağlamak olarak iki temel görevi bulunmaktadır:

İzolatörlerin bu iki temel görevi tam olarak yerine getirebilmesi için, elektrik yalıtımını sağlayan seramik bir malzeme ile bağlantıları sağlamak içinde metal bir malzemenin bir araya getirilmeleriyle üretilmektedirler [74].

Tüm seramik malzemeler, kısa mesafeli de olsa iç yapılarında bir atomik diziliş düzenine sahiptirler. Bu diziliş düzenine çok fazla faktör etki eder. Yakın komşu atomlar arasında kovalent bağ ve iyonik bağ ile birbirlerine bağlıdırlar. Tablo



3.4 ve Tablo 3.5 de deneylerde kullanılan porselen malzemeye ait fiziksel ve kimyasal özellikler verilmiştir.

**Tablo 3.4:** Deneylerde kullanılan porselene ait fiziksel özellikler

Masse Adı:		Açıklama	C120-1/2010	KRİTERLER
Elek Analizi	0,090	%	0,11	
	0,063	%	0,72	
	0,045	%	1,68	
	<b>Toplam</b>	%	2,51	<b>(1,5-3,5)-(3-6)</b>
<b>Kuru Dayanımı</b>		<i>Mpa</i>	6,588	-
<b>Fırın No/SK/Posun</b>		-	11/1279/49	-
Boyuna	<b>Kuru Küçülme</b>	%	7	5,5-7
	<b>Pişme Küçülmesi</b>	%	7,28	6,5-7,5
	<b>Toplam Küçülme</b>	%	14	12,5-14
Enine	<b>Kuru Küçülme</b>	%	3,36	2-4
	<b>Pişme Küçülmesi</b>	%	10,43	8,5-10,5
	<b>Toplam Küçülme</b>	%	13,79	12,5-14
<b>Eğilme Dayanımı (Sırsız)</b>		<i>Mpa</i>	103,821	115-135
<b>Elastikiyet Modülü (Sırsız)</b>		<i>Mpa</i>	7,19x10 <sup>4</sup>	
<b>Eğilme Dayanımı (Sırlı)</b>		<i>Mpa</i>	102,068	160-180
<b>Elastikiyet Modülü (Sırlı)</b>		<i>GPa</i>	49,81	
<b>Çekme Dayanımı (Sırsız)</b>		<i>Mpa</i>	72,69	45-80
<b>Çekme Dayanımı (Sırlı)</b>		<i>Mpa</i>	74,42	60-90
<b>Deformasyon Yüksekliği</b>		-	19,2-20,4	-
<b>20-600 (1000<sup>0</sup>C'de pişen)</b>		<i>10<sup>-6</sup>.K<sup>-1</sup></i>	-	-
<b>20-600 (12 SK)</b>		<i>10<sup>-6</sup>.K<sup>-1</sup></i>	-	-
<b>Kuru Özgül Ağırlık</b>		<i>gr/cm<sup>3</sup></i>	1,98	
<b>Pişmiş Özgül Ağırlık</b>		<i>gr/cm<sup>3</sup></i>	2,62/2,59	2,5-5,6
<b>Yağda Delinme Min.</b>		<i>kV/mm</i>	16,3↓	-
<b>Yağda Delinme Max.</b>		<i>kV/mm</i>	37,2	-
<b>Yağda Delinme Ortalama</b>		<i>kV/mm</i>	29,4	20
<b>Fuxin</b>		-	<b>OLUMLU</b>	<i>Su emme sıfır (Sızmamış)</i>
<b>K.Z.</b>		%	4,9	
<b>İz. B2U Kh. Sr. Yoğun.</b>		<i>gr/lt</i>	1568	1600±50
<b>Sırn Viskozitesi</b>		<i>cp</i>	180	210±50
		<sup>0</sup> C	21	

**Tablo 3.5:** Deneyleerde kullanılan porselen malzemenin kimyasal yapısı

Sonuçlar:	K.K.	4,28
	SiO <sub>2</sub>	47,93
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41,60
	TiO <sub>2</sub>	0,49
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,61
	CaO	0,67
	MgO	0,35
	Na <sub>2</sub> O	0,93
	K <sub>2</sub> O	3,12
	TOPLAM	99,98

XRD analizleri [4.Bölüm] sonucunda; porselen malzemenin difüzyon kaynağı sırasında uygulanan yüksek sıcaklık nedeni ile içeriğindeki mullit, korund, kristobalit ve cam fazlarının oranlarında artış meydana geldiği tespit edilmiştir

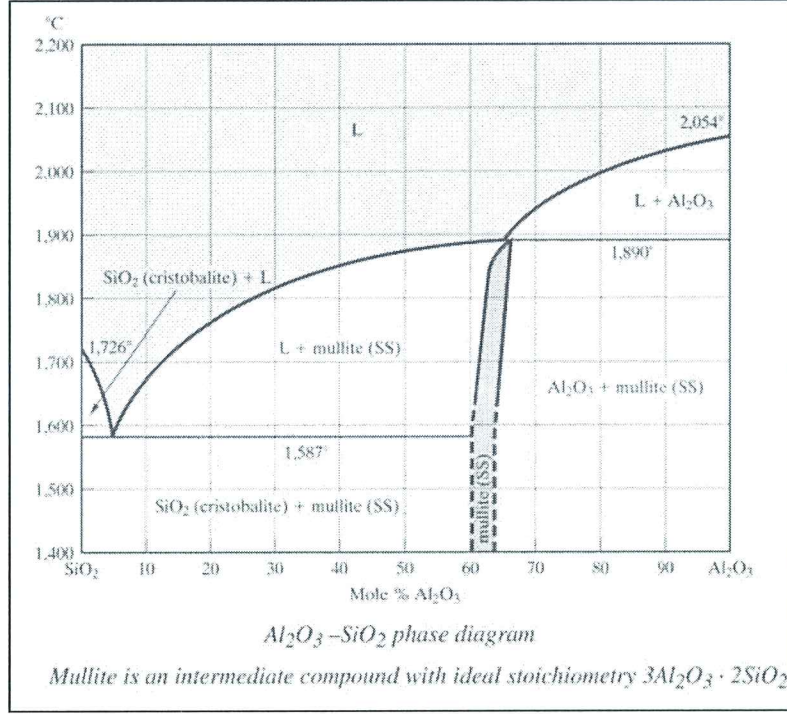
**Mullit (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>) :** Erime noktası 1810°C, yumuşama noktası 1650 °C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> sisteminde normal atmosfer basıncı altında oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara çıkıldığında oluşan tek kararlı fazdır. Yüksek erime noktası, yüksek kimyasal dayanım, düşük termal genleşme katsayısı, düşük dielektrik sabiti, yüksek bükülme dayanımı, yüksek sürünme dayanımı ve yüksek sıcaklıklardan oda sıcaklığına inildiğinde gösterdiği iyi termal şok direnci gibi sahip olduğu üstün fiziksel özelliklerdir. Alümina ve silika içeren tüm seramik ürünlerde oluşur.

**Korund (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):** Doğada korund mineralleri olarak ve killerin yapısında bulunan, boksit, nefelin, kaolin ve şaplardan elde edilir. Alüminyum üretiminin ana maddesidir, Sertlik değeri yüksek olduğu için aşındırıcı materyal olarak kullanılır ve ayrıca adsorban ve katalizör olarak da kullanılır. Ergime noktası 2050 °C, kaynama noktası 3000 °C' dir. Isıtıldığı zaman 600-900 °C' de önce kübik kafes yapıya sahip gama Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşur. 900 °C' de gama Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → alfa- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dönüşümü başlar.

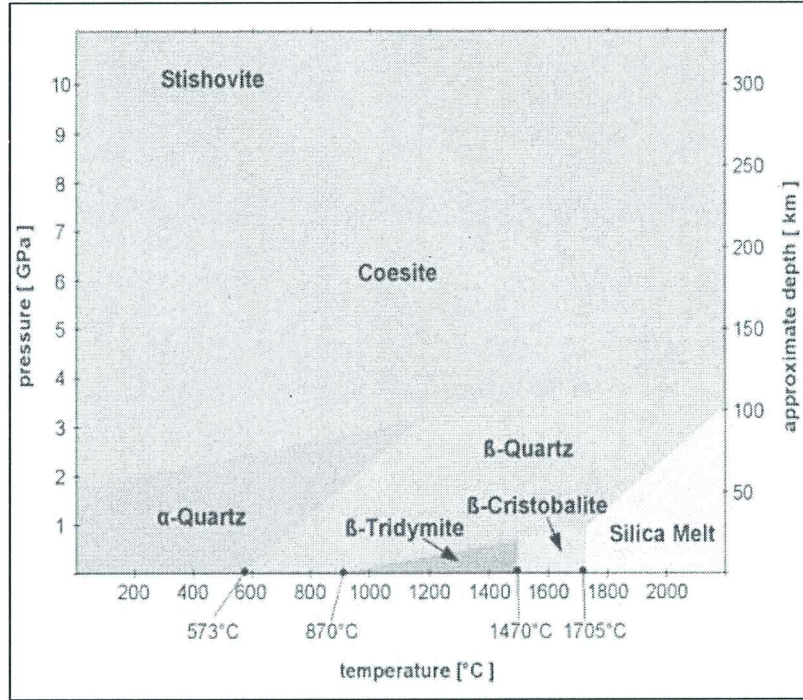
**Kristobalit:** Silisin (SiO<sub>2</sub>), erime noktası olan 1728 °C ile 1470 °C arasındaki sıcaklıklarda kararlı olan biçimidir. Bu sıcaklık değerlerinin altına inerse, tridimite dönüşür. Doğada iki türü bulunmaktadır, bunlar 268 °C' ye kadar görülen ancak kararlı bir yapı gösteremeyen düşük sıcaklık kristobaliti ve 268 °C' nin üstünde rastlanan ancak 1470 °C ve üzerinde sıcaklıklarda kararlı bir yapı gösteren yüksek



sıcaklık kristobalitidir. Şekil 3.5' de  $Al_2O_3$ -  $SiO_2$  faz diyagramı, Şekil 3.6 'da  $SiO_2$  faz diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.5:  $Al_2O_3$ -  $SiO_2$  faz diyagramı



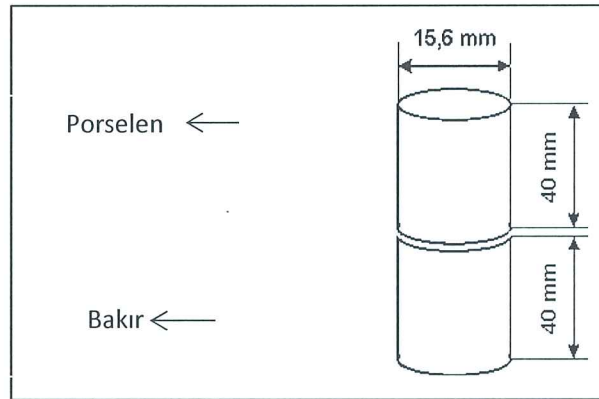
Şekil 3.6:  $SiO_2$  faz diyagramı



### 3.4 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Numunelerin boyutları, difüzyon cihazına uygun olacak şekilde, kaynak işlemi için Şekil 3.7 'de ki boyutlarda hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere 16 mm çapında Cu malzeme piyasadan satın alınıp, torna tezgahında işlenerek istenilen boyutlara indirilmiştir. Porselen malzeme numuneleri ise; Kaleseramik Çanakkale Kalebodur Seramik Sanayi A.Ş. Kompozit İzolatör Üretim ve Arge Bölümü tarafından numune boyutlarına uygun olarak üretilmiştir.

Deneyler için istenilen ölçüde temin edilen Cu numuneler, önce tornada alın tornalama işlemine tabii tutulmuşlardır. Tornaya bağlı olan Cu numuneler, düşük devirde çalıştırılırken, 220- 1200 grit silisyum karbür zımpara ile alın yüzeyleri zımparalanarak, difüzyon ara yüzeyleri hazırlanmıştır. Porselen numuneler de aynı şekilde tornaya bağlanıp, düşük devirde, 1200 grit silisyum karbür zımpara ile alın yüzeyleri zımparalanarak, yüzey pürüzlülükleri giderilip, difüzyon ara yüzeyleri hazırlanmıştır. Ancak porselen numunelerin bu işlem sonrasında yüzeyinde camsı bir tabaka oluşmuştur. Bu tabaka ise kaynaklanmaya olumsuz etki ettiği tespit edildiğinden porselen numunelere bir yüzey işlemi yapılmamıştır. Difüzyon alın yüzeyleri etil alkolle temizlenen numuneler, ön denemeler sırasında yerleri değiştirilerek iki farklı konumda difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Porselenin üste, Cu' ın alta olduğu konumda yapılan deneylerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.7: Deney numunelerinin boyutları

### 3.5 Difüzyon Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

Cu ve porselen malzemelerin difüzyon kaynağı deneyleri için difüzyon süresi (dak), difüzyon sıcaklığı (°C) ve difüzyon basıncı (MPa) değerleri ana parametreler olarak tespit edilmiştir. Bu parametreler, difüzyon kaynağı deney düzeneğinde yapılan ön çalışmalar sonucunda oluşturulmuştur (Tablo 3.6).

**Tablo 3.6:** Difüzyon kaynağı ön deney parametreleri

Difüzyon Kaynağı Deney Parametreleri					
Difüzyon Sıcaklığı °C	Difüzyon Basıncı Uygulama Basıncı (Mpa)	Difüzyon Süresi (dak )			
850	3,5	45	60	75	90
	4,5	45	60	75	90
	5,5	45	60	75	90
860-875	3,5	45	60	75	90
	4,5	45	60	75	90
	5,5	45	60	75	90
900	3,5	45	60	75	90
	4,5	45	60	75	90
	5,5	45	60	75	90

Kesme testi, EDX analizleri ve mikro yapı incelemeleri sonuçlarına göre deney parametreleri bundan sonraki çalışmalar için, tekrar gözden geçirilmiştir. Kaynak sıcaklığı parametresine bakıldığında 875 °C ve 900 °C sıcaklık değerlerinde daha iyi kaynaklı birleştirme yapıldığı gözlenmiştir. Kaynak süresi parametresine bakıldığında ise; 60 dak ve üzeri sürelerde, daha iyi kaynaklı birleştirme yapıldığı gözlenmiştir. Kaynak basıncı için ise; 4,5 MPa ve 5,5 MPa kaynak basıncı ile yapılan difüzyon kaynağı deneylerinde daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan ön deneyler ve çalışmalar sonucunda elde edilen bütün sonuçlar değerlendirilerek; gerçek deney parametreleri Tablo 3.7' de verildiği şekilde belirlenmiştir.

**Tablo 3.7:** Difüzyon kaynağı deney parametreleri

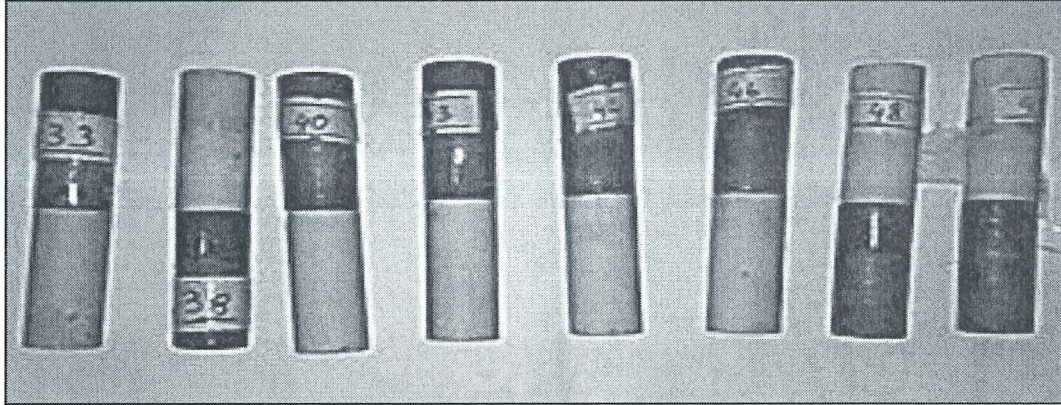
Parametre Numarası	Deney Parametreleri		
	Sıcaklık (° C)	Basınç (MPa)	Süre (dakika)
1	875	4,5	45
2	900	5,5	45
3	875	4,5	60
4	900	5,5	60
5	900	4,5	75
6	875	5,5	75
7	900	4,5	90
8	875	5,5	90
9	900	5,5	75
10	900	5,5	90
11	900	4,5	60
12	900	4,5	45

### 3.6 Deneyin Yapılışı

Numuneler deney cihazına yerleştirildikten sonra, sistem difüzyon sıcaklığına getirilmiştir. Deney süresince termokupl ile sistemin iç sıcaklığı ölçülerek sıcaklık kontrol altında tutulmuştur. Sistemin difüzyon sıcaklığına ulaşması için geçen süre 3,5 ile 4,5 saat arasında değişmektedir. Sistem difüzyon kaynak sıcaklığına ulaştığında, bu sıcaklıkta 30 dak bekletilerek, sıcaklığın sistemin içinde homojen dağılması sağlanmıştır. Bu sürenin sonunda basınç uygulanarak, difüzyon başlatılmıştır. Difüzyon süresi bitiminde ise, sistem 500 °C' ye kadar çeşitli sıcaklıklarda kademeli olarak bekletilerek kontrollü soğutma uygulanmıştır.



Deneyler sırasında ortamın oksijenden arındırılması için, 3 bar basınçta argon gazı verilmiştir. Aynı zamanda vakum uygulaması yapılarak, sistem atmosferi korunmuştur. Argon gazı uygulaması deneyin başlamasından itibaren, difüzyon kaynak süresi bitiminden sonra da devam ettirilerek, sistemin sıcaklığı 600 °C' ye indiğinde kesilmiştir. Difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Cu ve porselen numunelerin görüntüsü Şekil 3.8' de verilmiştir.



**Şekil 3.8:** Kaynaklı numuneler

Deneylerden sonra; Cu numunenin renginde kararına görülmüştür. Numunelerin boyutları ölçüldüğünde; kaynaklı numunenin toplam boyunda 0,8 mm' lik bir kısalma, çaplarında ise özellikle Cu numunede daha belirgin olarak izlenen 0,1mm' lik bir genişleme, porselen numunede ise, 0,03 mm'lik bir genişleme olduğu tespit edilmiştir.

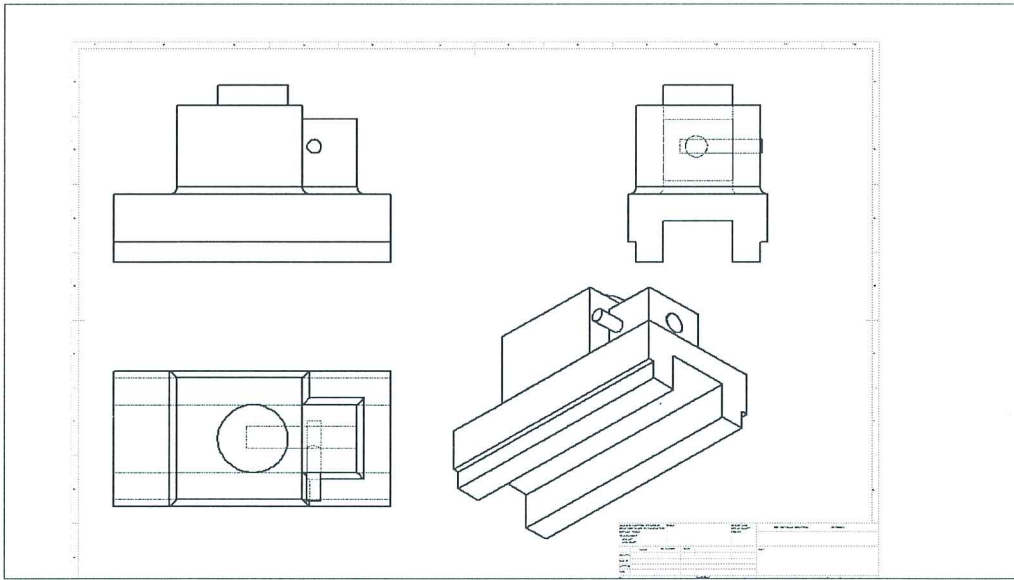
### 3.7 Kesme Testi

Yapılan literatür taraması çalışmasında, seramik veya kompozit malzemelerin kaynaklı birleştirmeler sonrasında, kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin araştırılması için kesme testine tabii tutuldukları saptanmıştır. Porselen kırılğan bir malzeme olduğu için, bu malzemeye dayanım ölçümü için, çekme testi uygulanamamaktadır.

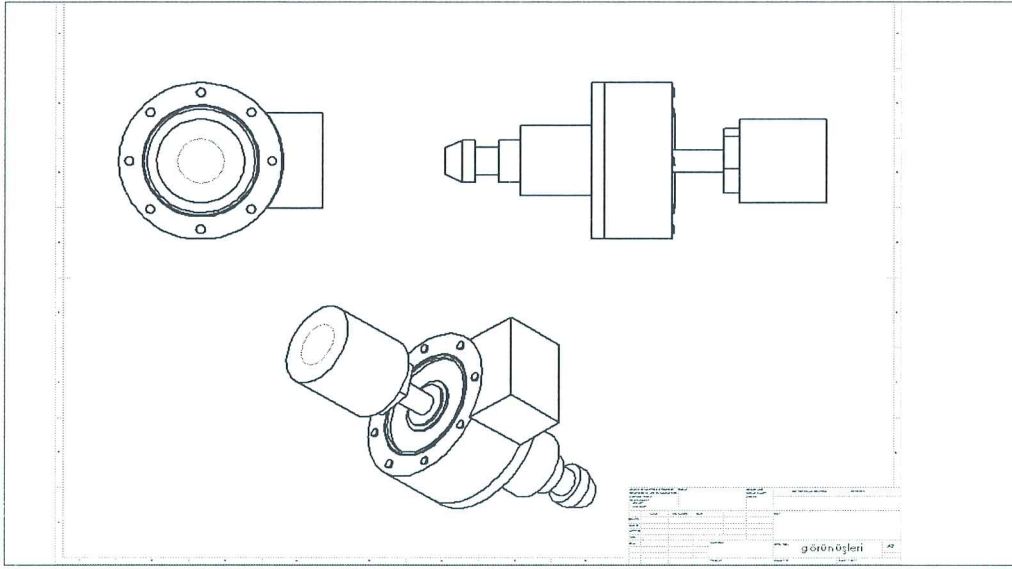
### 3.7.1 Kesme Test Kalıbının Modellenmesi ve İmalatı

Kesme Testi kalıbı, SolidWorks programından faydalanılarak modellenmiştir. Kesme testi kalıbı; Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan çekme deney cihazına montajı yapılacak şekilde tasarlanmıştır. Kalıbın modellenmesinde iki taslak üzerinde çalışılmış, uygun olan seçilmiştir.

Kesme testi kalıbı iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm kaynaklı numunenin yerleştirileceği, kesme kalıbı gövdesidir. Bu bölüm çekme cihazında bulunan kanala monte edilecektir. İkinci bölüm ise load-cellin bağlanacağı flanşlı parçalar bölümüdür. Bu bölümde load-cellin üst bölümü flanş ve vidalı birleştirme ile çekme cihazına bağlanırken, alt bölümüne ise civata ve somun birleştirmesiyle, kalıb gövdesine girecek olan kesme zımbasının montajı yapılmıştır. Tasarımı yapılan kesme testi kalıbı, Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Takım Tezgahları Atölyesi'nde imal edilmiştir. Cihazın imalatında Ç.1040 çeliği kullanılmıştır. Şekil 3.9 ve 3.10' da kesme testi cihazının parçalarına ait resimler gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Kesme kalıbı gövdesi

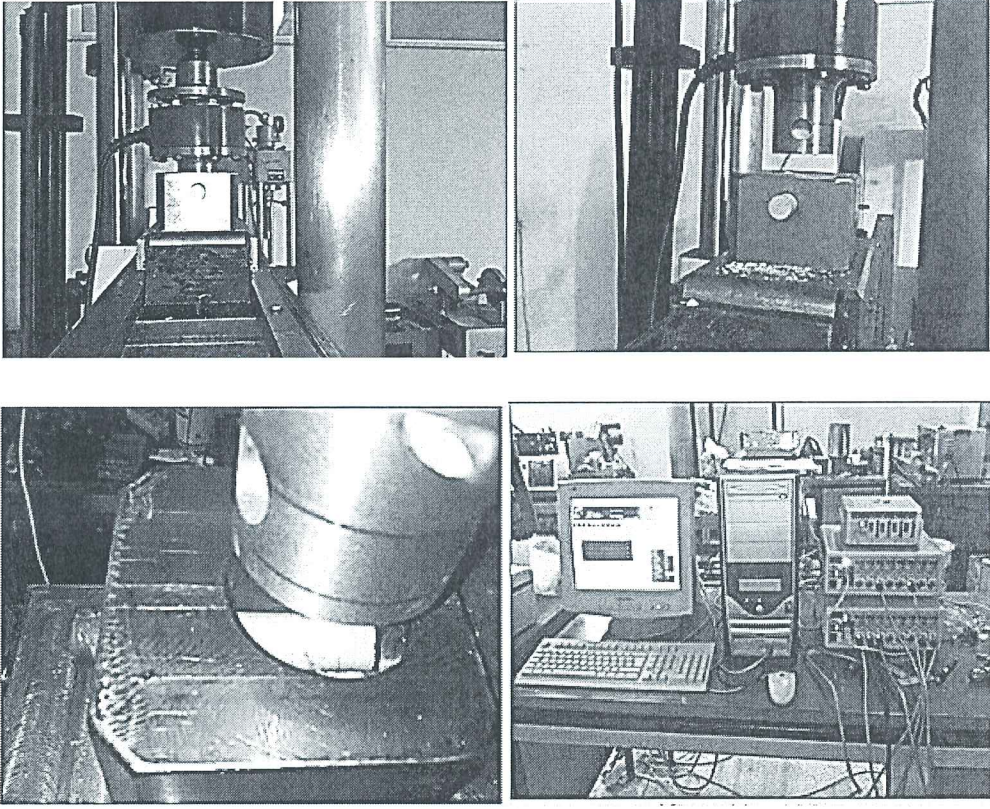


**Şekil 3.10:** Load-cell ve kesme zımbası bağlantısı

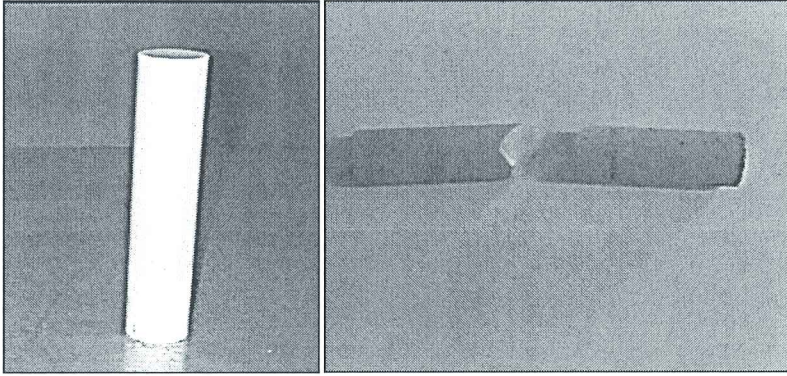
### 3.7.2 Kesme Testi ve Sonuçları

Difüzyon kaynağı deneyi sonrasında başarılı bir şekilde birleştirilen Cu ve porselen numunelere kesme testi uygulanmıştır. Kaynaklı numuneler ile porselen ana malzemesinin kesme dayanımlarının kıyaslanabilmesi için; porselen ana malzemeye de kesme testi yapılmıştır. Kesme testleri; Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Malzeme Laboratuvarı'nda, çekme deney cihazına monte edilen kesme test kalıbı kullanılarak yapılmıştır. Kesme testi sırasında numunelerin ilerleme hızı, 0,5 mm/dak olarak alınmıştır. Deney sırasında yükleme ölçümü için kullanılan load-cell, 20 KN kapasitelidir. Load-cell ile saniyede 8 ölçüm değeri kaydı yapılabilmektedir. Kesme testi bağlantıları ve uygulaması sırasında alınan fotoğraflar Şekil 3.11' de verilmiştir. Alınan sonuçlar MS. Excel programında değerlendirilerek, deney numunelerine göre difüzyon kesme dayanımı grafiği haline getirilmiştir. Kesme testi sonrasında kesilmenin kaynak birleştirme yüzeyinin 1-2 mm ilerisinden ve porselen tarafından gerçekleştiği görülmüştür. Porselenin kesme testi sonrası görüntüleri Şekil 3.12 de, kaynaklı numunelerin kesme testi sonrası görüntüleri, Şekil 3.13' de görülmektedir.



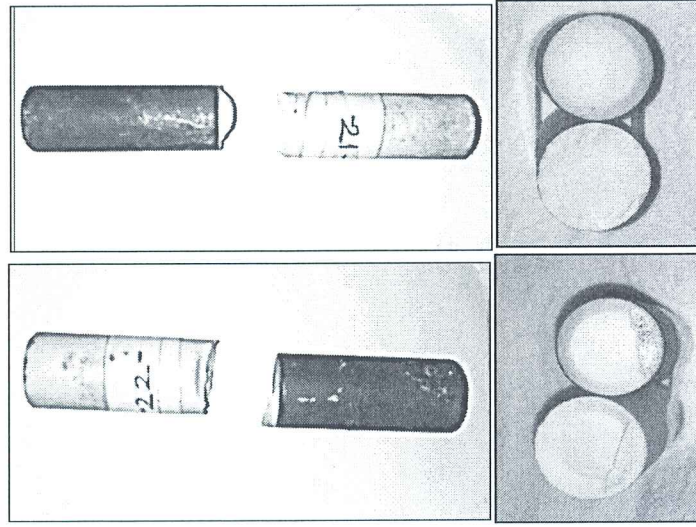


Şekil 3.11: Kesme testi



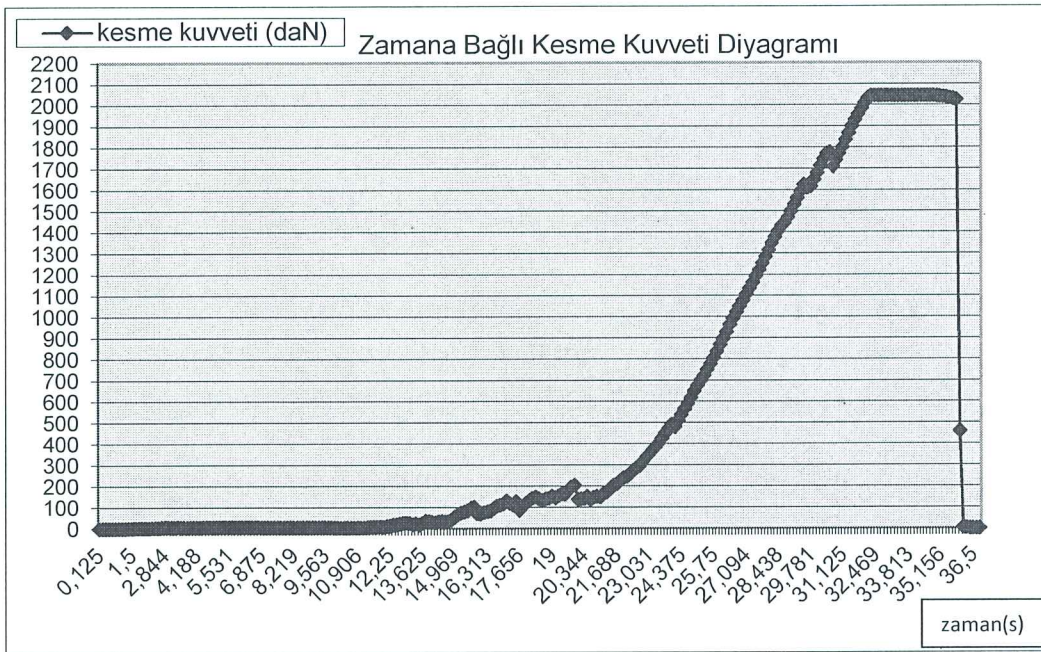
Şekil 3.12: Kesme testi uygulanmış porselen numune





Şekil 3.13: Kesme testi uygulanmış kaynaklı numuneler

Kesme testi sonuçlarından, porselen ana malzemesinin ortalama 32,4 MPa'lık kesme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Kaynaklı numunelerde ise bazı deney parametrelerinde daha yüksek kesme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Kesme testi esnasında elde edilen değerlere göre çizilen, kesme kuvveti diyagramına örnek Şekil 3.14' de verilmektedir.

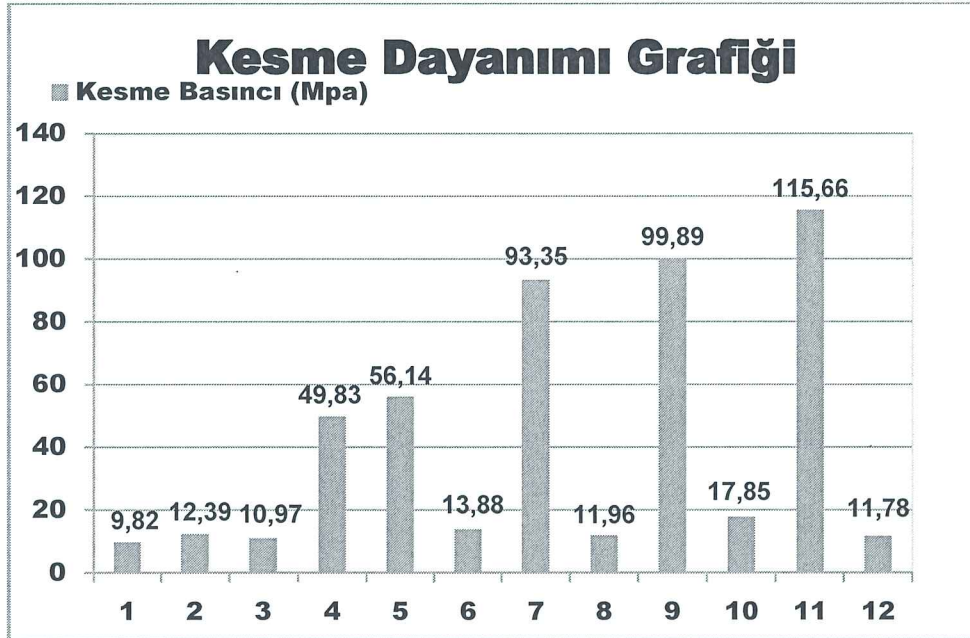


Şekil 3.14: 11 nolu sırada verilen parametrelerle birleştirilmiş kaynaklı numunenin zamana bağlı kesme kuvveti grafiği

Zamana bağılı kesme kuvveti grafiklerinden faydalanılarak kesme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Tablo 3.8' de kesme dayanımı değerleri, Şekil 3.15' de kesme dayanım değerlerinin grafiği görülmektedir.

**Tablo 3.8:** Kesme dayanımı sonuçları

Numune Numarası	Deney Parametreleri			Kesme Dayanımı
	Sıcaklık (° C)	Basınç (MPa)	Süre (dakika)	Kesme Basıncı (Mpa)
1	875	4,5	45	9,82
2	900	5,5	45	12,39
3	875	4,5	60	10,97
4	900	5,5	60	49,83
5	900	4,5	75	56,14
6	875	5,5	75	13,88
7	900	4,5	90	93,35
8	875	5,5	90	11,96
9	900	5,5	75	99,89
10	900	5,5	90	17,85
11	900	4,5	60	115,66
12	900	4,5	45	11,78



**Şekil 3.15:** Difüzyon kaynağı kesme dayanımı grafiği

Kesme testi sonuçları incelendiğinde; 875 °C'de ve 45 dak' da yapılan deney numunelerinin kesme dayanımının düşük olduğu görülmüştür. Difüzyon sıcaklığı

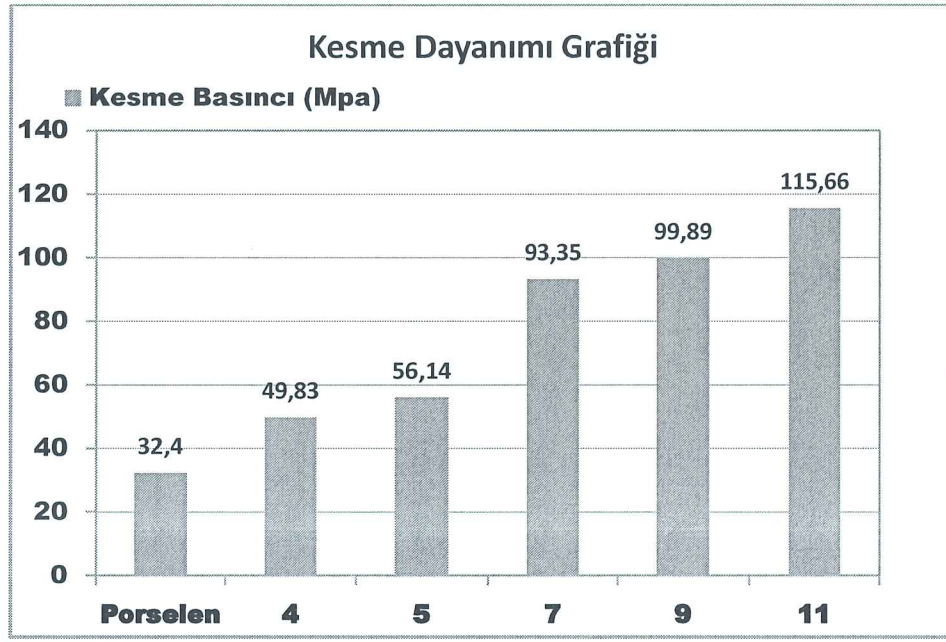


olarak 875 °C' nin yetersiz olduğu düşünölmüştür. Süre olarak ise; 45 dak dayanımı iyi bir difüzyon bağlantısının oluşması açısından yetersiz gelmiştir. Kaynak süresi gerekenden az olduğunda, kaynaklı birleştirmenin kalitesi düşebilmekte, gerekenden daha uzun süre uygulandığında ise; elementler arasında yeni fazların oluşumu ve mevcut faz oranlarındaki artış ya da tane büyümesi gibi durumlar meydana gelebilmektedir. Ayrıca kaynak işlemi sırasında pistonlara yerleştirilen malzemelerin konumunun da, deney sonuçlarına etki ettiği saptanmıştır. Kesme testi sonuçlarına göre, porselenin üst pistonu, bakırın alt pistonu yerleştirilerek deneyin gerçekleştirildiği konumun, en ideal konum olduğu tespit edilmiştir.

En yüksek kesme dayanımını veren numuneler incelendiğinde; 4, 5, 7, 9 ve 11 nolu sırada verilen parametrelerle yapılan deneylere ait olduğu görölmüştür. Tablo 3.9' da en yüksek kesme dayanımı sonuçları, Şekil 3.16' da ise en yüksek kesme dayanım değerleri grafiğı verilmiştir.

**Tablo 3.9:** En yüksek kesme dayanımı sonuçları

Numune Numarası	Deney Parametreleri			Kesme Dayanımı
	Sıcaklık (° C)	Basınç (MPa)	Süre (dakika)	Kesme Basıncı (Mpa)
Porselen				32,4
4	900	5,5	60	49,83
5	900	4,5	75	56,14
7	900	4,5	90	93,35
9	900	5,5	75	99,89
11	900	4,5	60	115,66



**Şekil 3.16:** Difüzyon kaynağı en yüksek kesme dayanımı grafiği

Kesme testi sonuçlarına göre; en yüksek kaynak mukavemetinin 115.66 MPa olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, 60 dak' da, 900 °C sıcaklıkta ve 4,5 MPa basınçta, 11 nolu sırada verilen parametreler ile yapılan deney numunelerine aittir. 11 nolu sırada verilen parametrelerle yapılan deney numunelerine ait kesme dayanımı sonucunun, ana porselen malzemenin 32,4 MPa olan kesme dayanımı sonucuna göre 3,56 kat fazla olduğu görülmektedir.

Deney sonrasında porselenin içine difüze olan bakır elementinin porselenin kesme dayanımını arttırdığı düşünülmüştür. Ayrıca; porselen malzemedeki XRD analizleri sonucunda; mullit, korund, kristobalit ve cam fazlarının oranlarında artışların meydana geldiği ve bundan dolayı kaynak dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca difüzyon kaynağı sırasında porselen numuneye difüze olan bakırın, porselenin içeriğinde bulunan; 750 °C'de eriyen potasyum oksit ( $K_2O$ ) ile 800 °C'de eriyen sodyum oksit ( $Na_2O$ ) 'den açığa çıkan oksijenle birleşerek, küproz oksit ( $Cu_2O$ ) ve küprük oksit ( $CuO$ ) fazlarını meydana getirdiği ve bu fazların da kaynak dayanımını arttırdığı düşünülmektedir. Cu, potasyumla (K) ve sodyumla (Na) faz oluşturmamaktadır [76].

Bu fazlar, sert ve gevrek olduklarından, faz kalınlıkları belirli bir kalınlığı ( $\approx 5\mu m$ ) geçince buldukları tabaka boyunca aşırı bir gevrekleşme gösterirler.

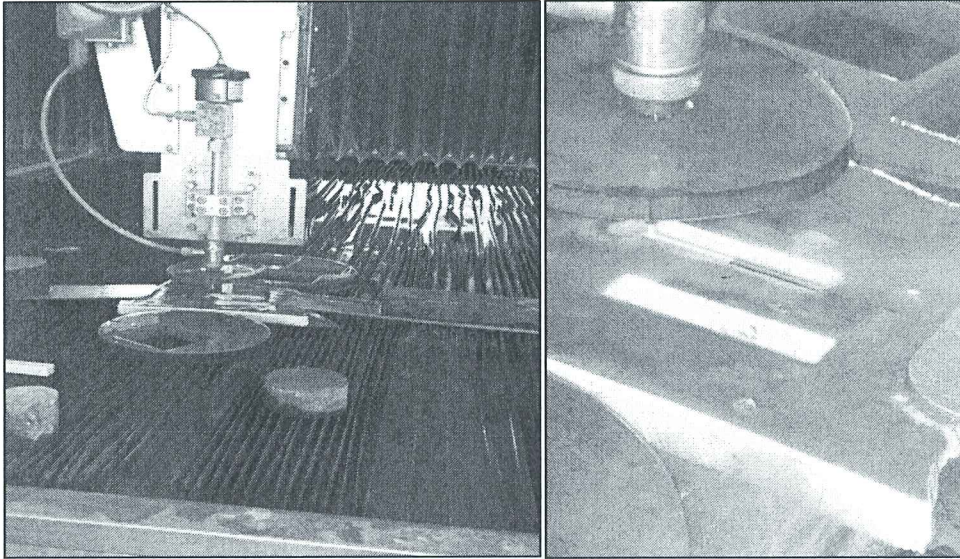


Literatür incelendiğinde; sert ve gevrek faz kalınlığı  $10\mu\text{m}$ ' den fazla olduğunda, kaynak dayanımının keskin bir şekilde azaldığı belirtilmiştir [53]. Kesme testi sonuçları incelendiğinde 60 dak' nın üzerindeki sürelerde genellikle kesme dayanımı düşmektedir. 60 dak' nın üzerindeki yapılan deneylerin numunelerinde, bu fazların  $5\mu\text{m}$ ' yi geçtiği ve bu sebeple de kaynak dayanımının düşmesine neden olduğu düşünülmüştür.

### 3.8 Mikrosertlik Deneyi

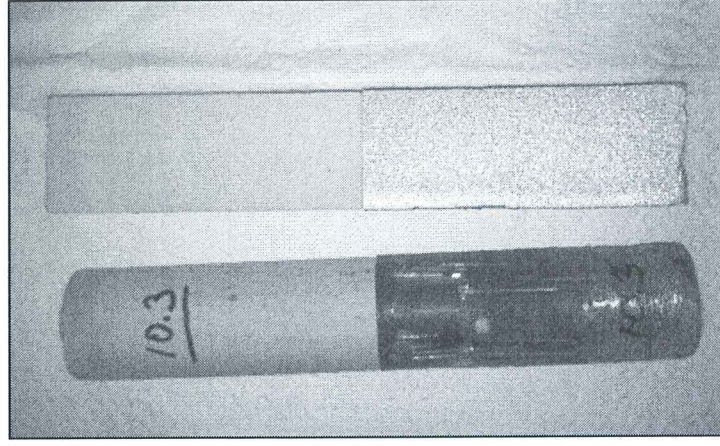
Kaynaklı numunelerin birleşme yüzeyine dik olarak alınan kesit üzerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca Cu ve porselen ana malzemelerine de sertlik ölçümü yapılarak kaynak öncesi ve sonrası sertlik değerleri karşılaştırılmıştır.

Kaynaklanmış numuneler su jeti ile ortadan kesilerek kesit alınmıştır. Su jeti ile kesit alma işlemi Balıkesir Neptün Waterjet Firması'nda yapılmıştır. Şekil 3.17' de su jeti ile kesme işlemi sırasında alınan fotoğraflar, Şekil 3.18' de su jeti ile kesilmiş kaynaklı Cu-porselen numunesi görülmektedir.



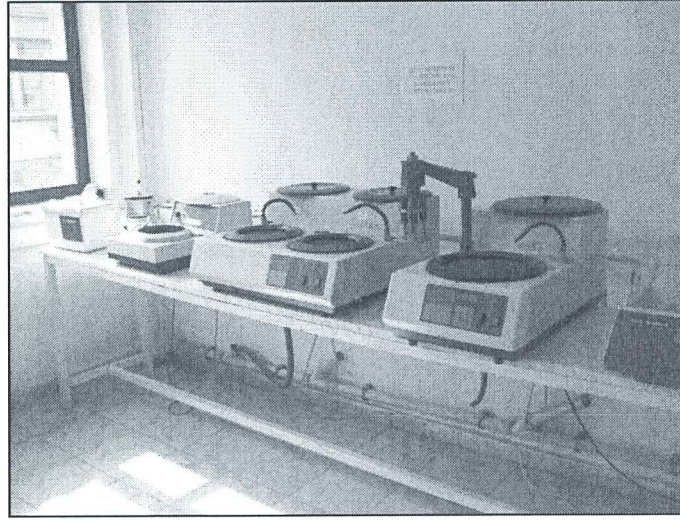
Şekil 3.17: Su jeti ile kesit alma işlemi





**Şekil 3.18:** Su jeti ile kesit alınmış kaynaklı numune örneği

Daha sonra kesit alınan numunelere Balıkesir Mühendislik Mimarlık Fakültesi' ndeki "METKON" marka zımpara ve parlatma cihazlarıyla sırasıyla P220, P400, P800 ve P1200' lük zımpara ile sulu zımpara yapılmıştır. Sulu zımpara işleminden sonra sırasıyla 6µm, 3µm pasta ve keçe ile parlatılmıştır. Daha sonra numune yüzeyleri metil alkol ile temizlenmiştir Şekil 3.19' da zımparalama ve parlatma cihazlarının görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 3.19:** Zımparalama ve parlatma cihazı resmi

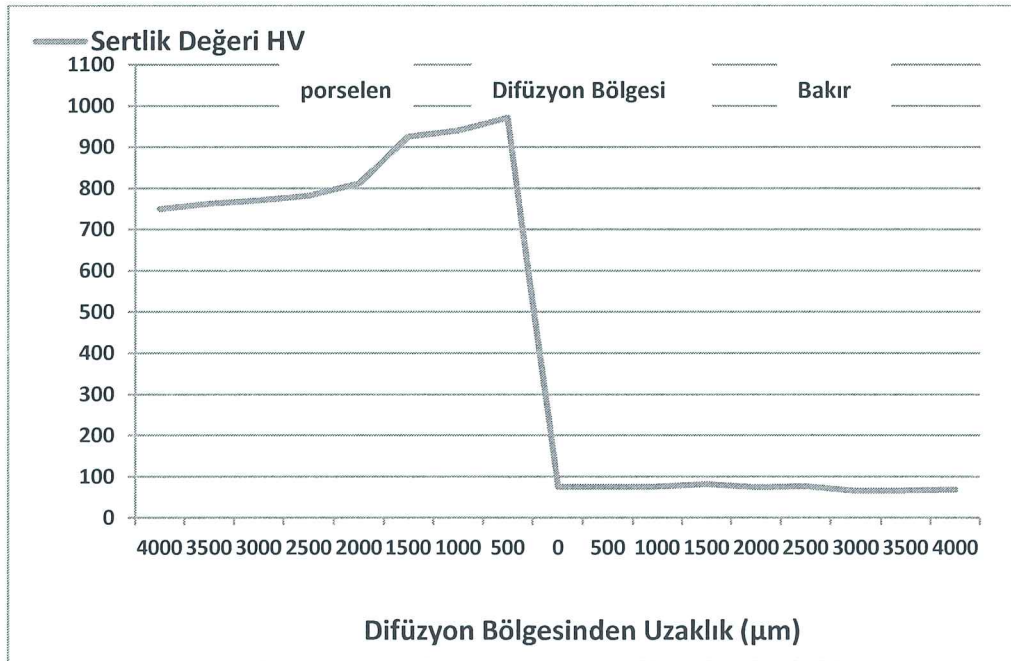
Deneyler Balıkesir Astsubay Meslek Yüksek Okulu'ndaki Metkon VH-1 Mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde 500 gr yük kullanılarak HV sertlik değerleri alınmıştır. Ana malzemelere ait bulunan sertlik değerleri aşağıda verilmiştir.

Bakır (Ana Malzeme): 105,57 HV Porselen (Ana Malzeme): 746,9 HV

Tablo 3.11' de alınan sertlik ölçüm değerleri, Şekil 3.20' de sertlik ölçüm değerleri grafiği verilmiştir.

Tablo 3.10: Kaynaklı numune sertlik değerleri

	Difüzyon Bölgesinden Uzaklık mikrometre ( $\mu\text{m}$ )		Sertlik Değeri HV
	Porselen HV	Bakır HV	
Porselen	4000		749,8
	3500		763,4
	3000		770,3
	2500		782,5
	2000		811,6
	1500		925,4
	1000		940,3
	500		971,1
	0		75,7
Bakır HV	500		74,7
	1000		75,5
	1500		82,7
	2000		74,4
	2500		76,5
	3000		66,2
	3500		66,5
	4000		69,3



Şekil 3.20: 11 nolu sırada verilen parametreler ile birleştirilmiş Cu-porselen difüzyon kaynaklı numunenin sertlik değişim grafiği

Sertlik ölçümleri yapıldıktan sonra, bu değerlere göre grafik çizilmiştir. Grafik incelenerek, kaynak şartlarının sertlik üzerine etkileri değerlendirildiğinde; 105,57 olan Cu ana malzemesinin sertlik değerinin, difüzyon kaynağı sonrasında 66,2-82,7 HV arasında değişen değerlere düştüğü gözlenmektedir. Cu numunenin sertlik değerinin düşüş sebebinin; soğuk çekilerek imal edilen Cu' ın, difüzyon kaynağı sırasında uygulanan 900 °C' lik sıcaklık nedeniyle bir anlamda gerilim giderme tavlmasına maruz kalmış gibi bir etki göstererek, içeriğindeki gerilmelerin kaynak sonrasında azalmasından dolayı olduğu düşünülmüştür.

Porselen ana malzemesinin 746,9 HV olan sertlik değerinin kaynak sonrasında 971,1 HV değerine yükseldiği, difüzyon bölgesinden uzaklaştıkça bu değer porselenin difüzyon kaynağı öncesi sertlik değerine indiği gözlenmektedir. Porselen numunenin sertlik değerinin artış sebebinin; yapılan XRD faz analizleriyle, literatüre de uygun olarak difüzyon işlemi sırasında, porselenin içeriğindeki mullit, korund, kristobalit ve cam fazlarının oranlarındaki artışından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ayrıca; porselene difüze olan Cu' la, porselenin içeriğindeki Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O 'nun ergimesinden ortaya çıkan oksijenin meydana getirdiği, Cu<sub>2</sub>O ve CuO fazlarından kaynaklandığı düşünülmüştür [76].

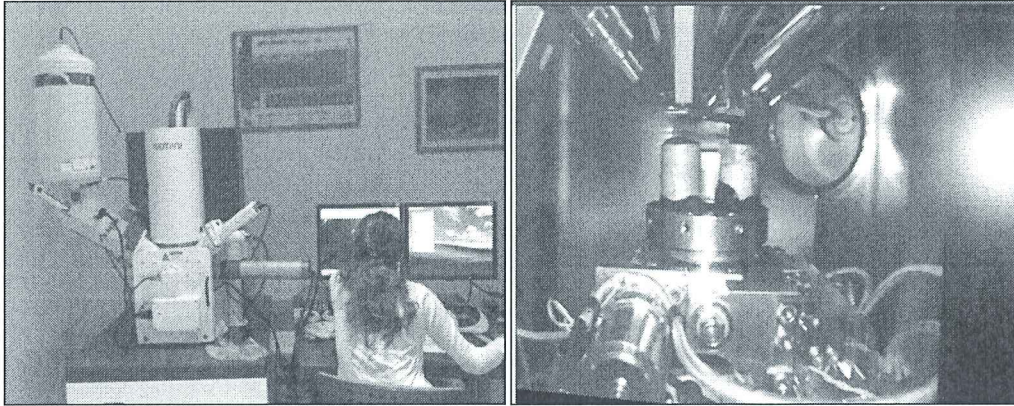


## 4. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

Difüzyon kaynağı sonrasında çıplak gözle yapılan incelemelerde, Cu ve porselen numuneler arasında kaynaklı birleştirmenin gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca kesme testi ve kırılma yerlerinden de inceleme yapıldığında; difüzyon kaynağı başarılı olmuştur. Bunun yanı sıra; Cu ve porselen malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirildikten sonra, malzemeler arası difüzyon miktarı ve kalınlığının görülebilmesi için; kaynaklı numunelere; mikroyapı incelemeleri ve EDX ve XRD analizleri yapılmıştır.

Kaynaklı numunenin kesit alınabilmesi için çeşitli yöntemler denenmiş ancak en iyi sonuç su jeti ile kesme ile gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı incelemeleri Anadolu Üniversitesi'ne bağlı Seramik Araştırma Merkezi A.Ş' de (SAM) daki elektron mikroskopları kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.1' de SAM daki incelemeler sırasında alınan fotoğraflar görülmektedir.

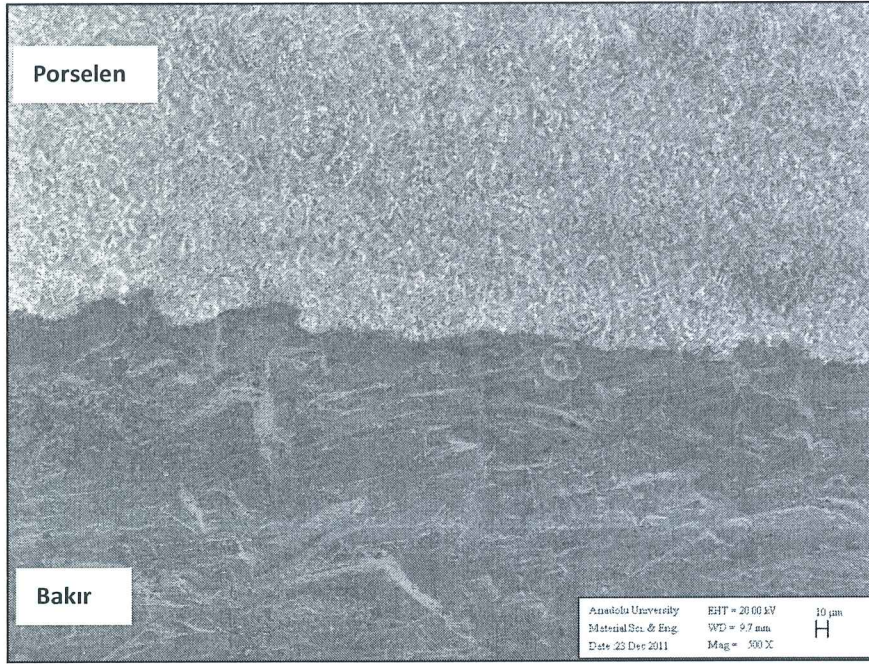


Şekil 4.1: SEM-EDX incelemeleri

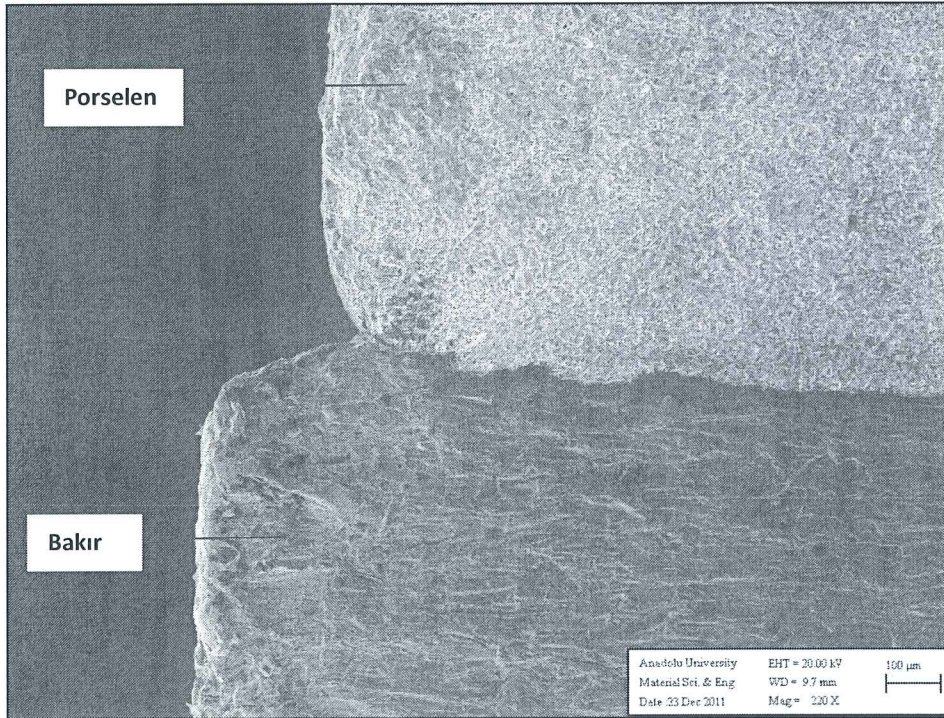
### 4.1 Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Elektron mikroskobuyla yapılan mikroyapı incelemelerine göre; bulunan sonuçlar Şekil 4.2–Şekil 4.18' de verilmiştir. Mikro yapı incelemelerine göre Cu ve porselenin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinin başarılı olduğu görülmüştür.



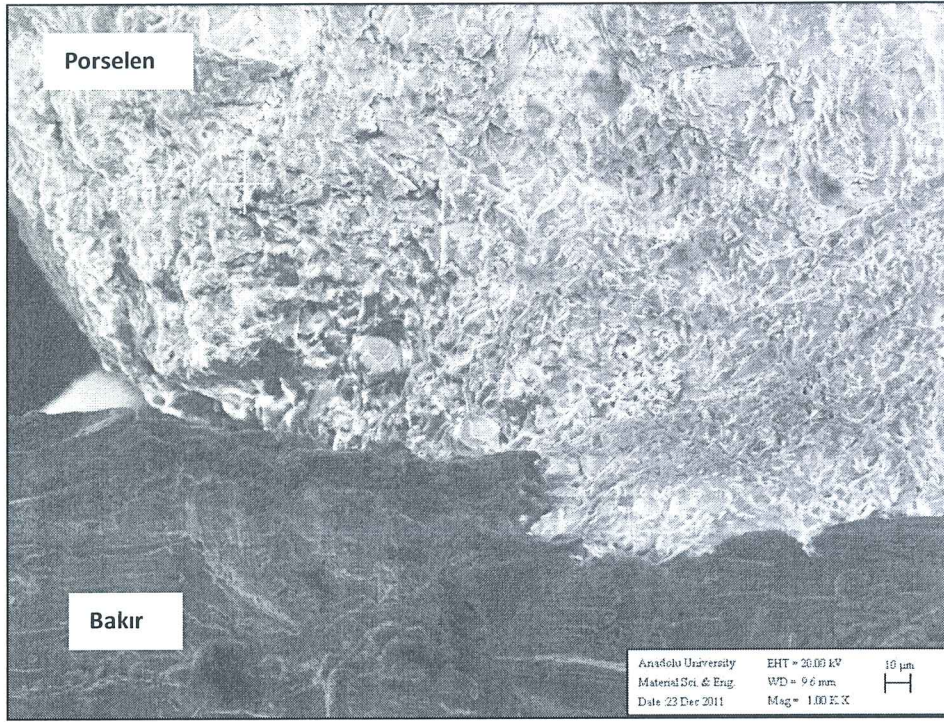


Şekil 4.2: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü

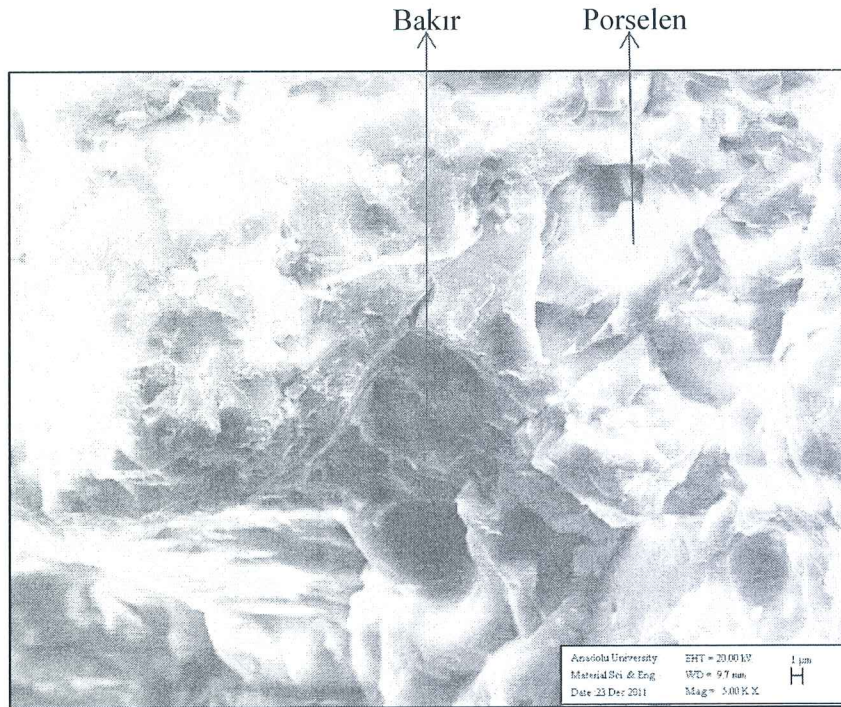


Şekil 4.3: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü



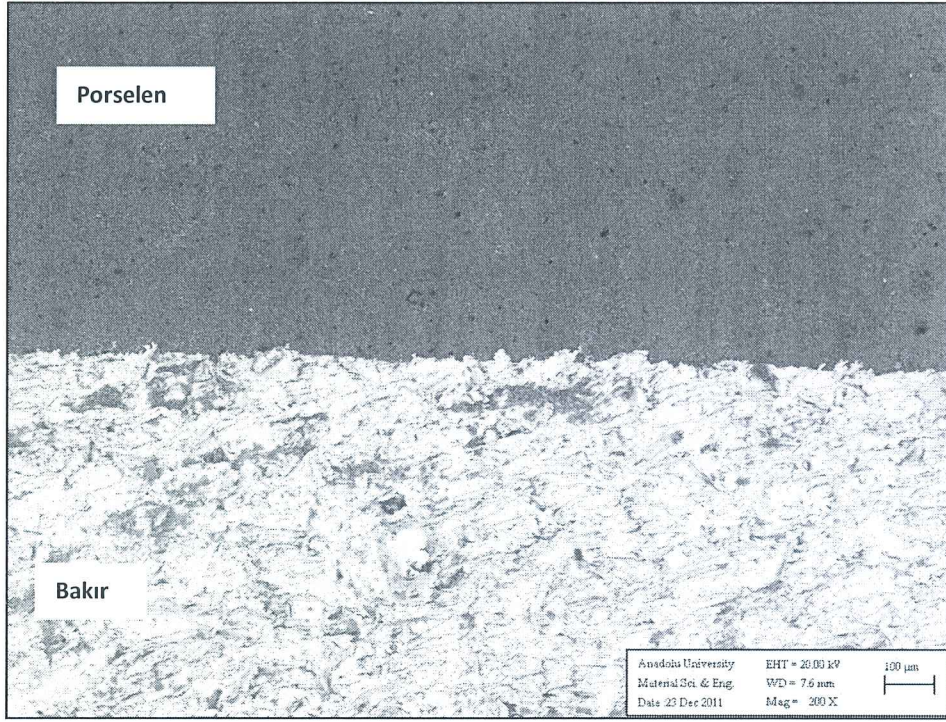


Şekil 4.4: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü

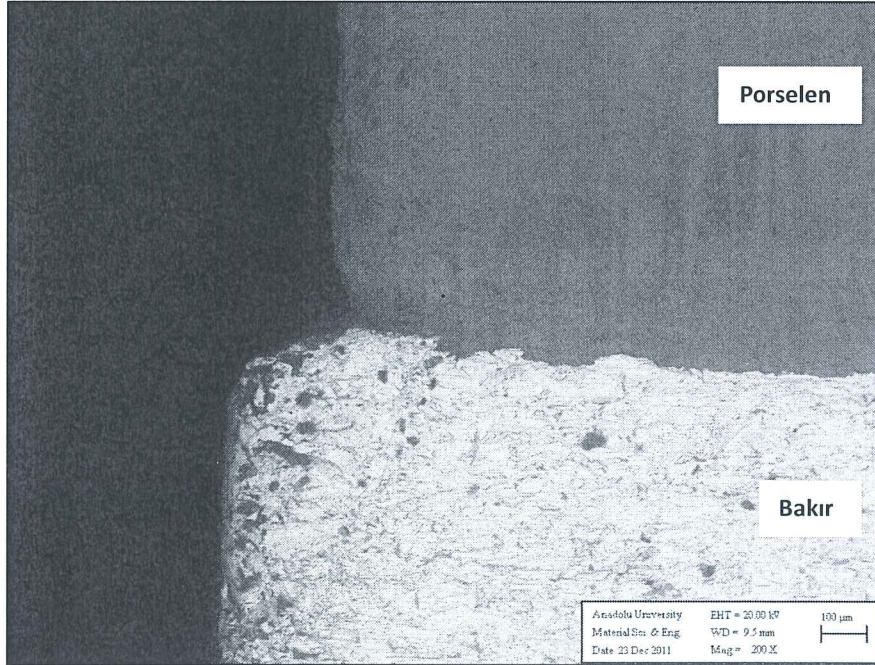


Şekil 4.5: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü



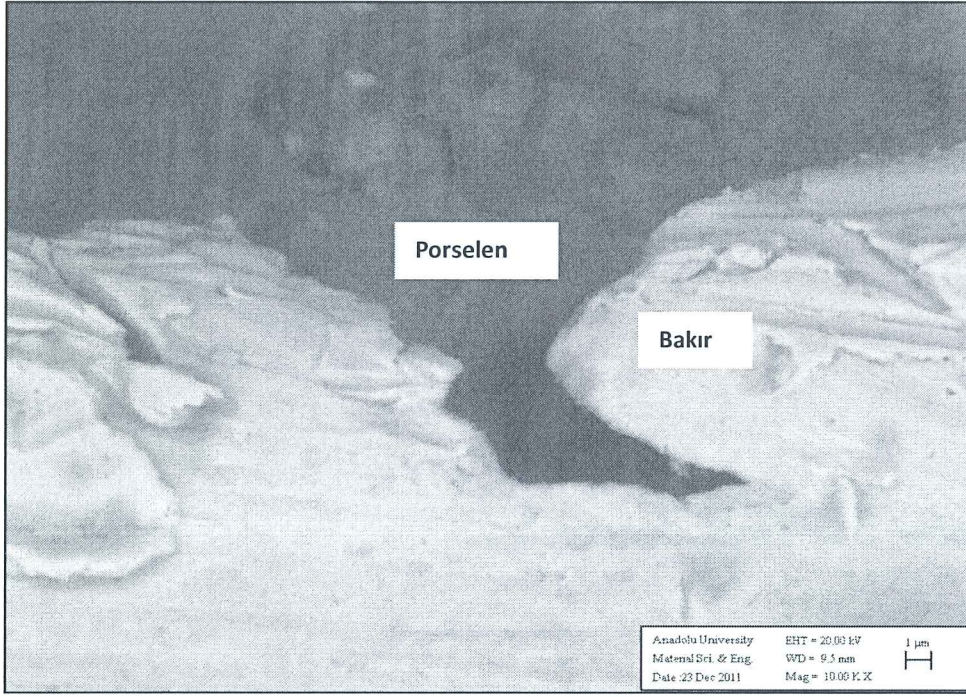


Şekil 4.6: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü

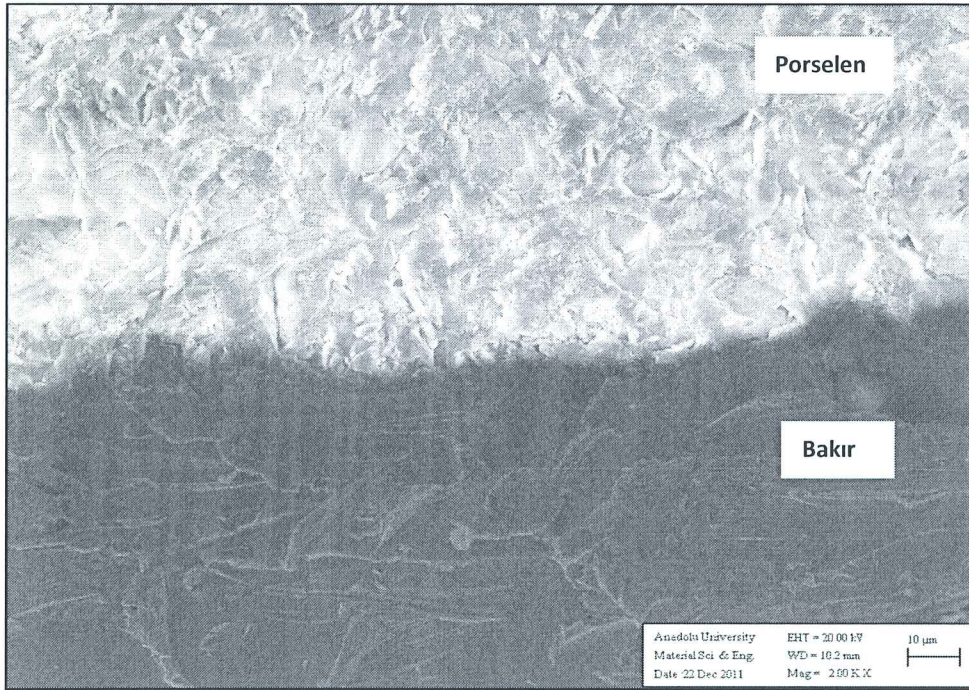


Şekil 4.7: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü



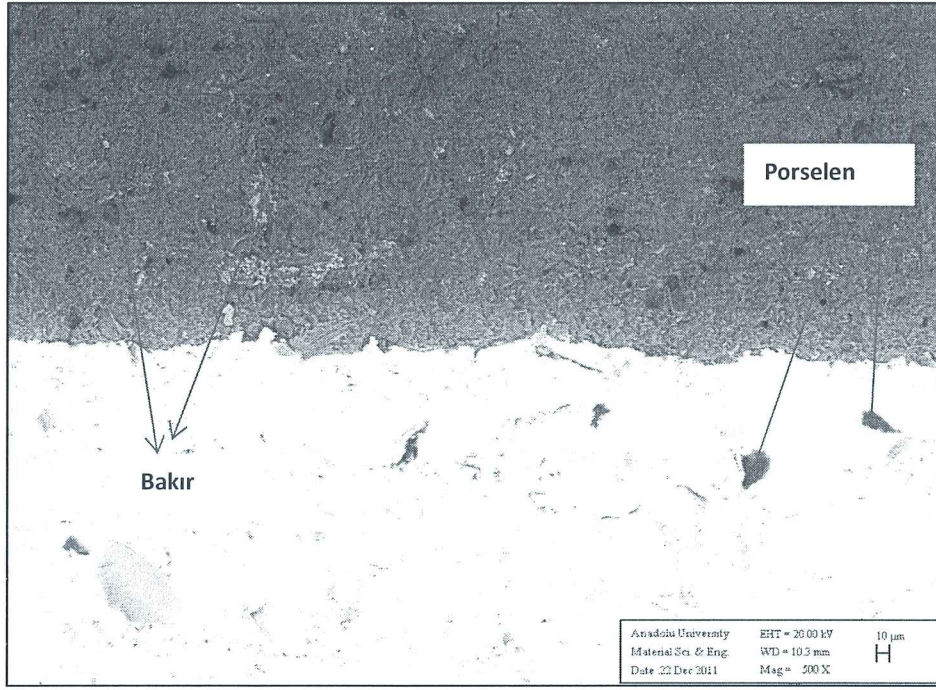


**Şekil 4.8:** Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü

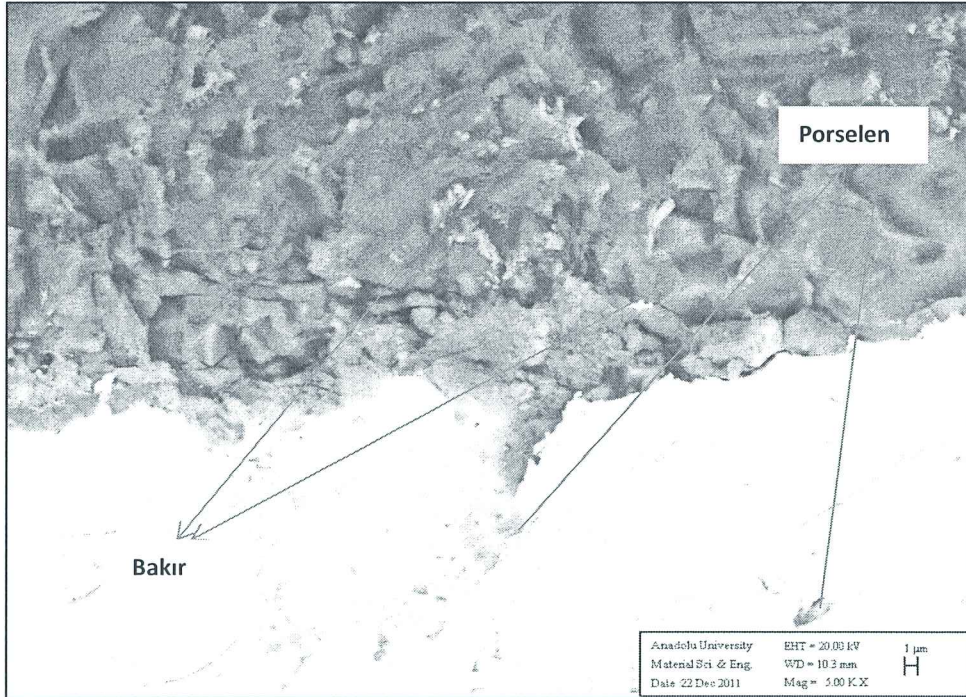


**Şekil 4.9:** Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü





Şekil 4.10: Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.11: Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü



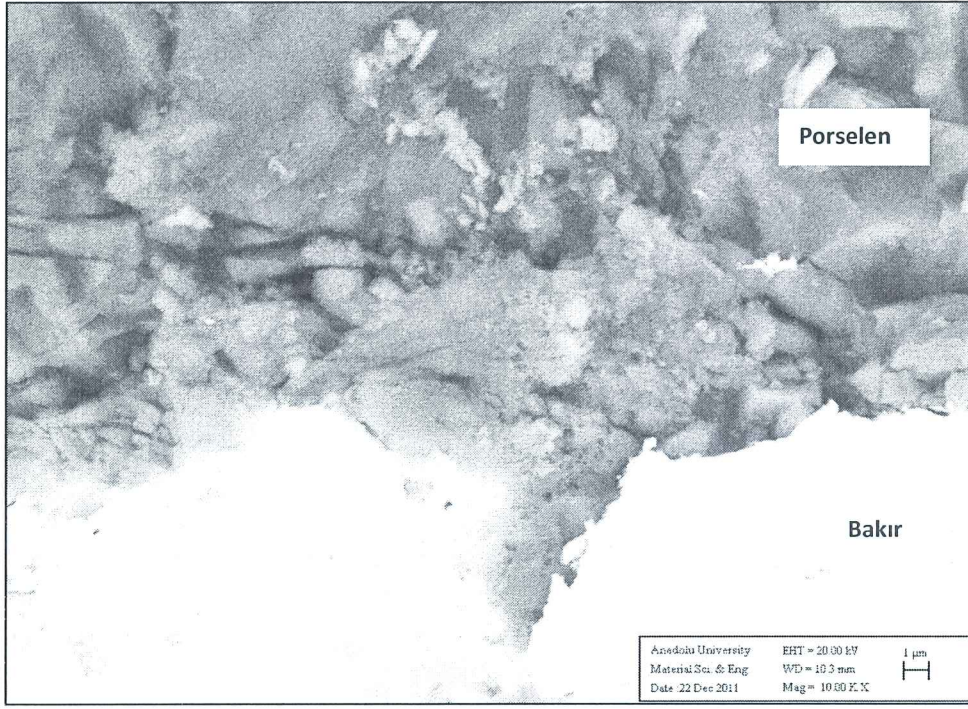


Şekil 4.12: Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.13: Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü



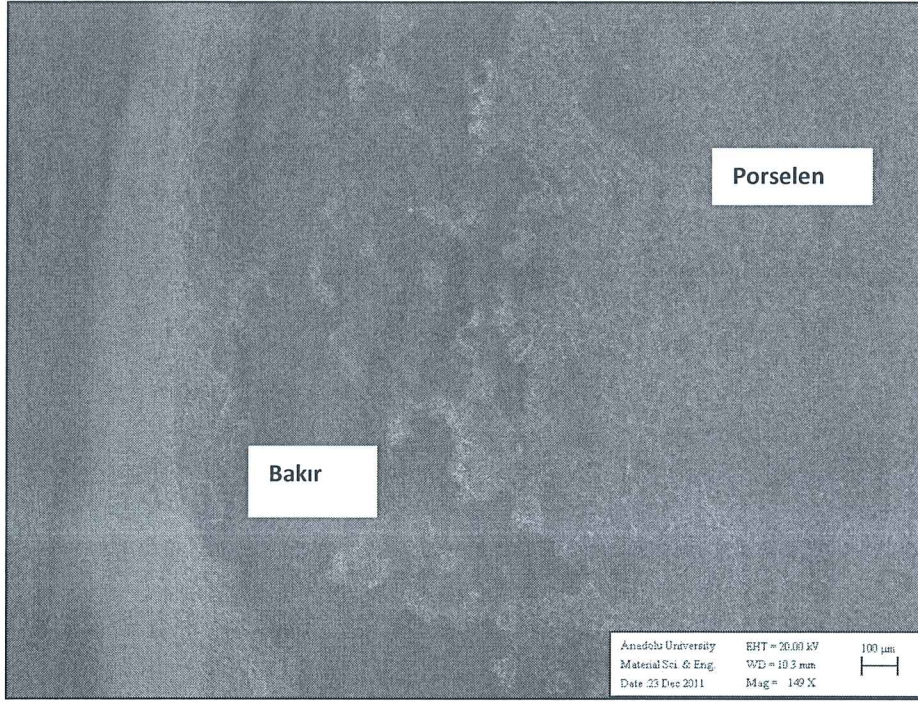


**Şekil 4.14:** Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü

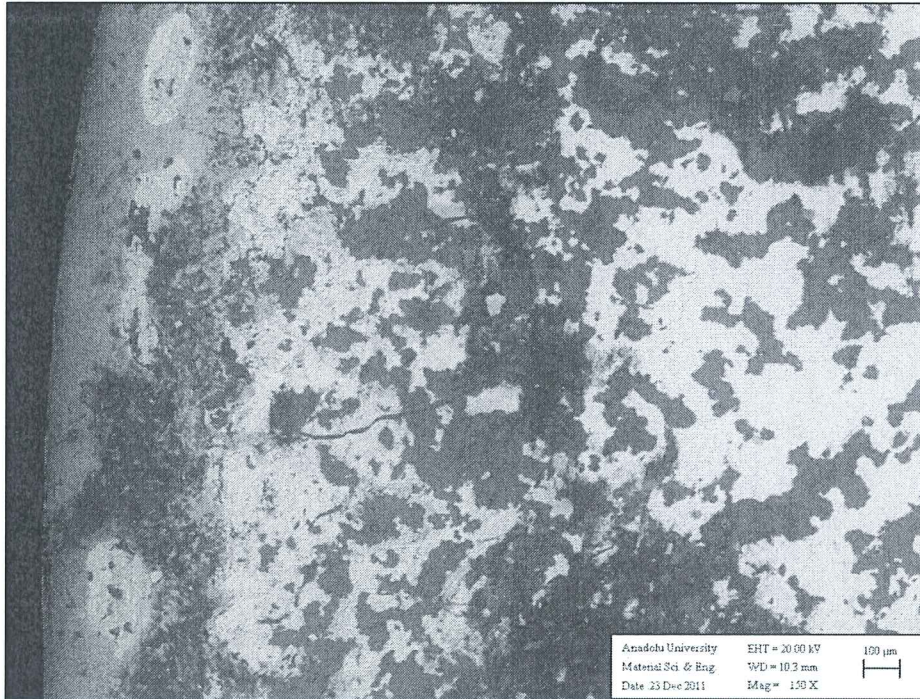


**Şekil 4.15:** 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin kırılma yüzeyinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü



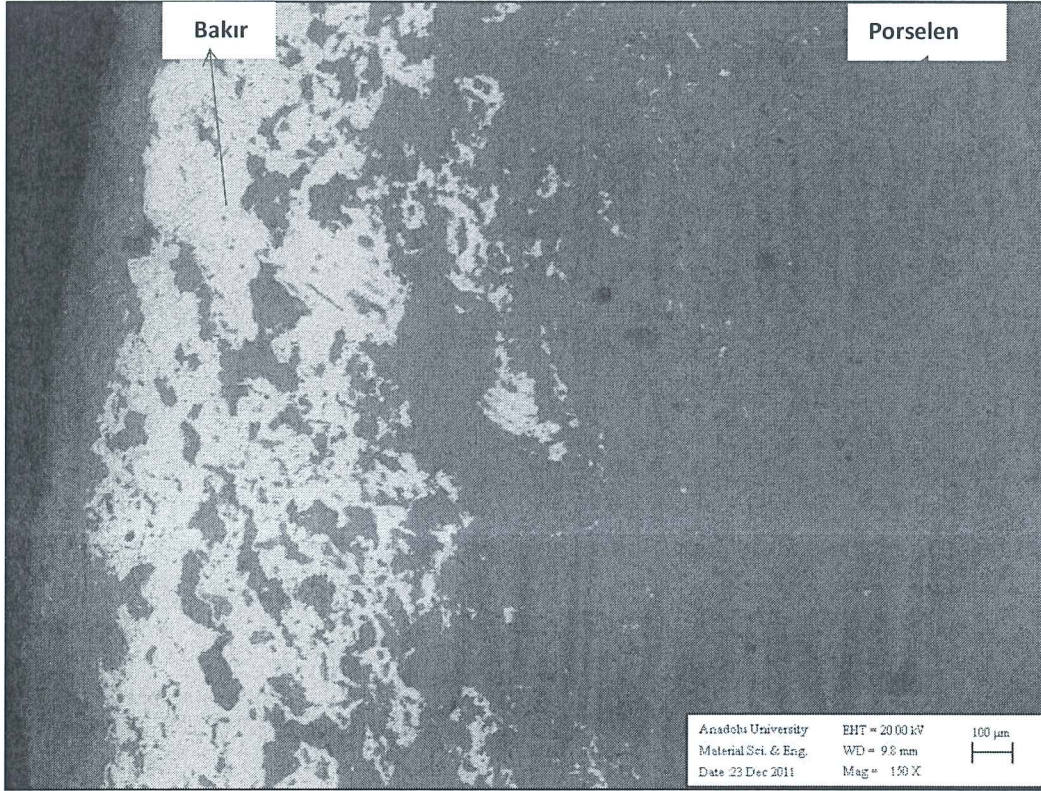


Şekil 4.16: 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen numunenin kırılma yüzeyinin ikincil elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.17: 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin kırılma yüzeyinin geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü





**Şekil 4.18:** 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen numunenin kırılma yüzeyinin geri yansıyan elektron incelemesi ile mikroyapı görüntüsü

Şekil 4.2 – Şekil 4.8 da verilen mikroyapı görüntüleri 7 nolu sıradaki parametreler ile difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Cu-porselen numunelerine aittir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; porselen ve Cu' ın difüzyon bölgesinde iç içe geçtiği ve difüzyon kaynağının başarılı olduğu gözlenmektedir. Porselen numune tarafında Cu elementine, Cu numune tarafında da porselen elementlerine ait görüntüler bulunmaktadır. Şekil 4.7 de geri yansıyan elektronla alınan kaynaklı bölge görüntülerinde, açık renkli izlenen Cu ve koyu renkli izlenen porselen numunelerin kaynak yüzeylerinin oldukça düzgün birleştiği görülmektedir. Şekil 4.8 da geri yansıyan elektronla alınan görüntülerde ise; porselenin içine difüze olan Cu elementi görülmektedir. Bu numuneye ait kesme testi sonuçları incelendiğinde; 93,35 MPa'lık bir kesme dayanımı ile kaynaklı porselen ve Cu' ın oldukça yüksek bir kaynak mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.9 – Şekil 4.14 de verilen mikroyapı görüntüleri 9 nolu sıradaki parametreler ile difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Cu-porselen numunelerine aittir.

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; porselen ve Cu' ın difüzyon bölgesinde 7 nolu numunedeki gibi iç içe geçtiği ve difüzyon kaynağının başarılı olduğu gözlenmektedir. Porselen numune tarafında Cu elementine Cu numune tarafında da porselen elementlerine ait görüntüler bulunmaktadır. Şekil 4.11 de geri yansıyan elektronla alınan kaynaklı bölge görüntülerinde, Cu ve porselen numunelerin kaynak yüzeylerinin oldukça düzgün birleştiği görülmektedir. Şekil 4.14 de geri yansıyan elektronla alınan görüntülerde ise; porselenin içine difüze olan Cu elementi görülmektedir. Bu numuneye ait kesme testi sonuçları incelendiğinde; 99,89 MPa'lık bir kesme dayanımı ile kaynaklı porselen ve Cu' ın oldukça yüksek bir kaynak mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

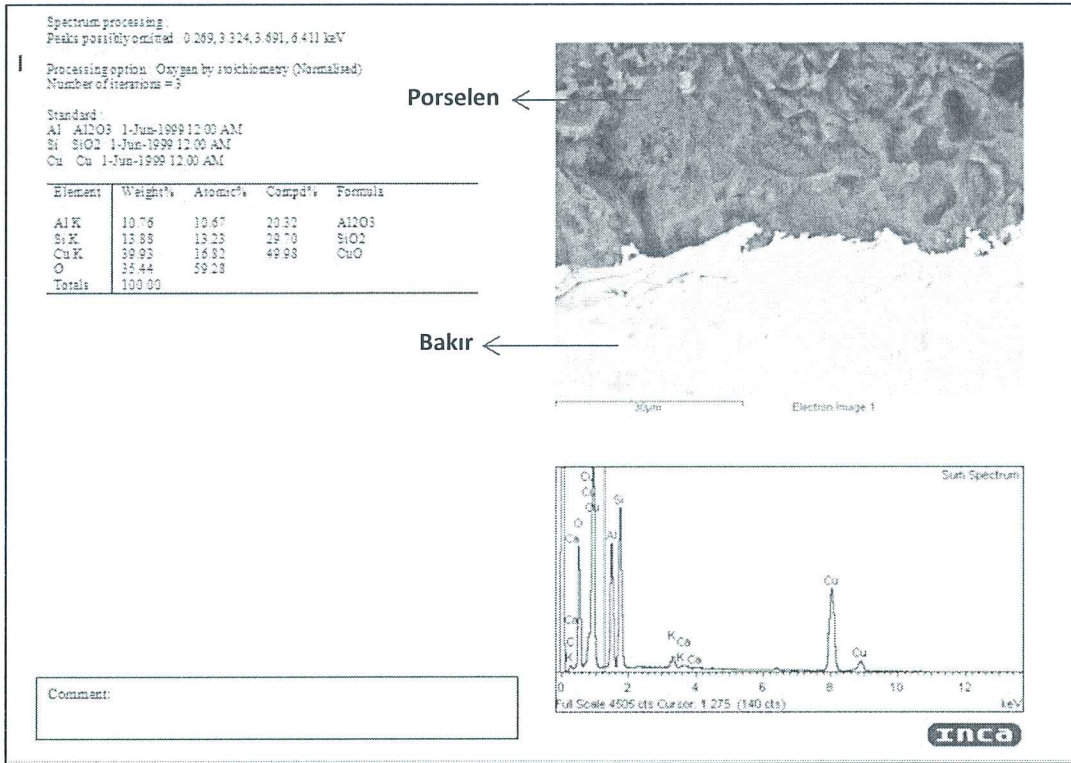
Şekil 4.15 – Şekil 4.18 de verilen mikroyapı görüntüleri 11 nolu sıradaki parametreler ile difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş ve kesme testi sonrası Cu ve porselen tarafındaki kırılma yüzeylerine aittir. Mikro yapı görüntüleri incelendiğinde; kırılma yüzeylerinde, difüzyon kaynağının başarılı olduğu gözlenmektedir. Porselen numune tarafında Cu elementine Cu numune tarafında da porselen elementlerine ait görüntüler bulunmaktadır. Şekil 4.17 de geri yansıyan elektronla alınan görüntülerde; Cu numune üzerinde koyu renkli izlenen porselene ait görüntüler tespit edilmiştir. Şekil 4.18' de geri yansıyan elektronla alınan görüntülerde, porselen numune üzerinde açık renkli izlenen Cu' a ait görüntüler tespit edilmiştir. Tüm difüzyon deneyleri içinde en yüksek kaynak mukavemetini 11 nolu sıradaki parametreler ile yapılan numune göstermektedir. Bu numuneye ait kesme testi sonuçları incelendiğinde; 115,66 MPa'lık bir kesme dayanımı ile oldukça yüksek bir kaynak mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

## **4.2 EDX İncelemeleri ve Faz Analizi**

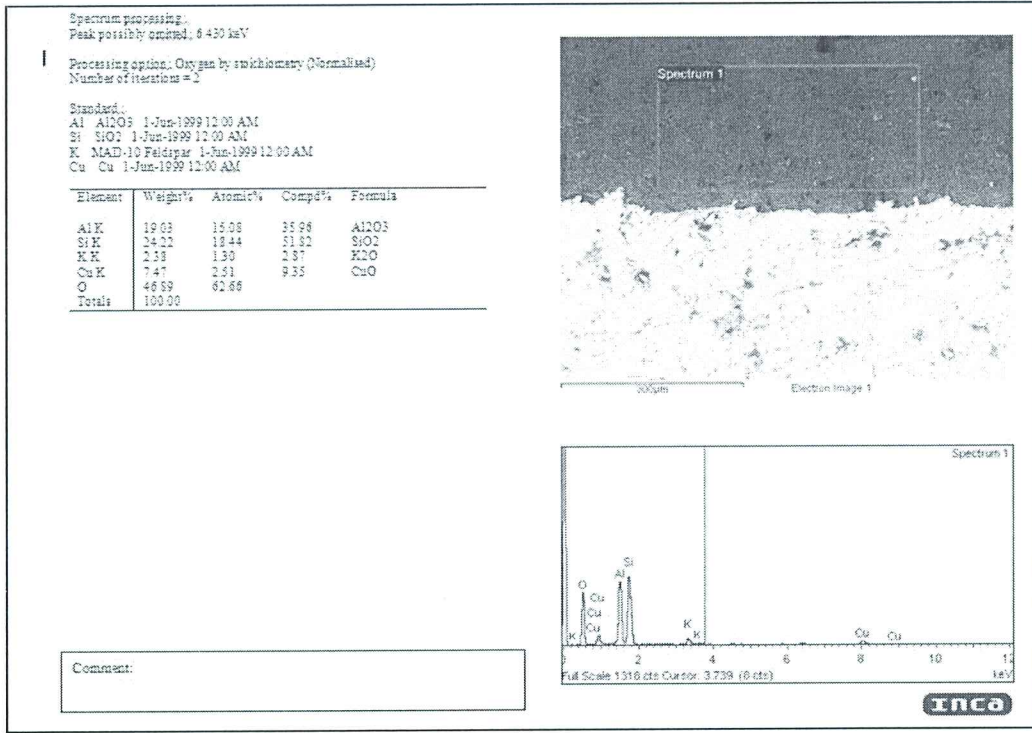
### **4.2.1 EDX İncelemeleri**

EDX Analizi ile yapılan yapı incelemelerine göre; bulunan sonuçlar Şekil 4.19–Şekil 4.37' de verilmiştir. EDX analizleri incelendiğinde; Cu ve porselenin difüzyon bölgesinde iç içe geçtiği, difüzyon kaynağının başarılı olduğu, kesme testi sonuçları ve mikro yapı incelemeleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.



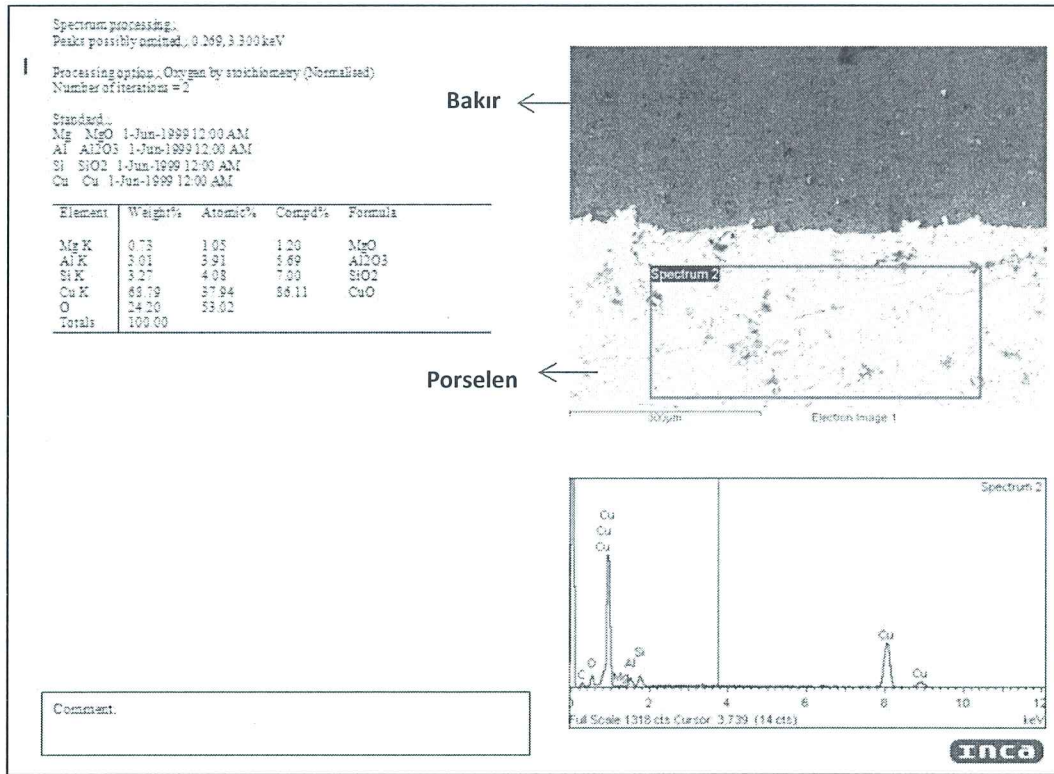


**Şekil 4.19:** Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin EDX analizi

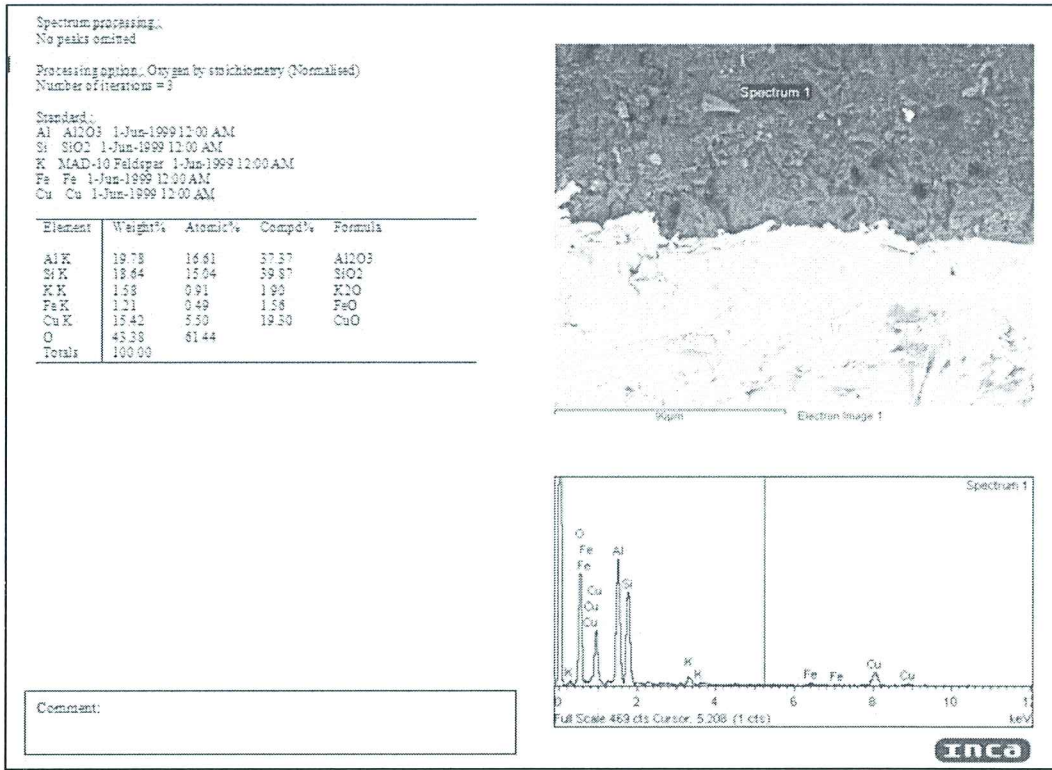


Şekil 4.20: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin porselen tarafının EDX analizi



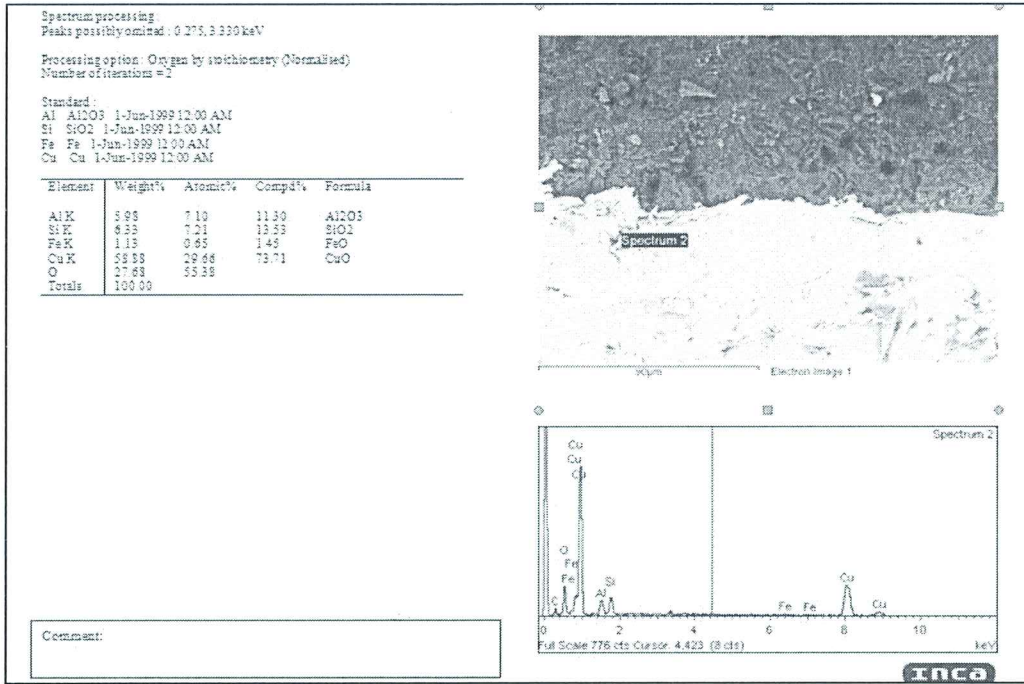


**Şekil 4.21:** Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin Cu tarafının EDX analizi

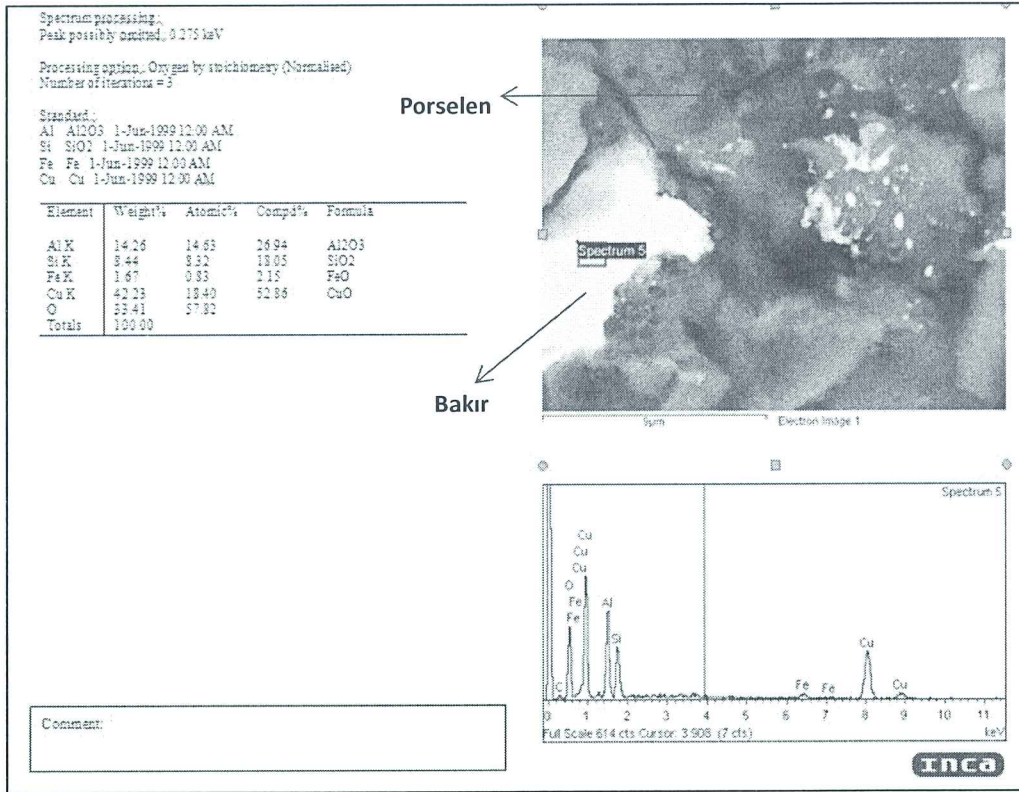


Şekil 4.22: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin porselen tarafının EDX analizi

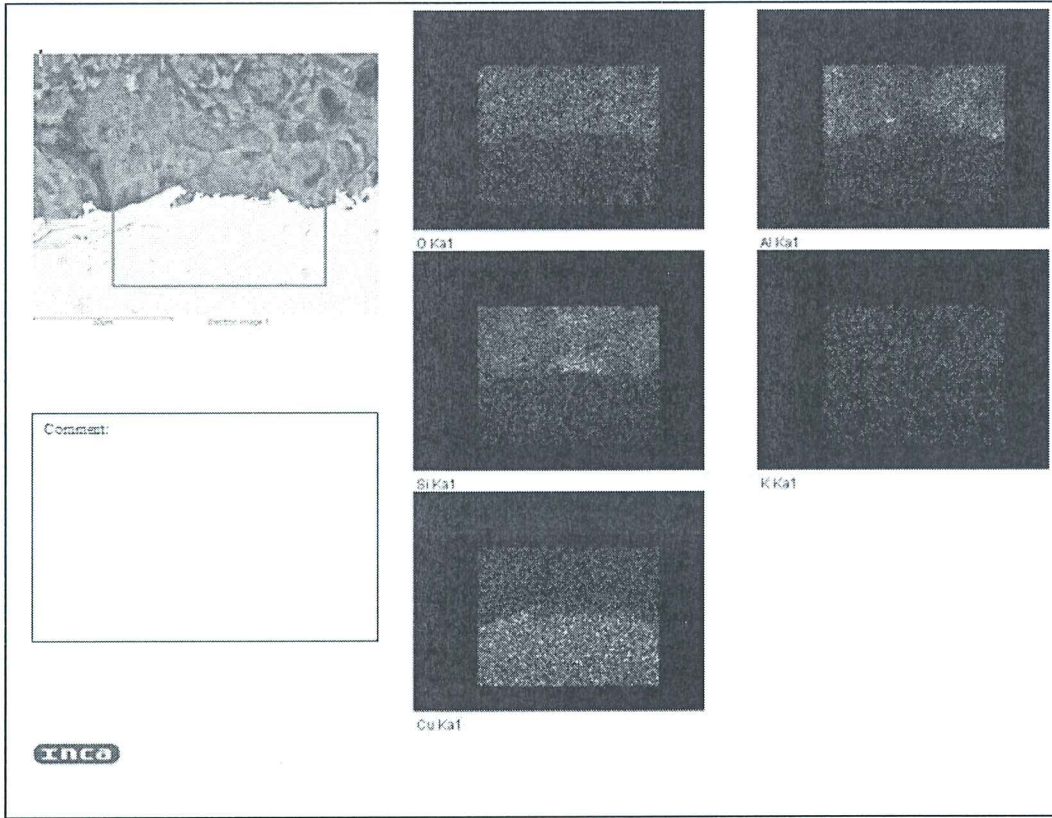




Şekil 4.23: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin Cu tarafının EDX analizi



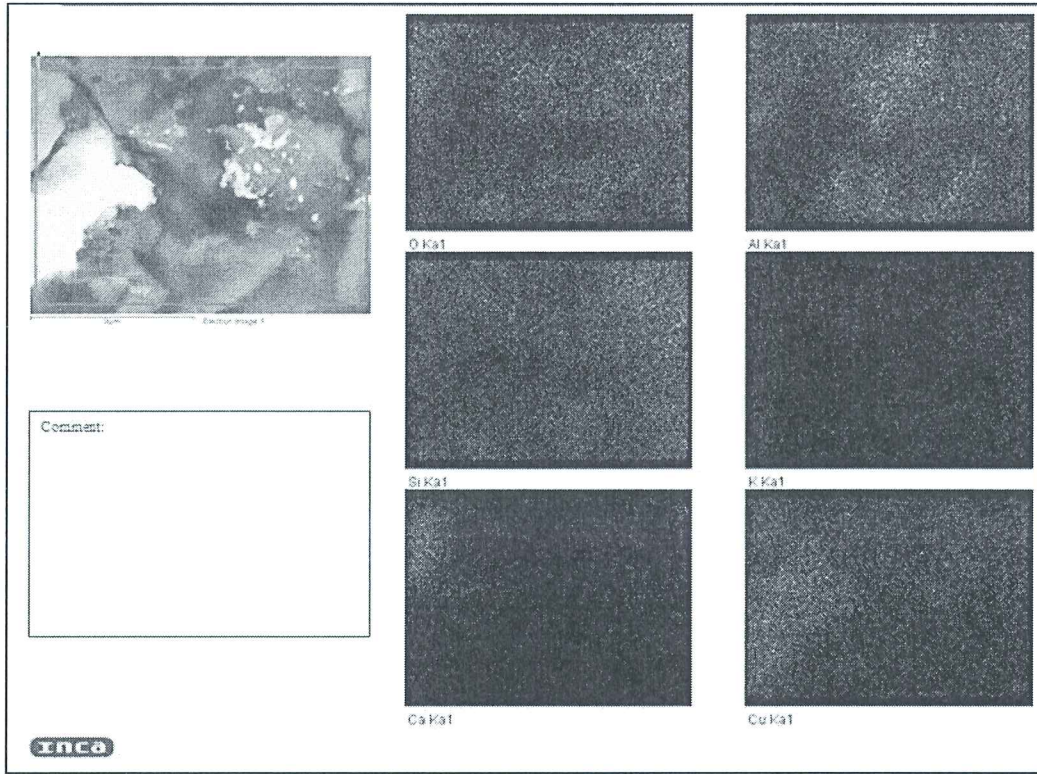
Şekil 4.24: Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin EDX analizi (Porselen elementlerinin içine yerleşmiş Cu elementi)



**Şekil 4.25:** Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin haritalama yöntemi ile incelenmesi

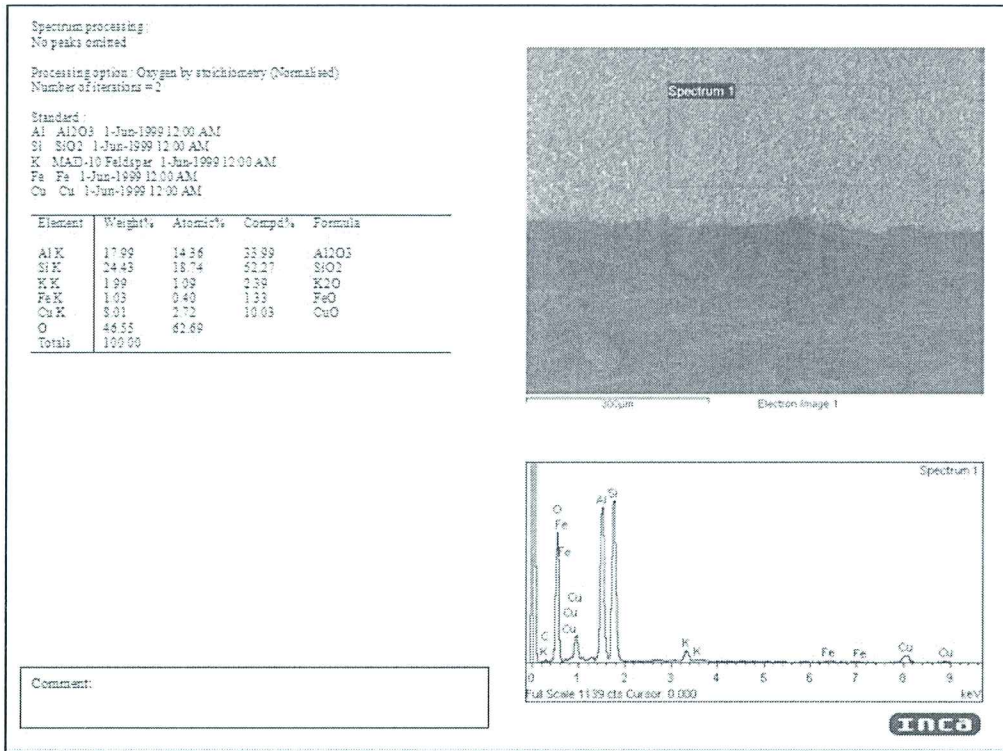
Şekil 4.25 'de 7 nolu deney numunesinin difüzyon bölgesindeki elementler haritalama yöntemi ile analiz edilmiştir. Beyaz renkli görüntüler elementleri göstermektedir.



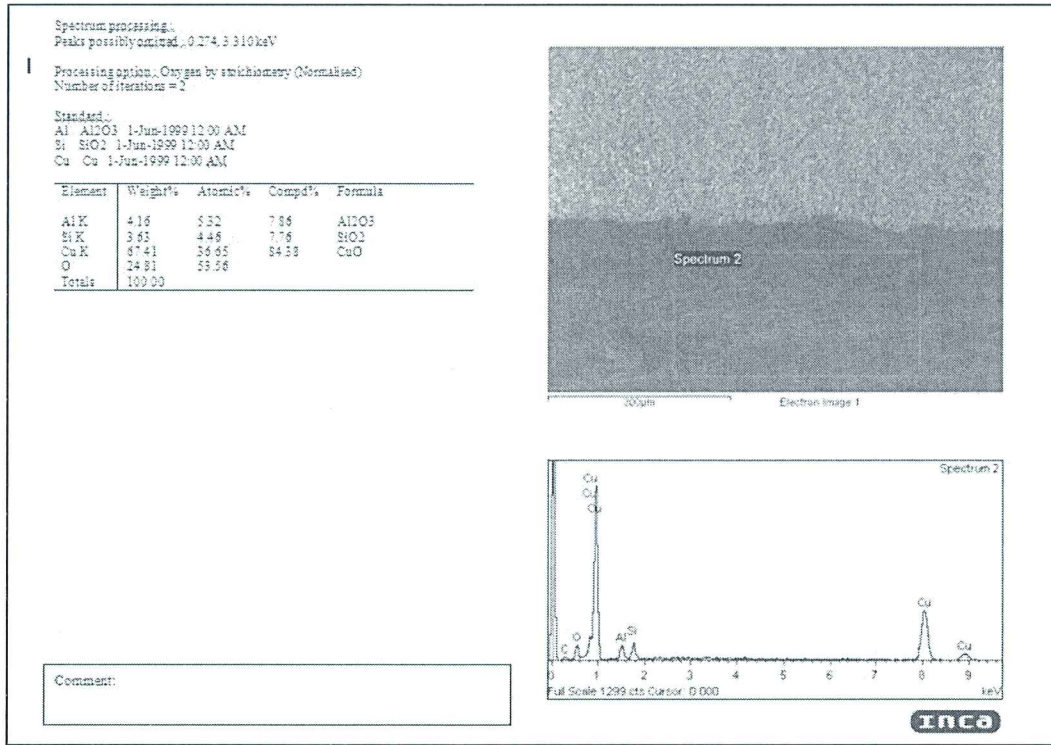


**Şekil 4.26:** Cu-porselen 7 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin haritalama yöntemi ile element analizi (Porselen elementlerinin içine yerleşmiş Cu elementi)

Şekil 4.26 'de 7 nolu deney numunesinin difüzyon bölgesindeki elementler haritalama yöntemi ile analiz edilmiştir. Beyaz renkli görüntüler elementleri göstermektedir.

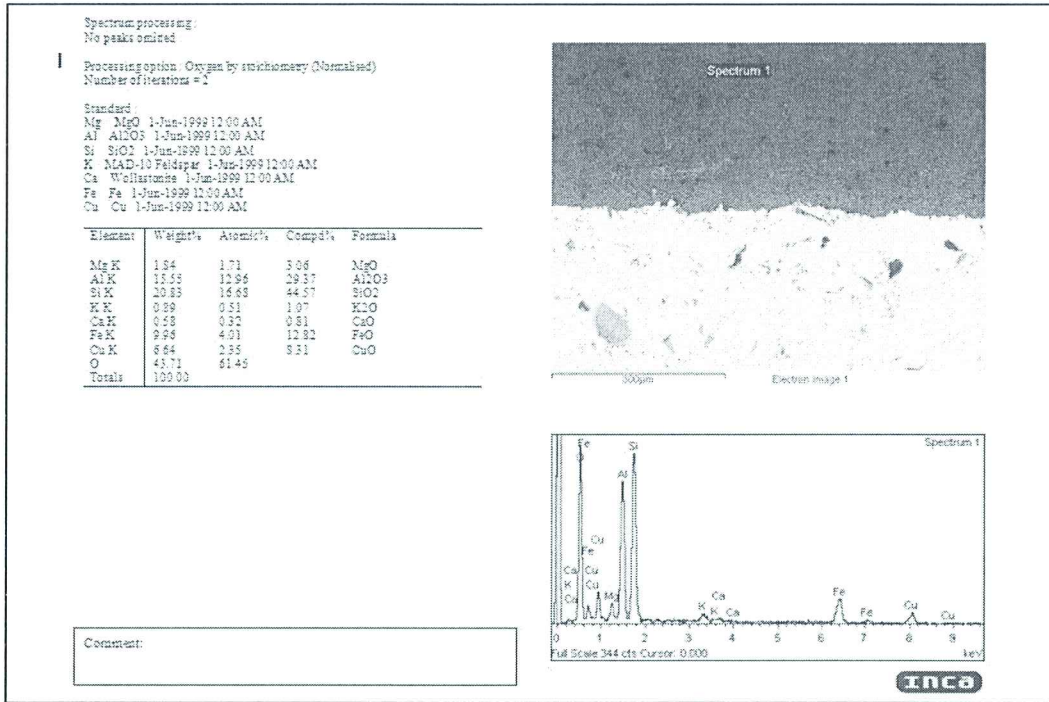


Şekil 4.27: Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin porselen tarafının EDX analizi (Porselen elementlerinin içine yerleşmiş Cu elementi)

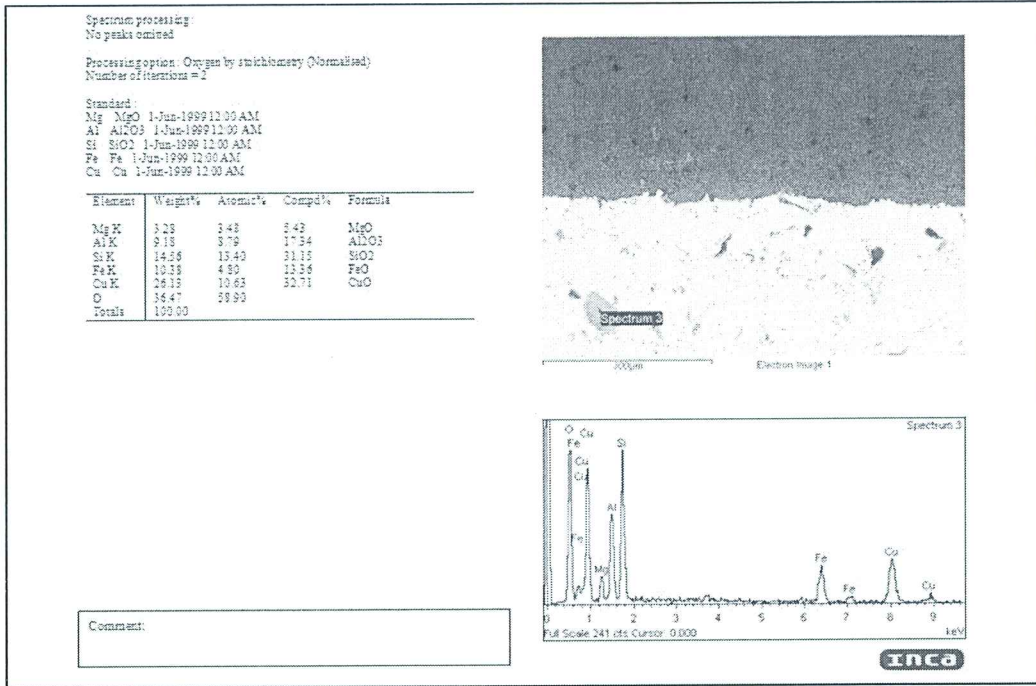


**Şekil 4.28:** Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin Cu tarafının EDX analizi (Cu elementinin içine yerleşmiş porselen elementleri)

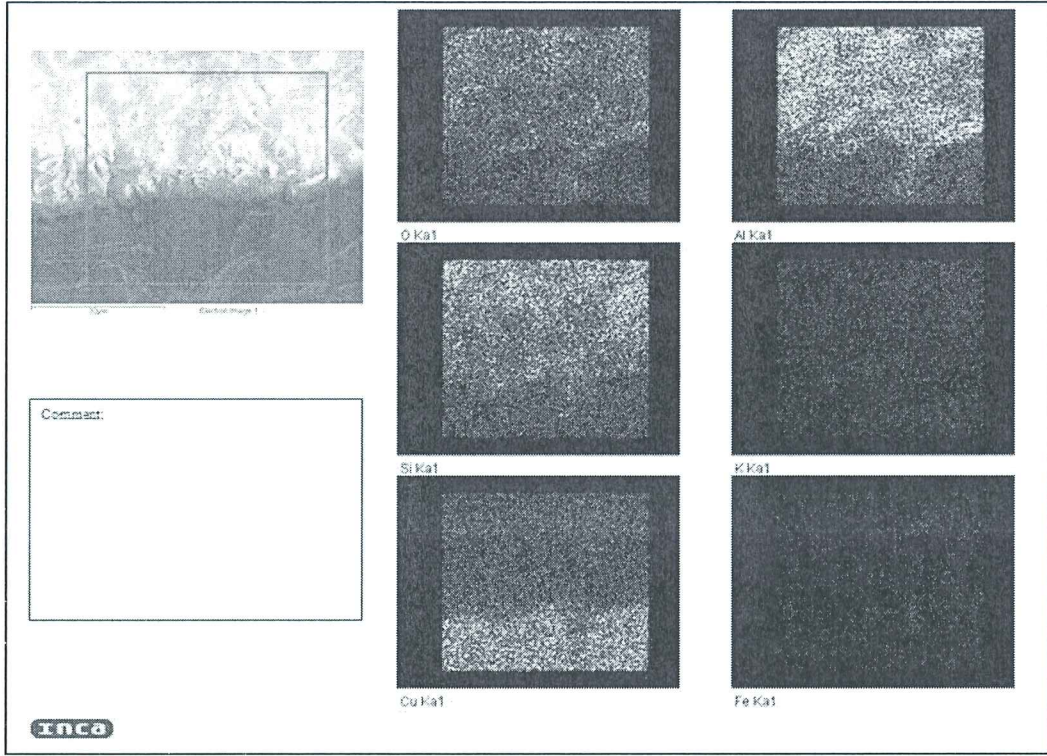




Şekil 4.29: Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin porselen tarafının EDX analizi (Porselen elementinin içine yerleşmiş Cu elementi)



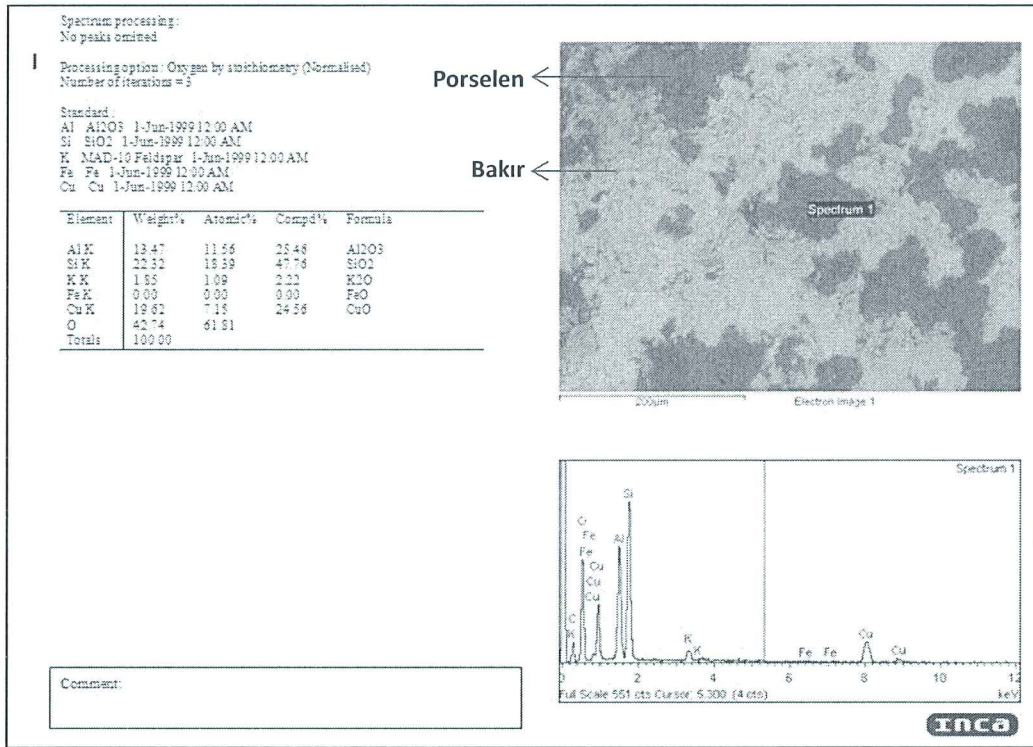
**Şekil 4.30:** Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin Cu tarafının EDX analizi (Cu elementinin içine yerleşmiş porselen elementleri)



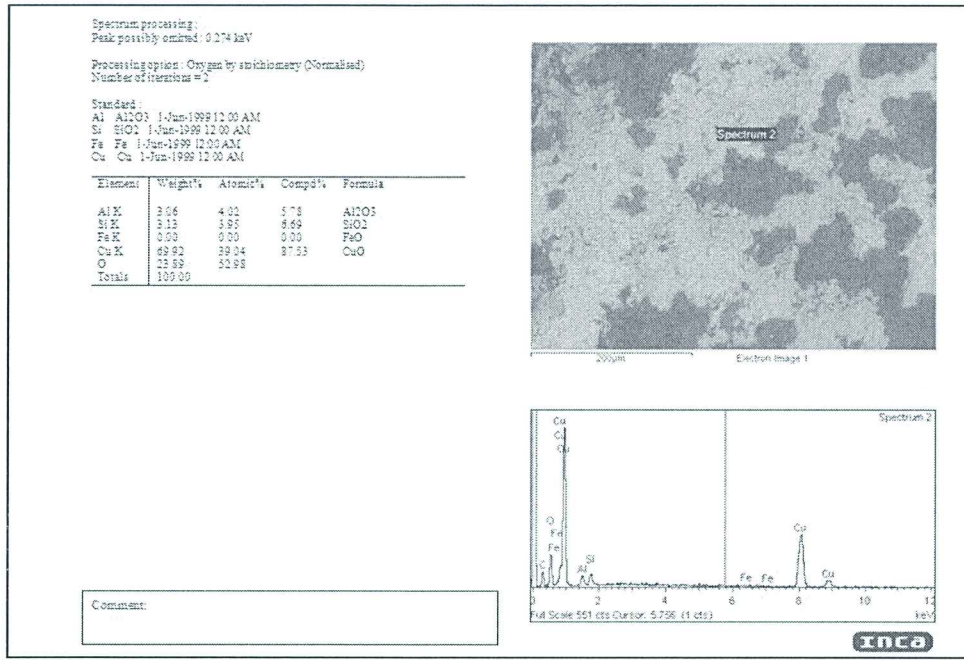
**Şekil 4.31:** Cu-porselen 9 nolu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin haritalama yöntemi ile element analizi

Şekil 4.31 'de 9 nolu deney numunesinin difüzyon bölgesindeki elementler haritalama yöntemi ile analiz edilmiştir. Beyaz renkli görüntüler elementleri göstermektedir.

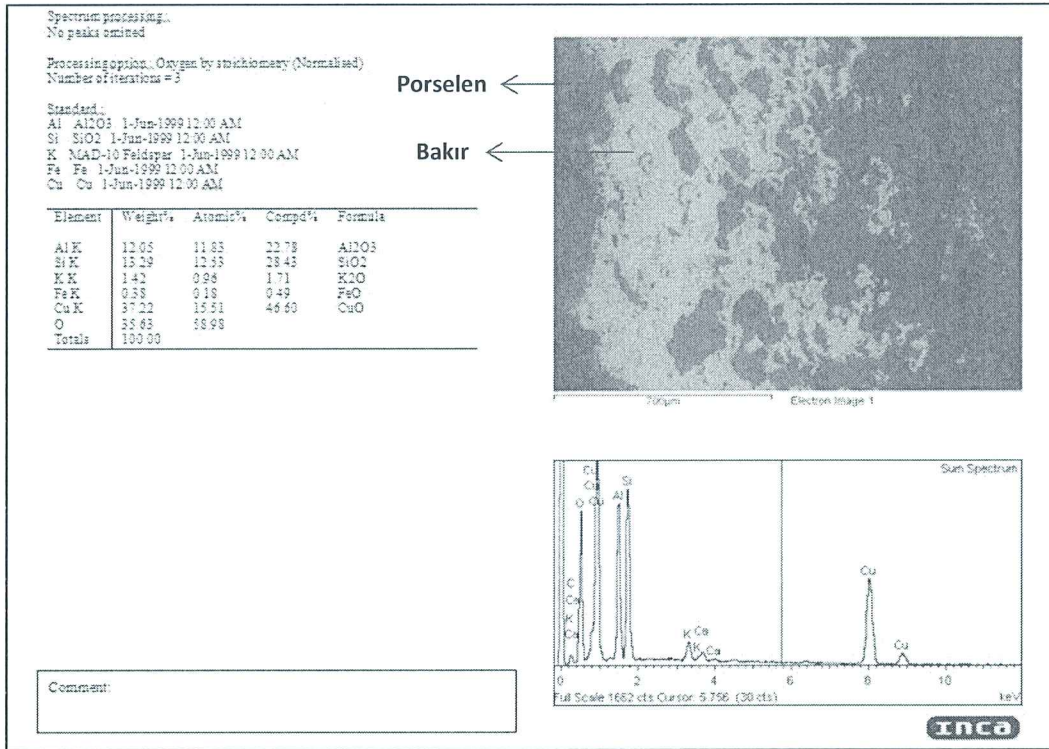




Şekil 4.32: 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin kırılma yüzeyinin EDX analizi. (Cu elementinin arasına yerleşmiş porselen elementleri)

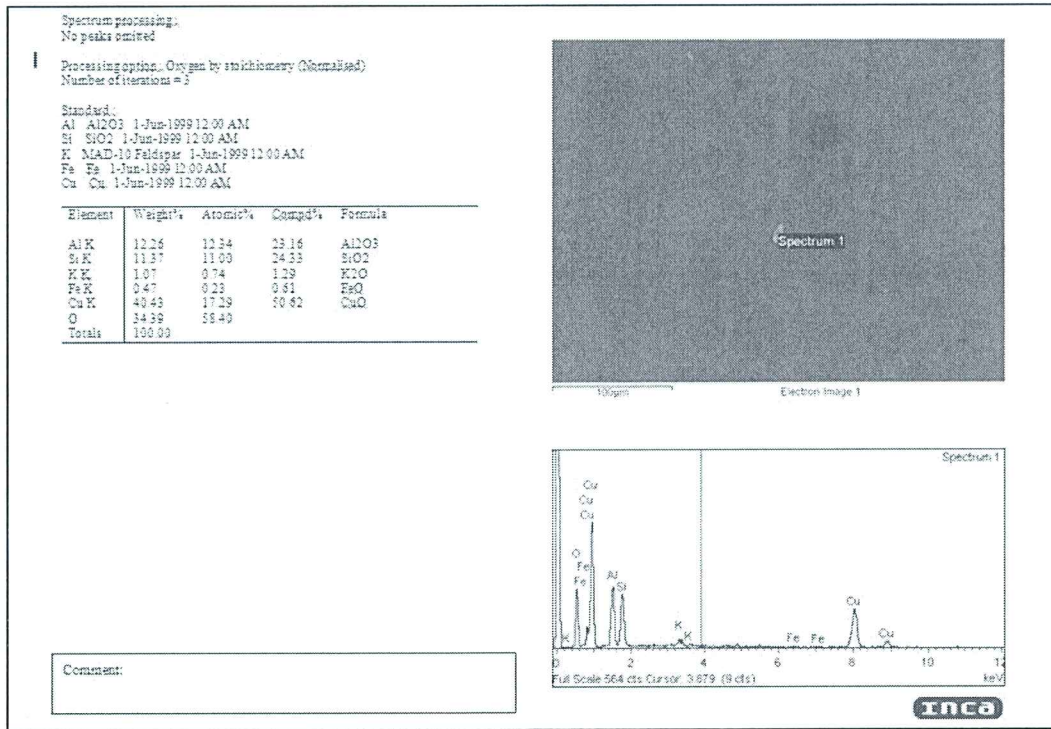


Şekil 4.33: 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin kırılma yüzeyinin EDX analizi. (Cu elementinin arasına yerleşmiş porselen elementleri)

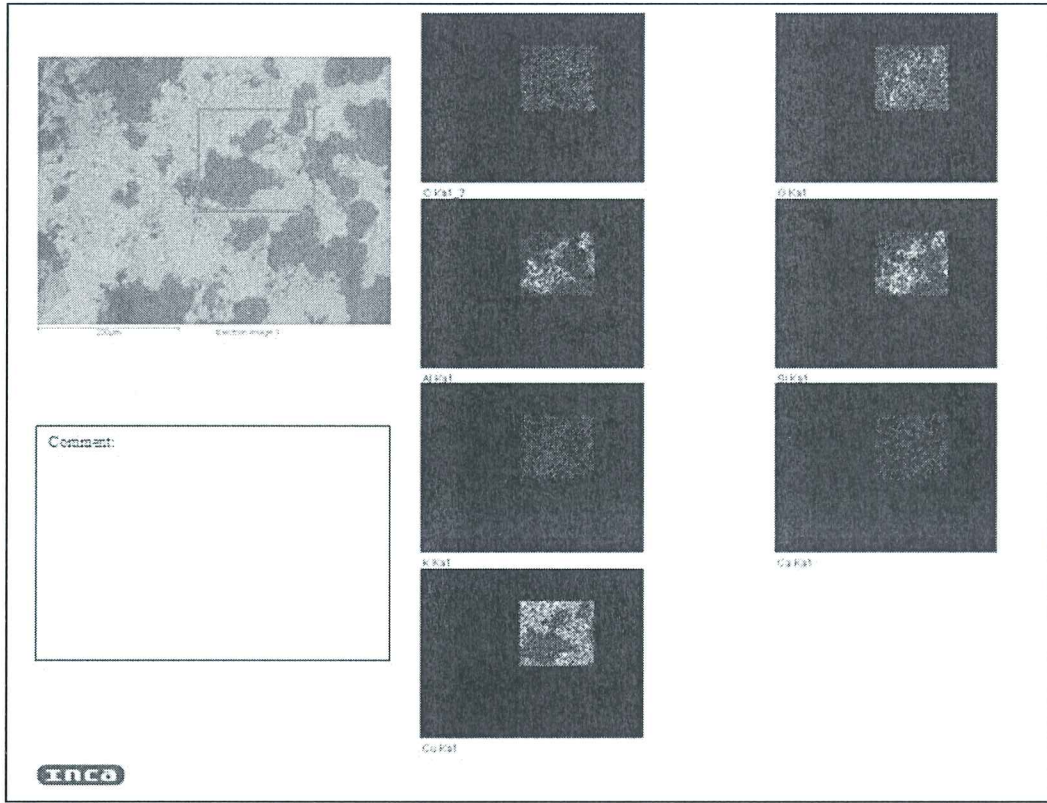


**Şekil 4.34:** 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen numunenin kırılma yüzeyinin EDX analizi. (Porselen elementlerinin arasına yerleşmiş Cu elementi)



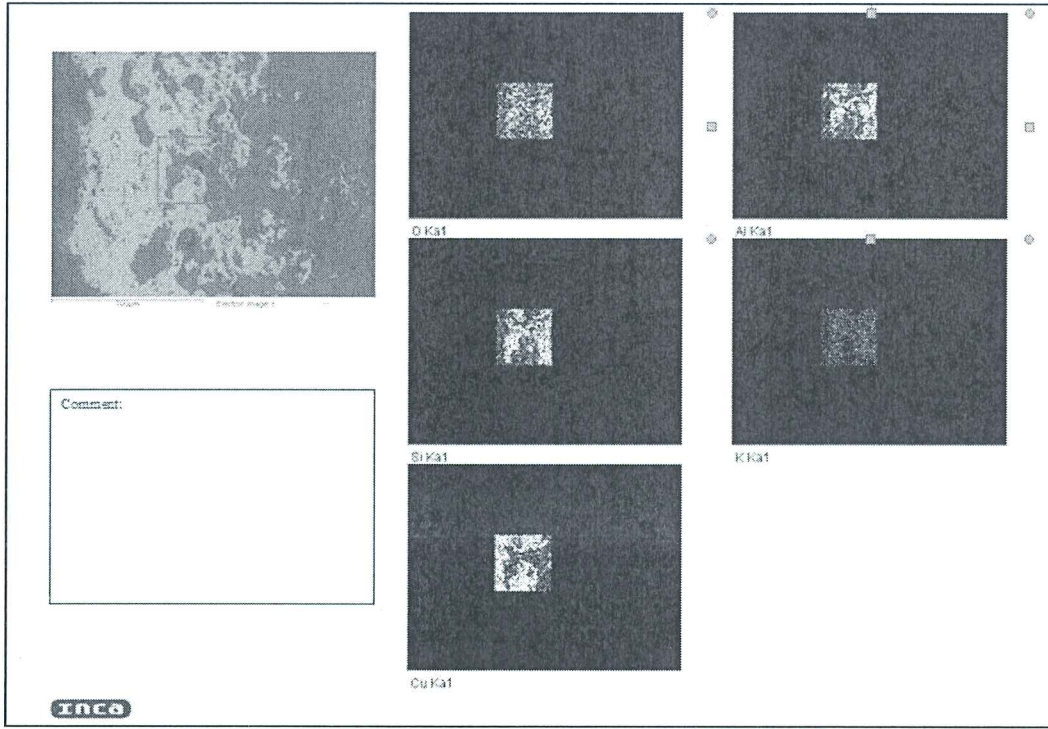


**Şekil 4.35:** 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen numunenin kırılma yüzeyinin EDX analizi. (Porselen elementlerinin arasına yerleşmiş Cu elementi)



**Şekil 4.36:** 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki Cu numunenin kırılma yüzeyinin haritalama yöntemi ile element analizi

Şekil 4.36 'da 11 nolu deney numunesinin, Cu tarafının kırılma yüzeyindeki elementler, haritalama yöntemi ile analiz edilmiştir. Beyaz renkli görüntüler elementleri göstermektedir.



**Şekil 4.37:** 11 nolu Cu-porselen difüzyon numunesindeki porselen numunenin kırılma yüzeyinin haritalama yöntemi ile element analizi

Şekil 4.37 'da 11 nolu deney numunesinin, porselen tarafının kırılma yüzeyindeki elementler, haritalama yöntemi ile analiz edilmiştir. Beyaz renkli görüntüler elementleri göstermektedir.

Şekil 4.19 – Şekil 4.26 de verilen analiz sonuçları 7 nolu sıradaki parametreler ile difüzyon kaynağıyla birleştirilmiş Cu ve porselen numunelerine aittir. Analiz sonuçlarına göre; porselen numune tarafında Cu elementine, Cu numune tarafında da porselen elementlerine rastlanmaktadır. Şekil 4.22 deki porselen numune tarafında yapılan analiz sonuçlarına göre; %19,78 Al, %18,64 Si, %1,21 Fe, %15,42 Cu elementi tespit edilmiştir. Şekil 4.23 deki Cu numune tarafında yapılan analiz sonuçlarına göre; %5,98 Al, %6,33 Si, %1,13 Fe, %58,88 Cu elementi tespit edilmiştir. Bu numuneye ait kesme testi sonuçları incelendiğinde; 93,35 MPa'lık bir kesme dayanımı ile porselen ve Cu' in oldukça yüksek bir kaynak mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.27 – Şekil 4.31 de verilen analiz sonuçları 9 nolu sıradaki parametrelerle difüzyon kaynağıyla birleştirilmiş Cu ve porselen numunelerine aittir.

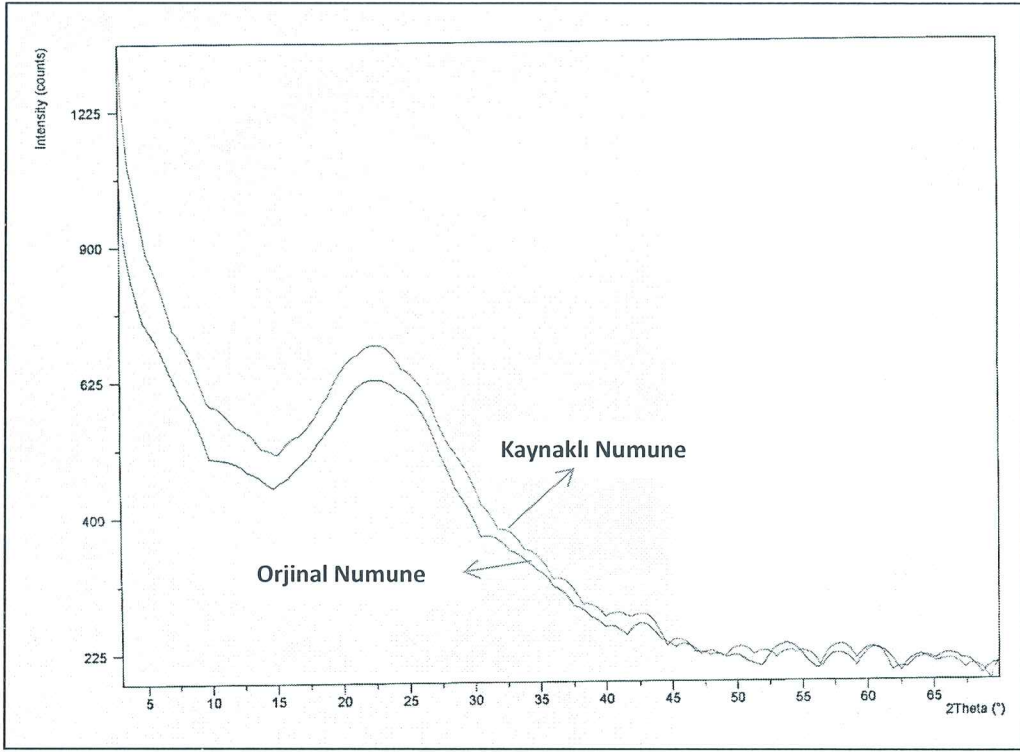


Analiz sonuçlarına göre; porselen numune tarafında Cu elementine, Cu numune tarafında da porselen elementlerine rastlanmaktadır. Şekil 4.29 daki porselen numune tarafında yapılan analiz sonuçlarına göre; %15,55 Al, %20,83 Si, %0,58 Ca, %1,84 Mg, %0,89 K, %6,64 Cu elementi tespit edilmiştir. Şekil 4.30 daki bakır numune tarafında yapılan analiz sonuçlarına göre; ; %9,18 Al, %14,56 Si, %10,38 Fe, %3,28 Mg, %26,13 Cu elementi tespit edilmiştir. Bu numuneye ait kesme testi sonuçları incelendiğinde; 99,89 MPa'lık bir kesme dayanımı ile porselen ve Cu' in oldukça yüksek bir kaynak mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

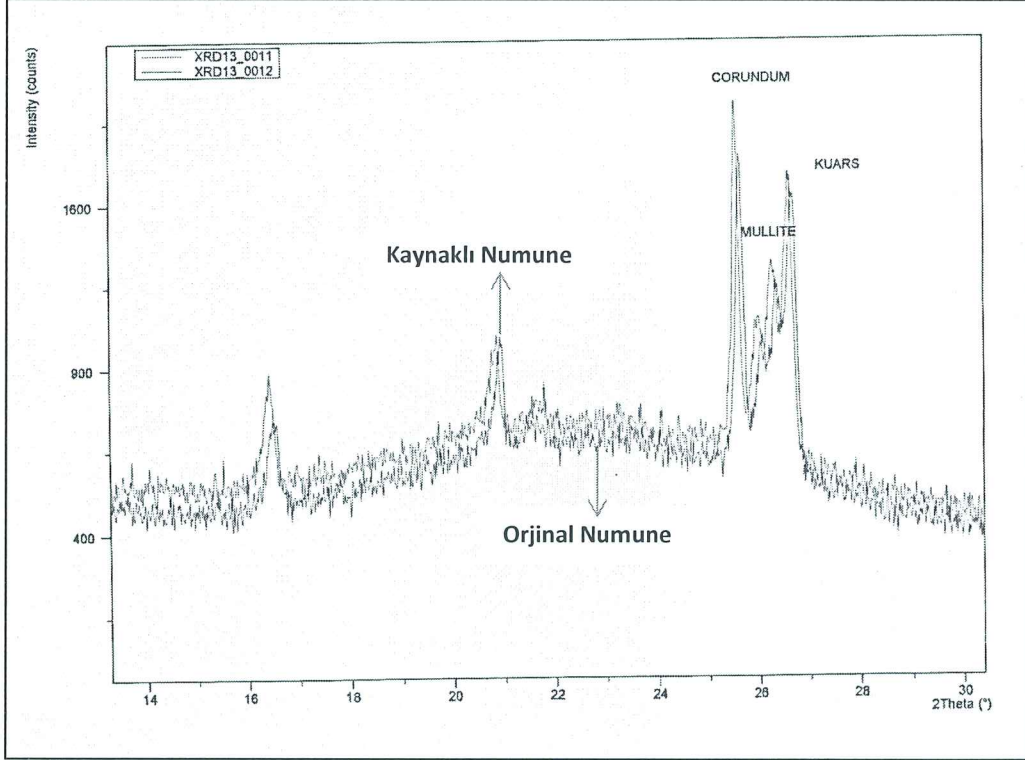
Şekil 4.31 – Şekil 4.37 de verilen analiz sonuçları 11 nolu sıradaki parametreler ile difüzyon kaynağıyla birleştirilmiş ve kesme testi sonrası ayrılmış Cu ve porselen numunelerine aittir. Analiz sonuçlarına göre; porselen numune tarafında Cu elementine, Cu numune tarafında da porselen elementlerine rastlanmaktadır. Şekil 4.32 daki Cu numune tarafında yapılan analiz sonuçlarına göre; %13,47 Al, %22,32 Si, %1,85 K, %19,62 Cu elementi tespit edilmiştir. Şekil 4.35 daki porselen numune tarafında yapılan analiz sonuçlarına göre; %12,26 Al, %11,37 Si, %0,47 Fe, %1,07 K, %40,43 Cu elementi tespit edilmiştir. Bu numuneye ait kesme testi sonuçları incelendiğinde; 115,66 MPa'lık bir kesme dayanımı ile porselen ve Cu' in oldukça yüksek bir kaynak mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Tüm difüzyon deneyleri içinde en yüksek kaynak mukavemetini 11 nolu sıradaki parametreler ile yapılan numuneler göstermektedir.

#### **4.2.2 Faz Analizi**

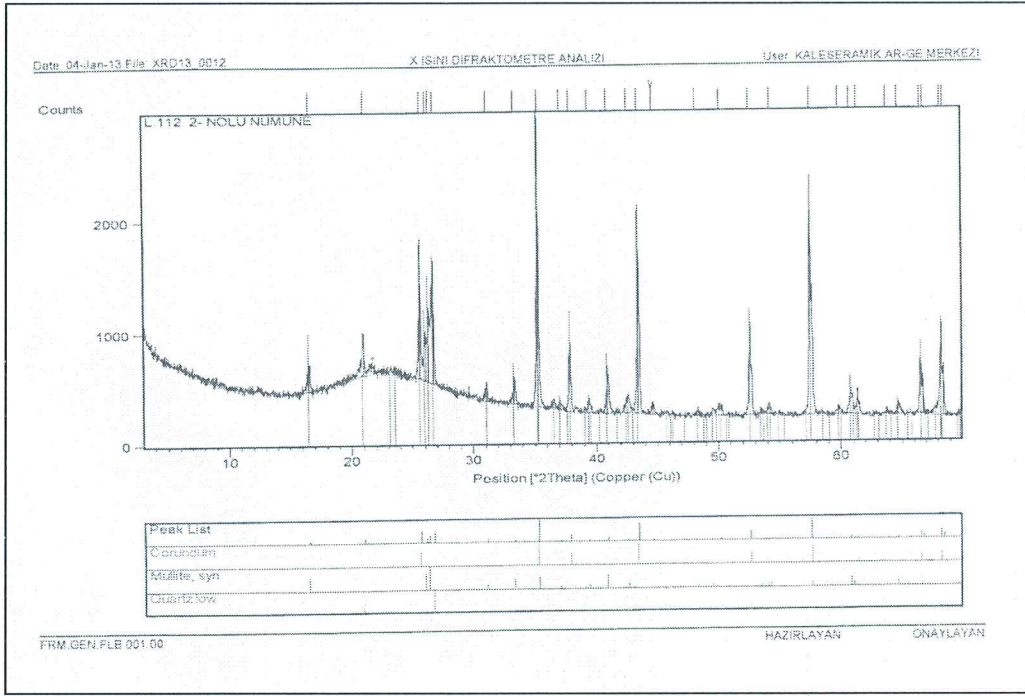
Difüzyon kaynağında kullanılan porselen numune ile kaynak işlemine tabi tutulmamış orijinal porselen numune arasındaki faz değişimini incelemek amacıyla, Phanalitica' nın X ışınları difraktometre cihazı ile XRD faz analizleri yapılmıştır. Şekil 4.38'de kaynaklı numune ve orijinal numune arasındaki cam fazı değişimi, şekil 4.39'da kaynaklı numune ve orijinal numune arasındaki korund ve mullit oranlarındaki değişim, şekil 4.40'da orijinal numunedeki kristobalit fazı ve şekil 4.41'de kaynaklı numunedeki kristobalit fazı görülmektedir.



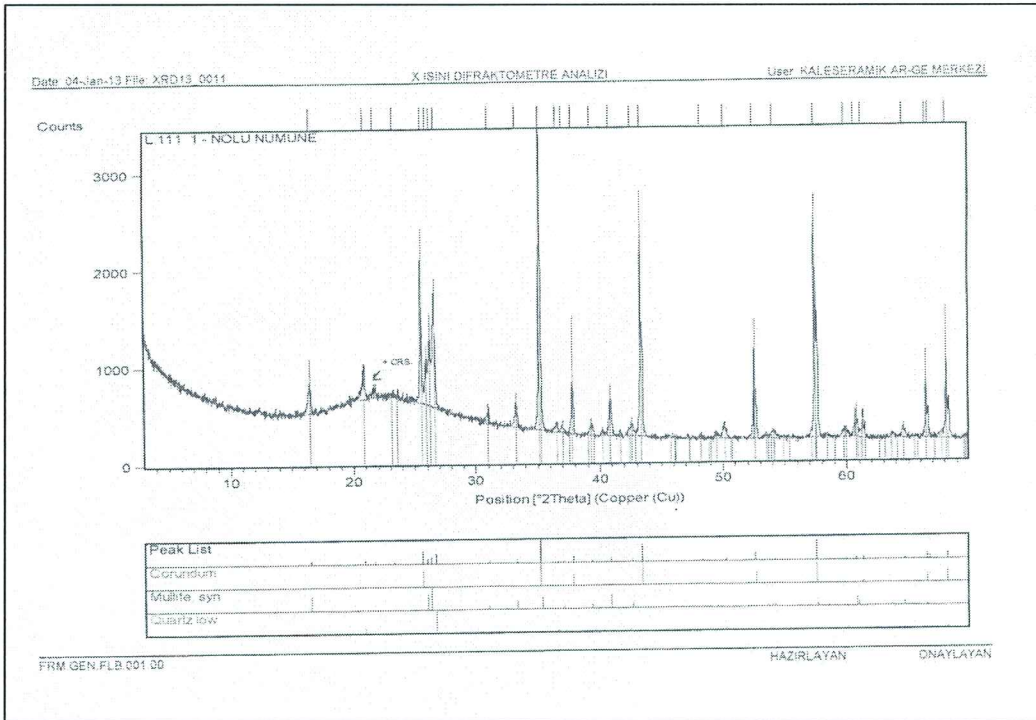
Şekil 4.38: Kaynaklı numune ve orjinal numune arasındaki cam fazı değişimi grafiği



Şekil 4.39: Kaynaklı numune ve orijinal numune arasındaki korund ve mullit oranlarındaki değişim grafiği



Şekil 4.40: Orjinal numunedeki kristobalit faz grafiği



Şekil 4.41: Kaynaklı numunedeki kristobalit faz grafiği



Şekil 4.38 incelendiğinde orijinal numuneye göre kaynaklı numunede cam fazlarında artış görülmüştür. Şekil 4.39 incelendiğinde, orijinal numuneye göre kaynaklı numunedeki korund ve mullit fazlarının oranlarının arttığı görülmüştür. Şekil 4.40 ve şekil 4.41 karşılaştırıldığında ise; kaynaklı numunede, orijinal numuneye göre kristobalit fazında artış görülmüştür.

Sonuç olarak, difüzyon kaynağı işlemine tabi tutulan porselen numunenin, orijinal porselen numuneye göre, mullit, korund, kristobalit ve cam fazlarının oranlarındaki artışın; sertliğin artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir, ve literatür de bunu desteklemektedir. Aynı zamanda 4,5 MPa basınçta, 60 dak' da ve 900 °C' de yapılan deneylerde meydana gelen faz oranlarındaki artışın, kesme dayanımının da artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Difüzyon süresi arttırıldığında, fazların oranında da artış olmaktadır. 60 dak' nın üzerindeki sürelerde yapılan deneylerde genellikle kesme dayanımı düşmektedir. Bu nedenle fazların oranı arttıkça gevreklik ve kırılabilirlik da artmakta, dolayısıyla kaynak dayanımı düşmektedir.

## 5. MODELLEME VE ANALİZLER

### 5.1 İstatistiksel Modelleme

Çeşitli bilim dallarının gelişme süreçleri incelendiğinde, istatistik metotları kullananların çok hızlı gelişme gösterdikleri fark edilir. Gelişimi durağanlaşmış bilim dalları istatistik metotları kullanılmaya başlayınca atılım yapmaya başlamıştır. Her bilim dalında kullanılan deney malzemesi, deneme şartları ve istatistik metotların gerektirdiği koşulların gerçekleşme durumu diğerlerinden farklı olduğu için konulara özgü istatistik yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Günümüzde bilim dallarında yapılan çalışmalarda istatistik metodlarından geniş şekilde yararlanılmaktadır [77].

İstatistiksel yazılımlar, farklı disiplinler tarafından yapılan birçok bilimsel çalışmadaki, istatistiksel analizlerin gerçekleştirilmesinde kullanıcılara hesaplamalarda kolaylık ve hız sağlamaktadır. Farklı özellikler içeren istatistiksel yazılımlar arasından seçim yapmak, nitel/nicel pek çok kriterin (edinme maliyeti, işletim maliyeti, ara yüz, grafik desteği, kullanım kolaylığı, hız, teknik destek, vb.) birlikte değerlendirilmesinin gerektiği, çok kriterli karar problemi niteliğindedir.

Özellikle 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren bir yandan istatistik yöntem ve tekniklerinin her alanda yaygınlaşması, diğer yandan bu alanda çalışma yapanların önceliklerinin değişmesi gibi nedenlerle uzun yıllardır bilimsel araştırmalarda, elde edilen verilerin çözümlenmesinde ve bulguların yorumlanmasında çeşitli istatistiksel yöntemler yoğun olarak kullanılmaktadır. Yığın veri içeren, karmaşık ve çok değişkenli problemler için uygulanan bu istatistiksel analizler ise bu yönde geliştirilen yazılımların kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Ancak verilerin analiz ve değerlendirilmesi aşamasında hangi istatistiksel yazılımların kullanılacak olan veriye en uygun olduğunun saptanması ve uygulanan bu yazılımların aynı veriler kullanıldığı halde farklı sonuçlar verebilmesi bazı sorunları da beraberinde getirmiştir. Dolayısıyla istatistiksel işlemlerin yapılmasından daha çok, uygun istatistiksel tekniğin ve bu teknik için kullanılacak olan istatistiksel yazılımın seçimi

büyük önem taşımaktadır [78]. Yapılan çalışmada istatistiksel analiz için Minitab programı kullanılmıştır.

### 5.1.1 Minitab Programı

Minitab, istatistiksel eğilimler ve analizlerin iyileştirilmesi için dünya çapında kullanılan bir programdır. Minitab; işletme verilerinin analizinde, işletmelerin sunduğu ürün ve hizmetlerin kalitesinin geliştirilmesinde yoğun olarak kullanılan bir istatistik programdır. Tüm dünya çapında 6 sigma uygulamalarında kullanılan en önemli bir programdır. İşletmelerin kendilerini geliştirmeleri ve doğru tespiti ve etkin bir şekilde analizi ile mümkün olmaktadır. İşletmelerin yıl içinde ve geçmiş dönemdeki data ve matematiksel verilerinin, mali tablolarının analizi ile işletmeler gelecek dönemlere yönelik tahmin ve AR-GE' lerini düzenleyebilmektedirler. Minitab programı ile yapılan bazı çalışmalar aşağıda yer almaktadır .

1. Verilerin girdi ve çıktıları,
2. Veriler üzerinde edit ve manipulasyonlar,
3. Aritmetik,
4. Verilerin çizimsel yapılanması,
5. Temel istatistiksel değerlendirmeler,
6. Regresyon,
7. Varyans,
8. Çok değişkenli analizler,
9. Non parametrik analiz,
10. Zaman serileri,
11. İstatistiksel proses kontrolleri,
12. Matrisler,
13. Dağılımlar ve istatistiksel analiz,



14. Kapsamlı temel istatistikler,
15. İstatistiksel proses kontrol,
16. Ölçüm sistemi analizleri,
17. Deney tasarımı,
18. Güvenilirlik analizleri,
19. Süreç ve yeterlilik analizleri.

### 5.1.2 Modelleme Çalışması

2 farklı konumda yapılan deneylerde; kesme testi sonuçlarına göre, deney parametreleri, istatistiksel modelleme analizi ile değerlendirilmiştir.

**Konum 1:** Kaynak deneyleri sırasında deneylerin bir grubunda, Cu numune üst pistonu, porselen numune alt pistonu yerleştirilmiştir. Minitab programıyla Tablo 5.1’ de verilen en yüksek kesme testi sonuçları girilerek matematiksel modeli oluşturulmuştur.

Şekil 5.1’ de Konum 1’ de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon basıncı arayüzey grafiği, Şekil 5.2 de ise konum 1’ de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon basıncı grafiği verilmiştir.

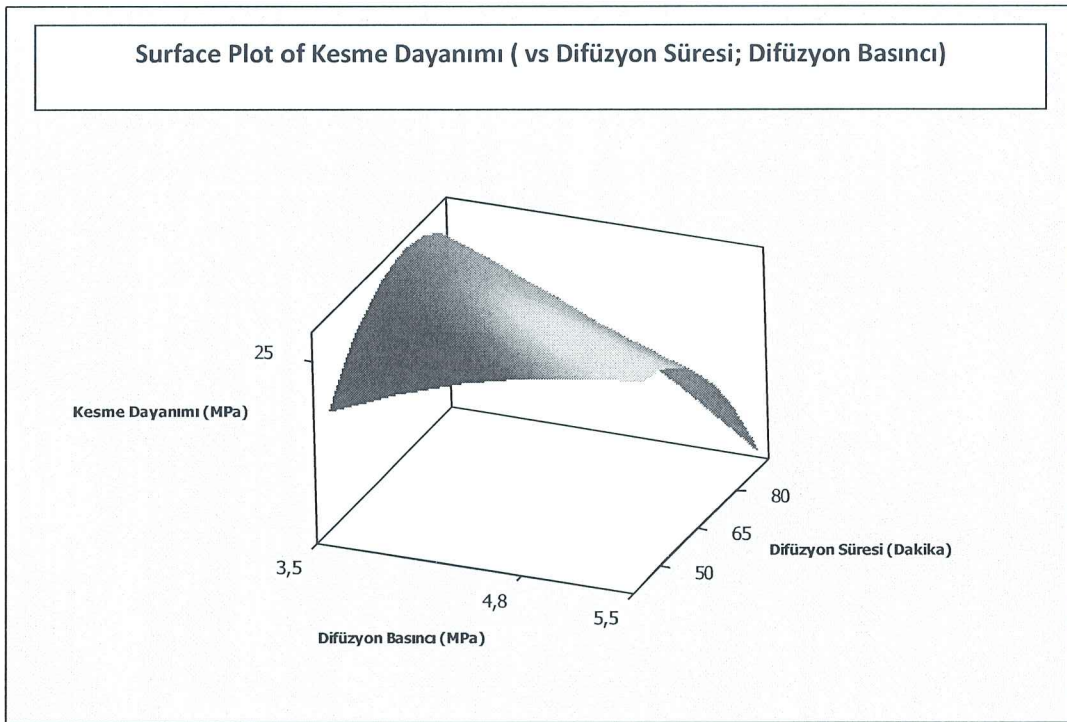
**Tablo 5.1:** Konum 1’ de yapılan en yüksek kesme testi sonuçları

900 oC de Konum 1’ de yapılan Kesme Testi Sonuçları				
Numune Numarası	Sıcaklık °C	Difüzyon Basıncı Mpa	Süre dakika	Kesme Dayanımı (Mpa)
12	900	4,5	45	11,82454
5	900	4,5	75	11,14887
4	900	5,5	60	14,30211
53	900	3,5	60	17,84946
13	900	3,5	90	25,05682
11	900	4,5	60	36,1489

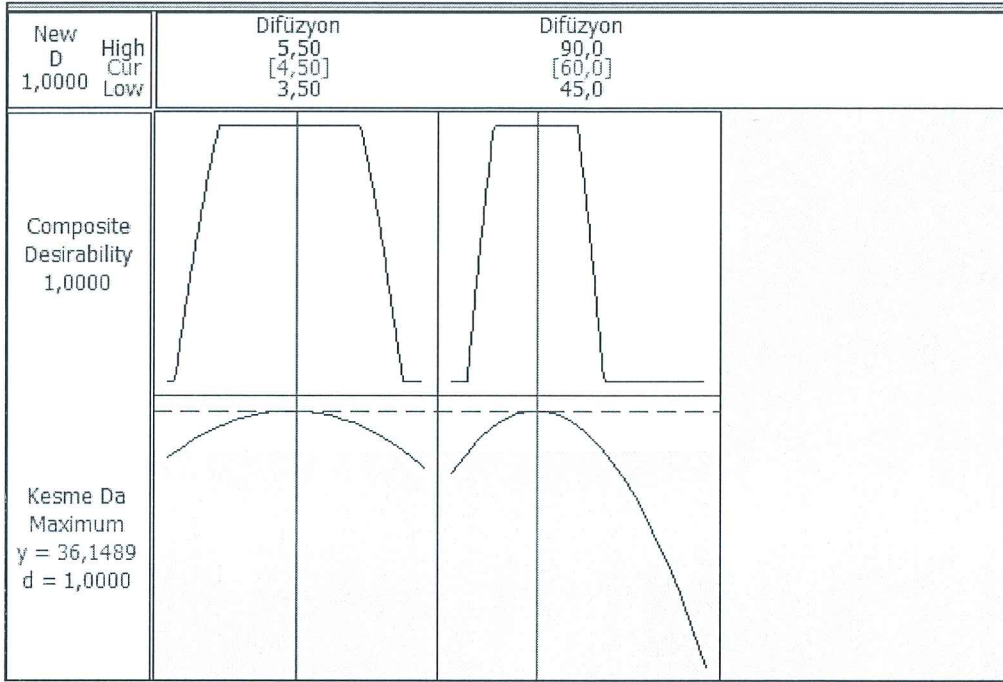
## 900C Konum1

Kesme Dayanımı (MPa) İçin Tahmini Regrasyon Katsayıları

Term	Coef
Constant	-1714,38
Difüzyon Basıncı (MPa)	391,95
Difüzyon Süresi (Dakika)	29,11
Difüzyon Basıncı (MPa)*	-20,07
Difüzyon Basıncı (MPa)	
Difüzyon Süresi (Dakika)*	-0,11
Difüzyon Süresi (Dakika)	
Difüzyon Basıncı (MPa)*	-3,55
Difüzyon Süresi (Dakika)	



**Şekil 5.1:** Konum 1' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon basıncı arayüzey grafiği



**Şekil 5.2:** Konum 1' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon basıncı grafiği

Konum 1' de yapılan deney sonuçlarına göre Minitab programında kesme dayanımının matematiksel modeli elde edilmiştir.

**Kesme Dayanımı** =  $-1714,38 + 391,95 * \text{difüzyon basıncı} + 29,11 * \text{difüzyon süresi} - 20,07 * \text{difüzyon basıncı}^2 - 0,11 * \text{difüzyon süresi}^2 - 3,55 * \text{difüzyon basıncı} * \text{difüzyon süresi}$

İstatistiksel modellemeye göre en iyi sonuç 900 °C'de, 4,5 MPa difüzyon basıncında ve 60 dak difüzyon süresinde yapılan deney için elde edilmiştir. Yapılan kesme testi sonuçlarına göre de; en yüksek kesme dayanımı 900 °C' de, 4,5 MPa difüzyon basıncında ve 60 dak difüzyon süresinde yapılan deney için elde edilmiştir. Yapılan istatistiksel modelleme ile kesme testi sonuçları doğrulanmaktadır.

**Konum 2:** Kaynak işlemi sırasında diğer bir grup deney Cu numune alt pistonu, porselen numune üst pistonu yerleştirilerek yapılmıştır. Bu konumda da Minitab programıyla Tablo 5.2' de verilen kesme testi sonuçları girilerek matematiksel model oluşturulmuştur.

Şekil 5.3' de konum 2' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon basıncı arayüzü grafiği, Şekil 5.4' de ise Konum 2' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon basıncı grafiği verilmiştir.



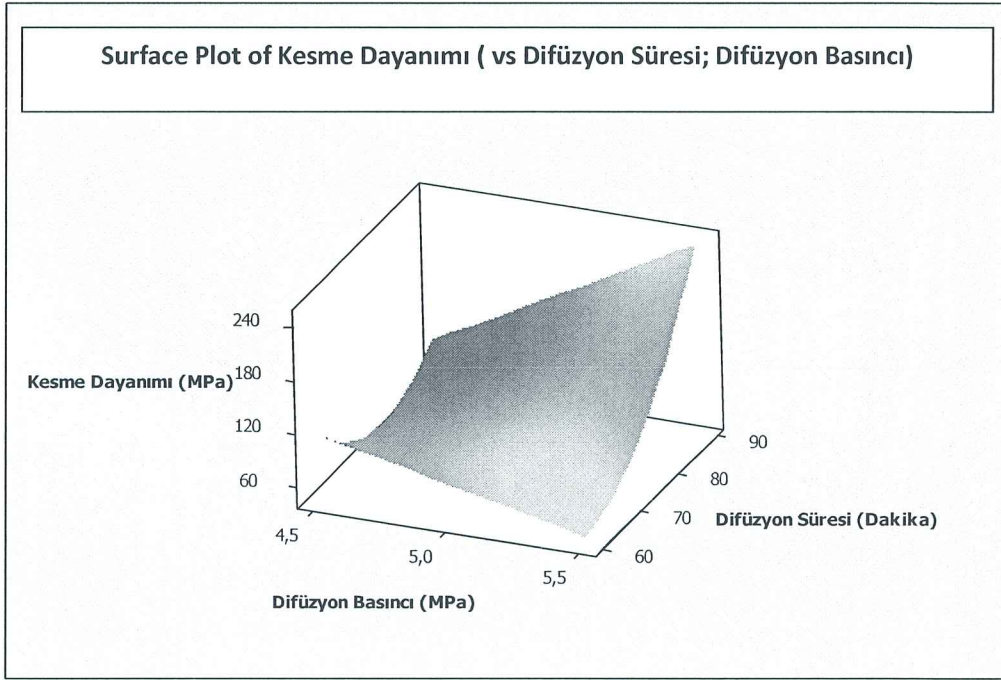
**Tablo 5.2:** Konum 2' de yapılan en yüksek kesme testi sonuçları

Konum 2' de Yapılan En Büyük Kesme Kesme Testi Sonuçları (K 2)				
Numune Numarası	Deney Parametresi			Kesme Dayanımı (Mpa)
	Sıcaklık (oC)	Difüzyon Basıncı Mpa	Süre (dak)	
4	900	5,5	60	48,9311819
5	900	4,5	75	56,1384855
7	900	4,5	90	93,3577353
9	900	5,5	75	99,8893701
11	900	4,5	60	115,655485

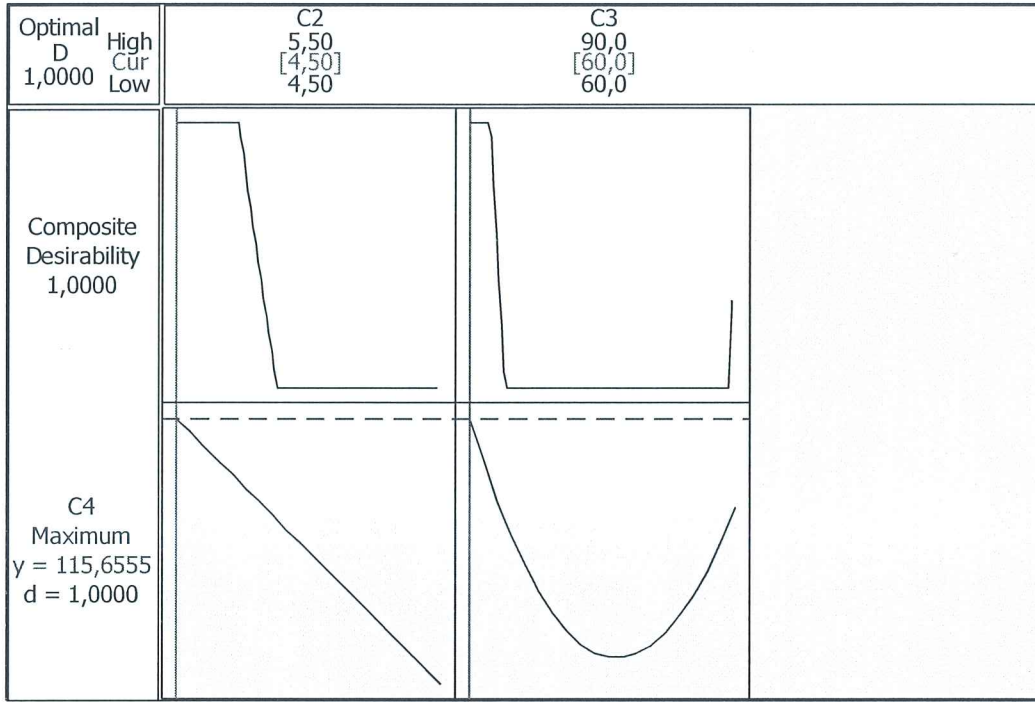
### 900C Konum2

#### Kesme Dayanımı (MPa) İçin Tahmini Regrasyon Katsayıları

Term	Coef
Constant	3609,90
Difüzyon basıncı (MPa)	-508,63
Difüzyon süresi (Dakika)	-66,13
Difüzyon süresi (Dakika) *	0,21
Difüzyon süresi (Dakika)	
Difüzyon basıncı (MPa)*	7,37
Difüzyon süresi (Dakika)	



**Şekil 5.3:** Konum 2' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon basıncı arayüzey grafiği



Şekil.5.4: Konum 2' de kesme dayanımı, difüzyon süresi, difüzyon basıncı grafiği

Konum 2' de yapılan deney sonuçlarına göre Minitab programında kesme dayanımının matematiksel modeli elde edilmiştir.

$$\text{Kesme Dayanımı} = 3609,9 - 508,63 * \text{difüzyon basıncı} - 66,13 * \text{difüzyon süresi} + 0,21 * \text{difüzyon süresi}^2 + 7,37 * \text{difüzyon basıncı} * \text{difüzyon süresi}$$

İstatistiksel modellemeye göre en iyi sonuç 900°C' de, 4,5 MPa difüzyon basıncında ve 60 dak difüzyon süresinde yapılan deney için elde edilmiştir. Yapılan kesme testi sonuçlarına göre de; en yüksek kesme dayanımı 900 °C'de, 4,5 MPa difüzyon basıncında ve 60 dak difüzyon süresinde yapılan deney için elde edilmiştir. Yapılan istatistiksel modelleme ile kesme testi sonuçları doğrulanmaktadır.

Her iki konumdaki istatistiksel modelleme sonuçları, deney sonuçları ile uyum göstermiştir.

## 5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sayısal Analizler (ANSYS Analizi)

Mühendislerin karşılaştıkları karmaşık ve zor fiziksel problemlerin çözümünde kullandıkları yöntemler genel olarak ikiye ayrılırlar.

Analitik çözüm yöntemleri

Sayısal çözüm yöntemleri

Mühendislikte karşılaşılan bir çok problemi, analitik yöntemler ile çözmek mümkün değildir. Analitik çözümler, sadece basitleştirilmiş bazı özel haller için elde edilebilir. Geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır şartları karmaşık problemleri yaklaşık olarak çözebilmek amacıyla , kabul edilen sonuçlar veren sayısal yöntemler kullanılmalıdır [80].

Ürünlerin imal edilmeden önce modellenmesi ve üzerine etki eden yüklerin etkilerinin incelenmesi çok önemlidir. Oluşturulan tasarım, imal edilecek olan ürünün parçasının modeli olacaktır. ANSYS programı bu tasarımı bilgisayar ortamında oluşturup, üzerine etkiyen yüklerin analizinin yapılmasına ve animasyonla bu kuvvetlerin model üzerindeki sonuçlarının görüntülenmesine olanak sağlar.

Bu yöntemin güzelliği; modeli daha imal etmeden, bilgisayar ortamında her türlü hesap ve analizin model üzerinde uygulanmasına olanak vermesidir. Elbette ki oluşturulan son modelin imal edilip, sonra da kendine etki eden yükler altında gerekli deneylere tabii tutulması ile tasarım aşaması tamamlanacaktır.

Modelin mukavemet hesapları yapılırken, şayet analitik çözüm yöntemleri kullanılırsa; bir takım idealleştirmeler ve kabuller yapmak zorunluluğu doğar. Bunun sebebi yüksek dereceden hiperstatik sistemlerin analitik çözümünün mümkün olmamasıdır. Bu kabuller ve idealleştirmeler, sonuçları gerçek davranıştan uzaklaştırmaktadır.

Ayrıca modele etki eden yükün bir kısmı model üzerinde gerinim etkisi oluşturacaktır. Yükün geri kalan kısmı ise modelde gerilme etkisi oluşturacaktır. sonlu elemanlar yöntemi ile; modeldeki bu iki etkinin hesaplanması büyük ölçüde kolaylaşmaktadır. Ancak sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapılırken oluşturulan matrislerin boyutlarının büyüklüğü nedeniyle, hesaplarımızı sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir bilgisayar programı kullanılmasını gerektirir.

Bu nedenlerden dolayı; ANSYS Programı kullanılmıştır. Ayrıca da herhangi bir kabul veya idealleştirme yapılmayacağından, sonuçların gerçeğe son derece yakın olmasını sağlayacaktır.



Bilgisayarların gelişmesiyle ön plana çıkan ve diğer sayısal yöntemlerden avantajlı yanları olan sonlu elemanlar yönteminde karmaşık bir yapıya sahip, malzeme ve geometrik özellikleri farklı olan konstrüksiyonlar; çok kolaylıkla analiz edilebilirler. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir paket programı olan ANSYS 12.1 programıyla analiz edilen parçalardan elde edilen değerlerin yapısal açıdan optimum değerlere sahip olup olmadığı tespit edilir. Bilgisayar destekli tasarım ve analiz programları kullanılarak; kısa sürede hassas, esnek ve karmaşık tasarımların yapılabildiği görülmüştür [79].

Sonlu elemanlar yönteminin pek çok avantajı vardır. Bunların en belli başlılarını şöyle sıralandırabiliriz.

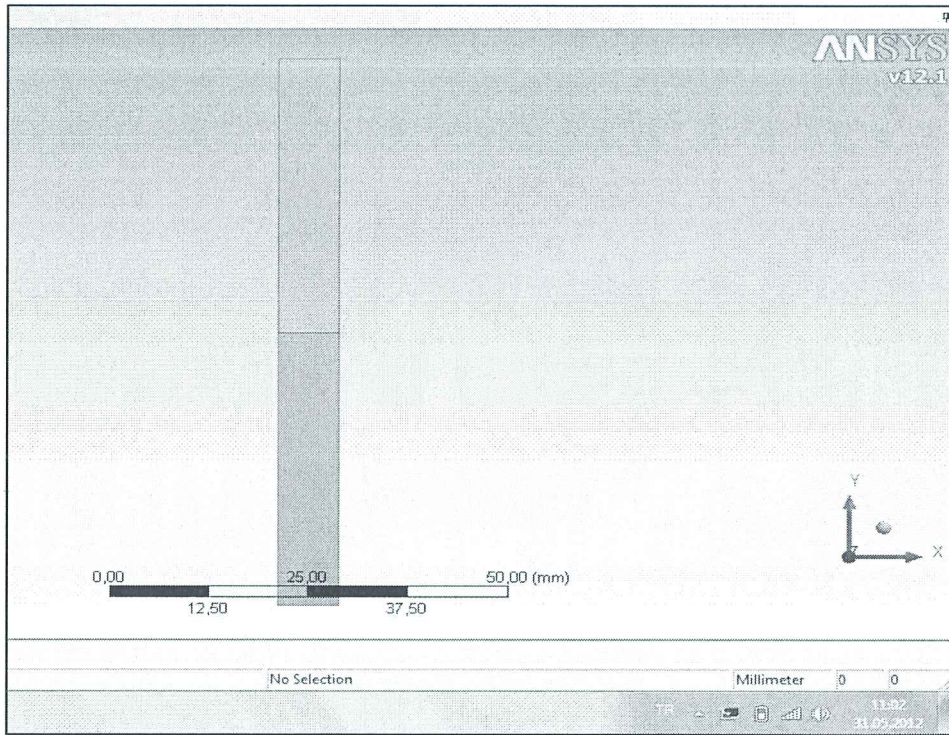
1. Bitişik elemandaki malzeme özellikleri aynı olmayabilir. Bu özellik birkaç malzemenin birleştirildiği cisimlerde uygulanabilmesine imkan vermektedir.
2. Düzgün olmayan sınırlara sahip şekiller, eğri kenarlı elemanlar kullanılarak analiz edilebilir.
3. Eleman boyutları değiştirilebilir. Böylece önemli değişiklikler beklenen bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılarak, hassas işlemler yapılabilirken, aynı parçanın diğer bölgeleri büyük elemanlara bölünerek işlem hızı artırılabilir.
4. Süreksiz yüzey yüklemeleri gibi sınır durumları, yöntem için zorluk oluşturmaz. Karışık sınır durumları kolaylıkla ele alınabilir.

Sonlu elemanlar yönteminin en büyük dezavantajı; bilgisayara ve bilgisayar programlarına olan ihtiyacıdır. Çünkü çok küçük problemler için bile sayısal bir çok hesaplama gerekir [80].

Difüzyon kaynağı ile birleştirilen Cu ve porselen malzemelere kaynak sonrası yapılan mikroyapı incelemeleri ve kesme testi sonrasında en iyi kaynak dayanımı gösteren ve en iyi birleştirilmiş kaynaklı numunelerin 900 °C' de, 60 dak' da ve 4,5 MPa basınçta yapılan 11 nolu sıradaki parametreler ile yapılan deneylere ait numuneler olduğu tespit edilmiştir. Bu numunelere ayrıca bilgisayar destekli analiz programı ile de zamana bağlı yapısal ve zamana bağlı termal analizler yapılmıştır.

### 5.2.1 Difüzyon Kaynağı Analizi

Kaynaklı parçaların analizi ANSYS 12.1 Workbench programında yapılmıştır. Öncelikle difüzyon kaynağı ile birleştirilen porselen ve Cu malzemelerin modellenmesi yapılmıştır. Modelleme ANSYS Design Modeler da oluşturulmuştur. Porselen üstte bakır altta olacak konumda modelleme yapılmıştır. Numuneler dikey yönde kesiti alınmış olarak modellenmişlerdir. Şekil 5.5' de numunelerin ANSYS programında modellenmesi gösterilmektedir.



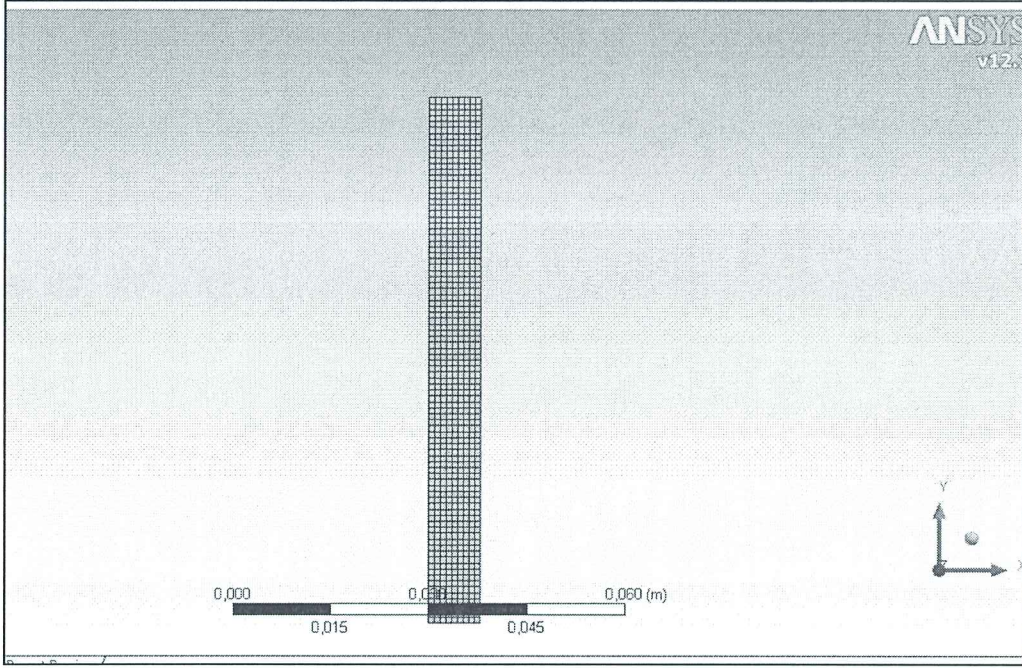
Şekil 5.5: Numunelerin ANSYS programında modellenmesi

Modellenen Cu ve porselen numunelerin yapısal ve termal özellikleri Engineering Data bölümüne girilmiştir. Cu malzemeye ait özellikler; Bölüm 3' deki Tablo. 3.3' den, porselen malzemeye ait özellikler; Bölüm 3' deki Tablo. 3.4 ' den alınmıştır.



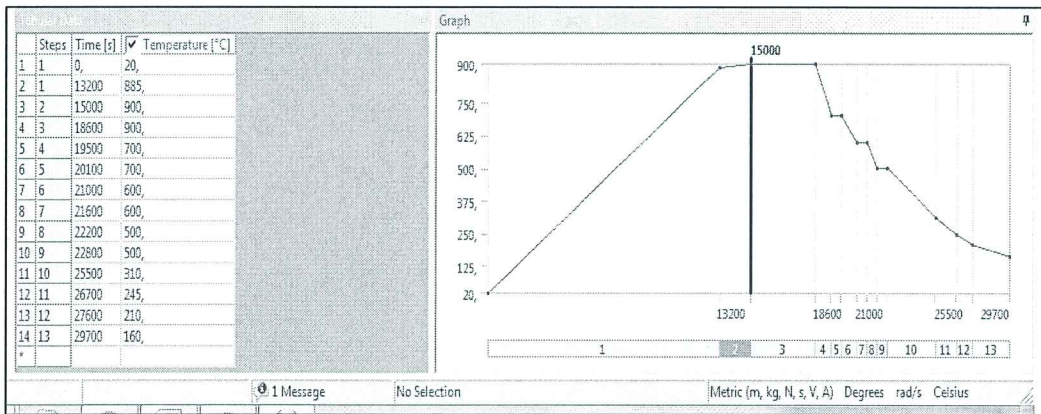
### 5.2.1.1 Zamana Bağlı Termal Analiz

Gerçek ölçülerine göre modellemesi yapılarak, malzeme özellikleri girilen numuneler quadrilaterals (köşeli) elemanla meshlenmiştir. Şekil 5.6' da meshlenmiş Cu- porselen numune modeli görülmektedir.



Şekil 5.6: Meshlenmiş kaynaklı numune modeli

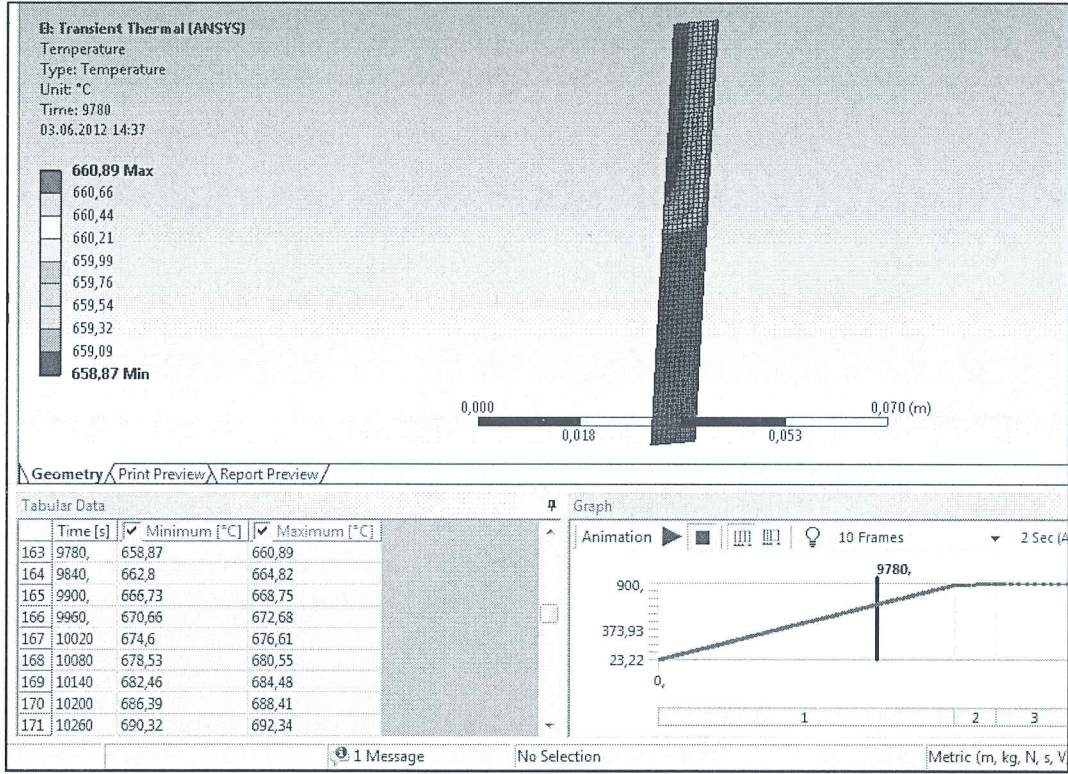
Zamana bağlı termal analiz için gerekli olan zamana bağlı olarak deney sırasında ölçülen sıcaklık değerlerinin programa veri girişi yapılır. Şekil 5.7' de zamana bağlı sıcaklık değerleri grafiği görülmektedir.



Şekil 5.7: Analiz için ANSY programına girilen zamana bağlı sıcaklık değerleri

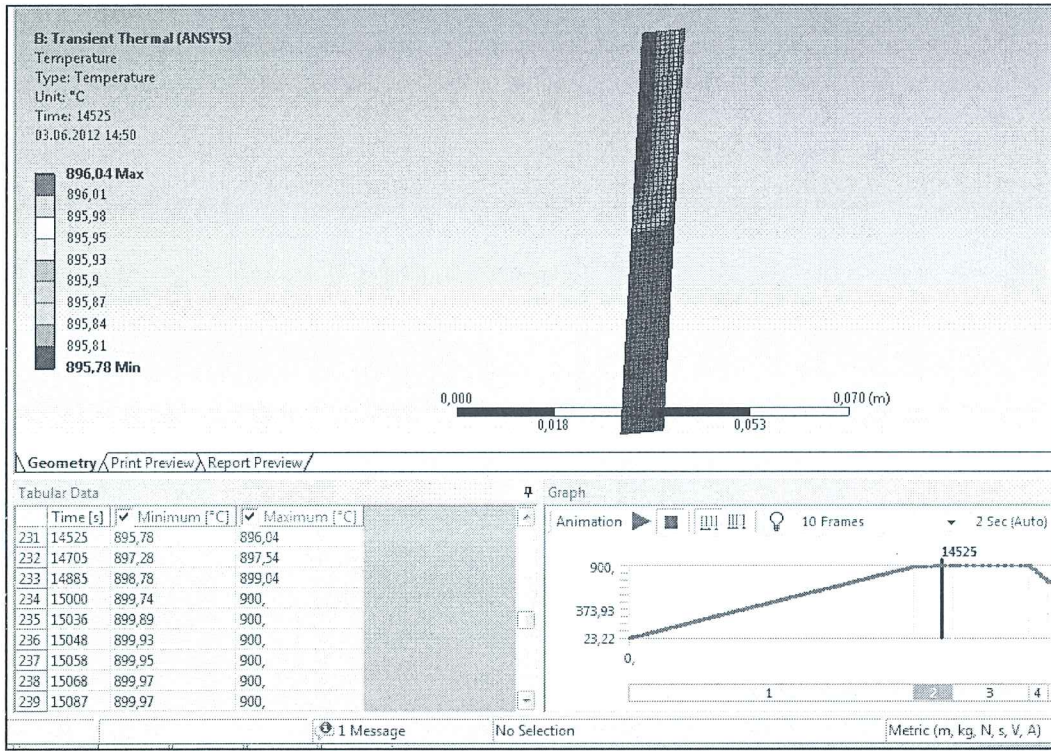


Daha sonra zamana bağılı sıcaklık grafiğinde istenilen zaman seçilerek çözümlene yapılmıştır.



Şekil 5.8: Deneye başladıktan 9780 saniye sonra ısınma esnasındaki zamana bağılı termal analiz

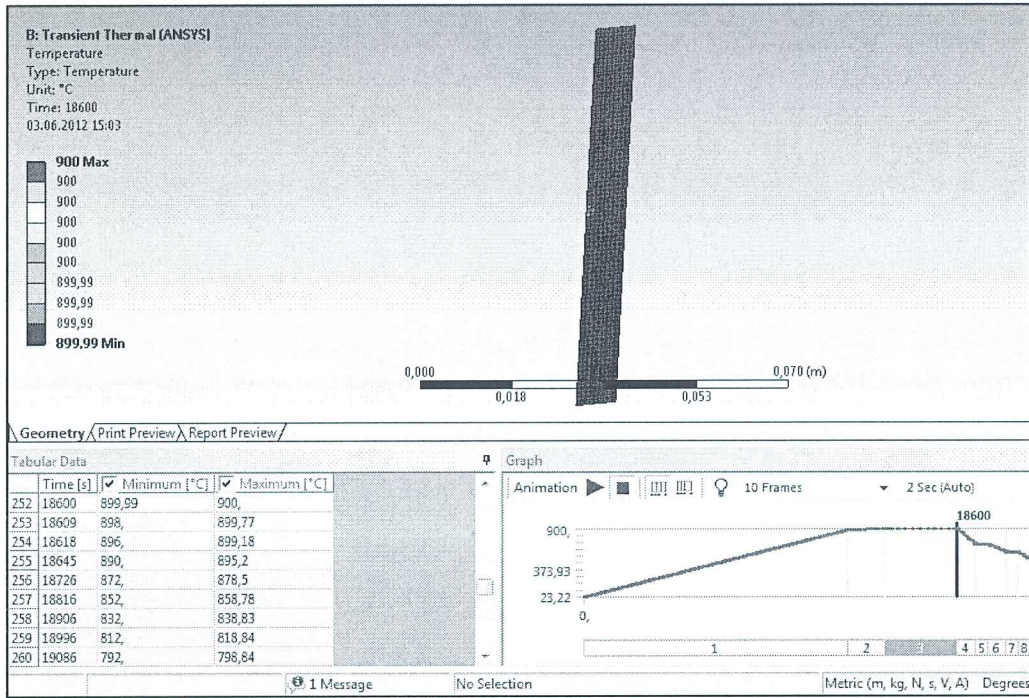
Şekil 5.8' de deneye başladıktan 9780 saniye sonraki zamana bağılı termal analiz gösterilmektedir. Deneye başladıktan 9780 saniye sonra; Cu numunenin her tarafındaki sıcaklık 660,66 °C iken, porselen numunede ise, numunenin iç kısımlarında 658,87 °C olan sıcaklık değerinin dış kısımlara doğru kademeli olarak 660,89 °C' ye yükseldiği gözlemlenmektedir. Cu numunede sıcaklığın yayılımı açısından homojen bir görünüm izlenirken, porselen numunede ise heterojen bir görünüm izlenmektedir.



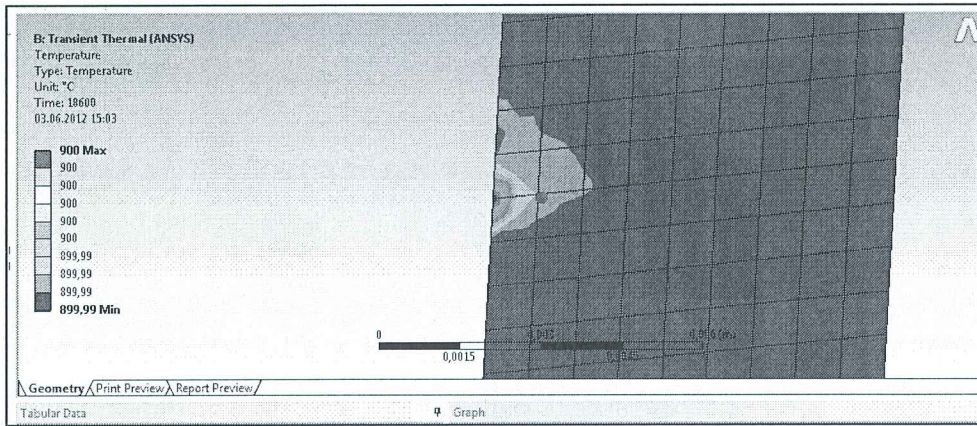
**Şekil 5.9:** Deneye başladıktan 14525 saniye sonra difüzyon işlemi esnasındaki zamana bağlı termal analiz

Şekil 5.9’ da deneye başladıktan 14525 saniye sonraki zamana bağlı termal analiz gösterilmektedir. Deneye başladıktan 14525 saniye sonra, difüzyon işlemi sırasında; Cu numunenin her tarafındaki sıcaklık 896,01 °C iken, porselen numunede ise, numunenin iç kısımlarında 895,78 °C olan sıcaklık değerinin dış kısımlara doğru kademeli olarak 896,01 °C’ ye yükseldiği gözlemlenmektedir. Cu numunede sıcaklığın yayılımı açısından homojen bir görünüm izlenirken, porselen numunede ise heterojen bir görünüm izlenmektedir.





**Şekil 5.10:** Deneye başladıktan 18600 saniye sonra difüzyon işlemi bitimindeki zamana bağlı termal analiz

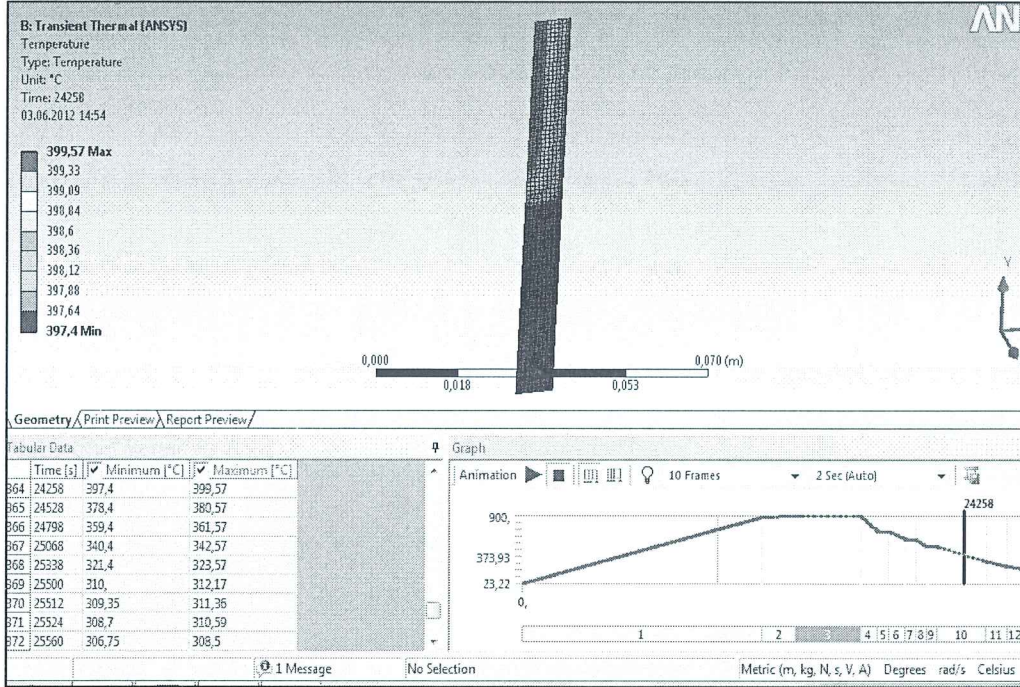


**Şekil 5.11:** Deneye başladıktan 18600 saniye sonra difüzyon işlemi bitimindeki zamana bağlı termal analiz (Porselen ve Cu' ın kaynak ara yüzeyi )

Şekil 5.10' da deneye başladıktan 18600 saniye sonraki zamana bağlı termal analiz, Şekil 5.11' de deneye başladıktan 18600 saniye sonraki zamana bağlı termal analiz (porselen ve Cu' ın kaynak ara yüzeyi) gösterilmektedir. Deneye başladıktan 18600 saniye sonra; difüzyon işlemi bitiminde, Cu numunenin her tarafındaki sıcaklık 900 °C iken, porselen numunede ise, hemen hemen her bölgesinde 900 °C olan sıcaklık değerinin, kaynak yüzeyine yakın iç bölümünde ise 899,99 °C olduğu

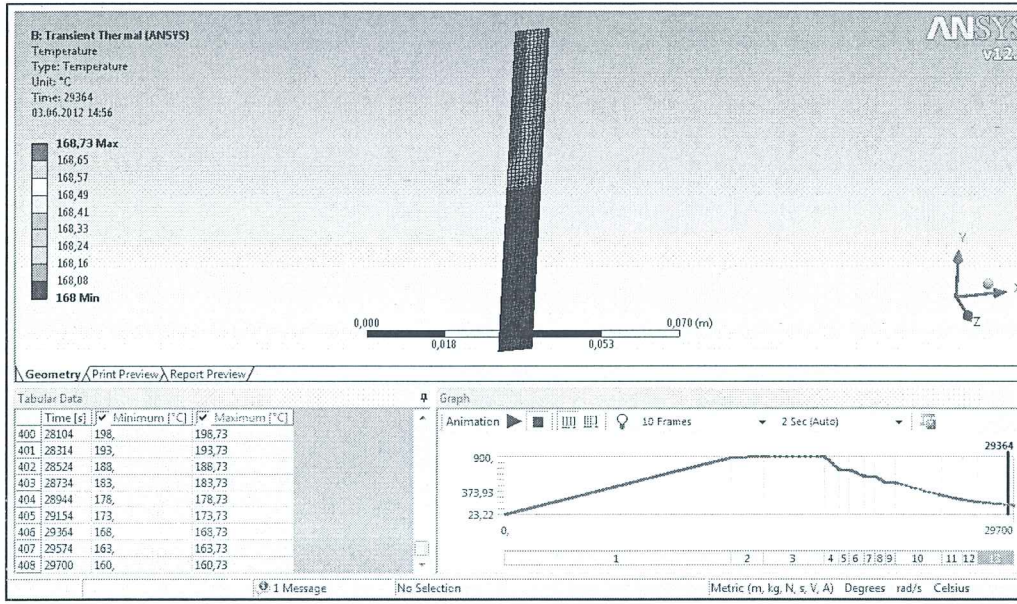


gözlenmektedir. Cu numunede sıcaklığın yayılımı açısından homojen bir görünüm izlenirken, porselen numunede ise heterojen bir görünüm izlenmektedir.



**Şekil 5.12:** Deneye başladıktan 24258 saniye sonra soğutma işlemi esnasındaki zamana bağlı termal analiz

Şekil 5.12’ de deneye başladıktan 24258 saniye sonraki zamana bağlı termal analiz gösterilmektedir. Deneye başladıktan 24258 saniye sonra, soğutma işlemi esnasında; Cu numunenin her tarafındaki sıcaklık 397,4 °C iken, porselen numunede ise, numunenin iç kısımlarında 399.57 °C olan sıcaklık değerinin dış kısımlara doğru kademeli olarak 397,4 °C’ ye indiği gözlemlenmektedir. Cu numunede sıcaklığın yayılımı açısından homojen bir görünüm izlenirken, porselen numunede ise heterojen bir görünüm izlenmektedir.



**Şekil 5.13:** Deneye başladıktan 29364 saniye sonra soğutma esnasındaki zamana bağlı termal analiz

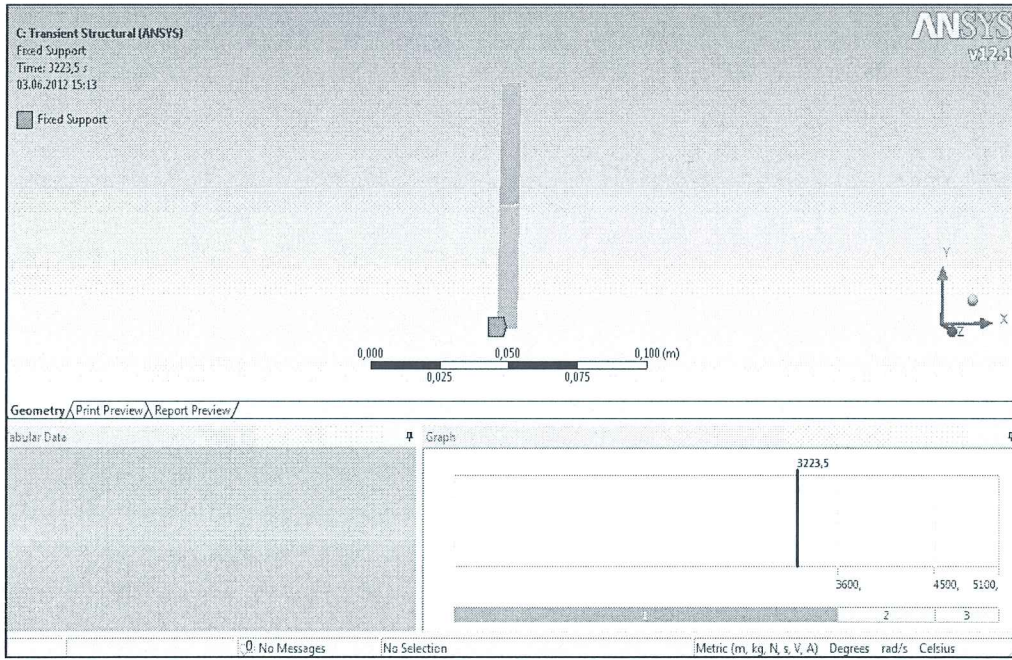
Şekil 5.13’ de deneye başladıktan 29364 saniye sonraki zamana bağlı termal analiz gösterilmektedir. Deneye başladıktan 29364 saniye sonra, soğutma esnasındaki; Cu numunenin her tarafındaki sıcaklık 168 °C iken, porselen numunede ise, numunenin iç kısımlarında 168.73 °C olan sıcaklık değerinin dış kısımlara doğru kademeli olarak 397,4 °C’ ye indiği gözlemlenmektedir. Cu numunede sıcaklığın yayılımı açısından homojen bir görünüm izlenirken, porselen numunede ise heterojen bir görünüm izlenmektedir.

Buradan da görülmektedir ki; malzemelerin iletkenlik özelliklerine bağlı olarak, porselen Cu’ a göre daha geç ısınıp, soğumaktadır. Bu sıcaklık farkı özellikle porselenin iç bölgelerinde gözlenmektedir.

### 5.2.1.2 Zamana Bağlı Yapısal Analiz

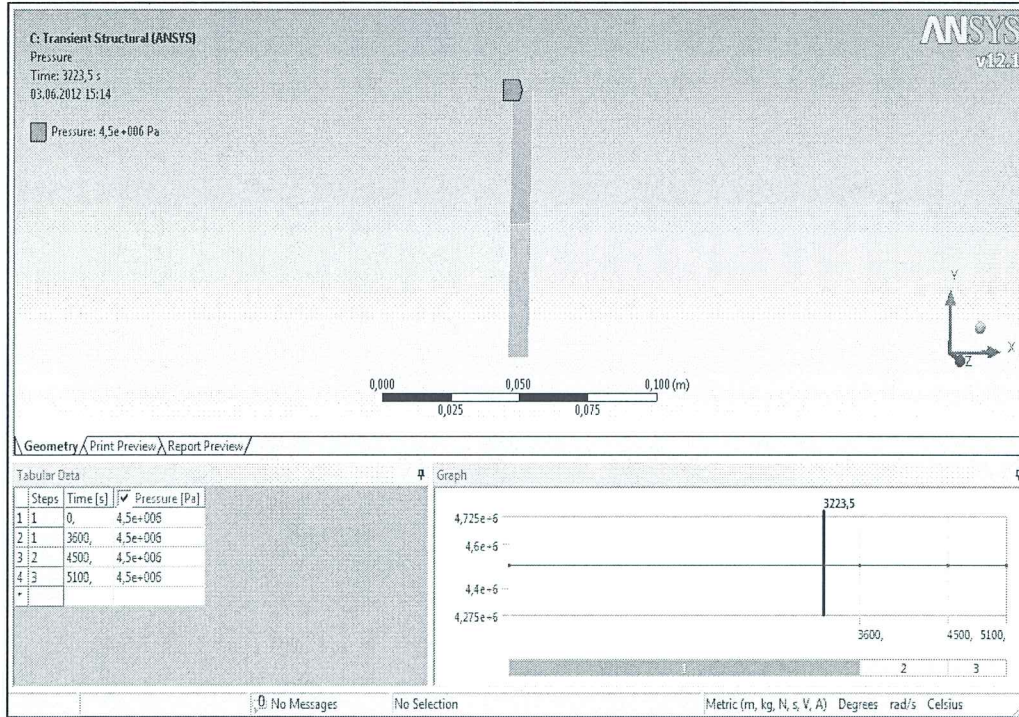
Modellemesi biten kaynaklı numuneler meshlenmiştir. Gerçek ölçülerine göre modellemesi yapılarak, malzeme özellikleri girilen numuneler quadrilaterals (köşeli) elemanla meshlenmiştir. Şekil 5.14’ de sabitlenmiş numune modeli görülmektedir.





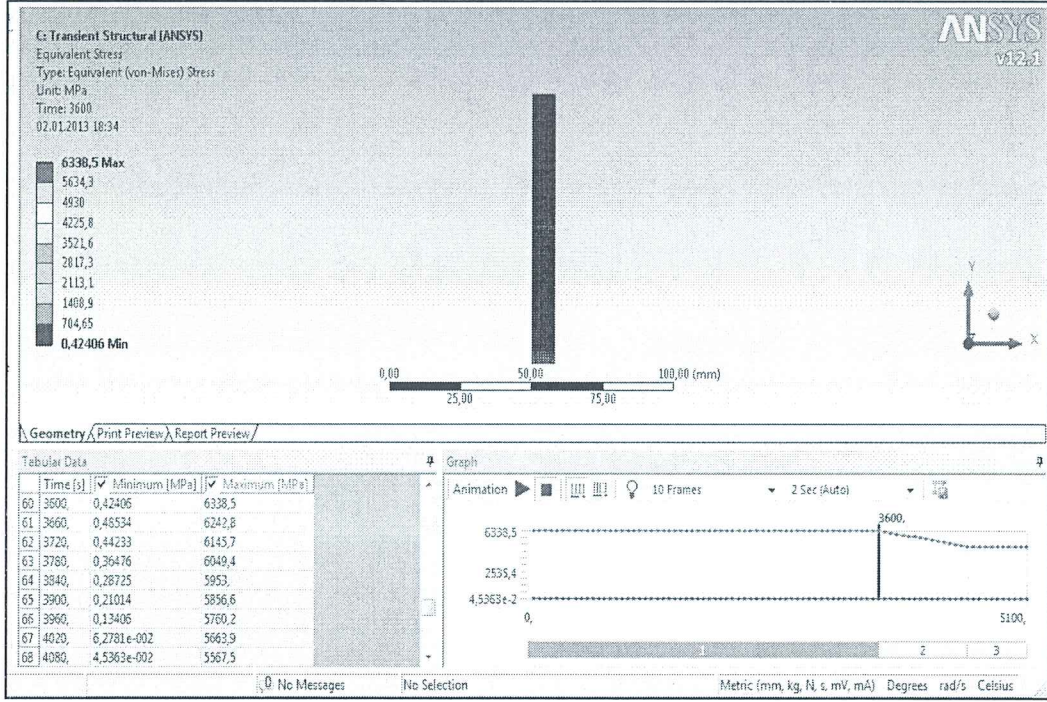
Şekil 5.14: Sabitlenmiş numune modeli

Kaynaklı numunelere 4,5 MPa lık basınç üstteki porselen numunenin üst yüzeyinden uygulanmış ve zamana bağlı olarak basınç değerleri girilmiştir (Şekil 5.15).



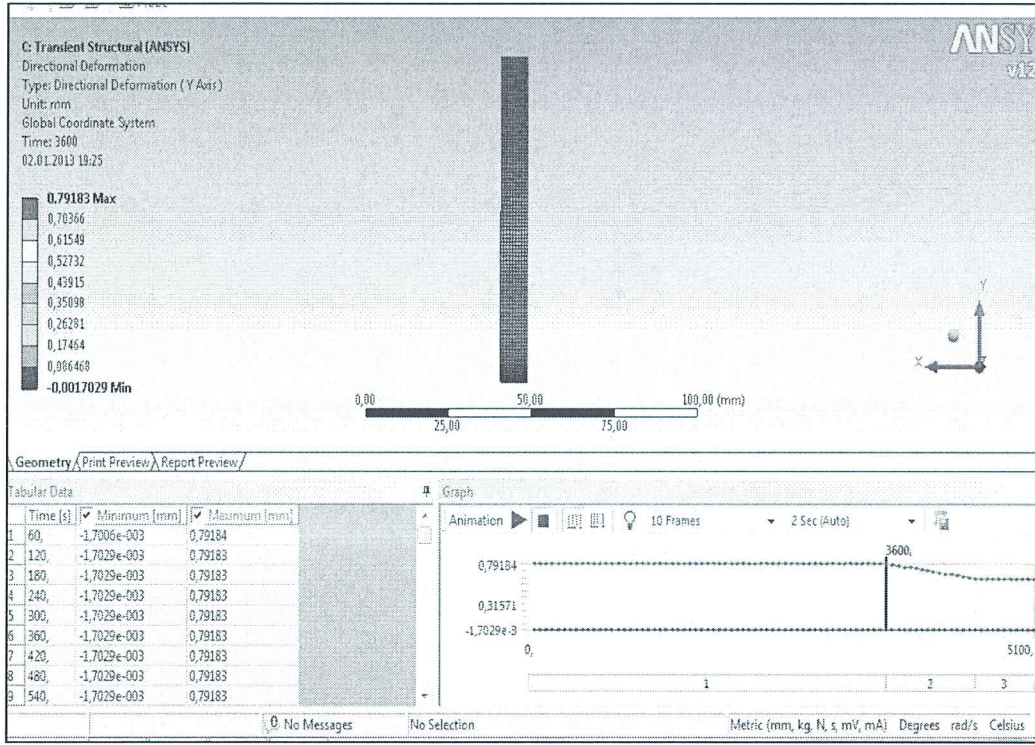
Şekil 5.15: Zaman bağlı basınç değerleri grafiği





**Şekil 5.16:** Basınç uygulanmaya başladıktan 3600 sn sonra Cu- porselen için eşdeğer gerilme değeri

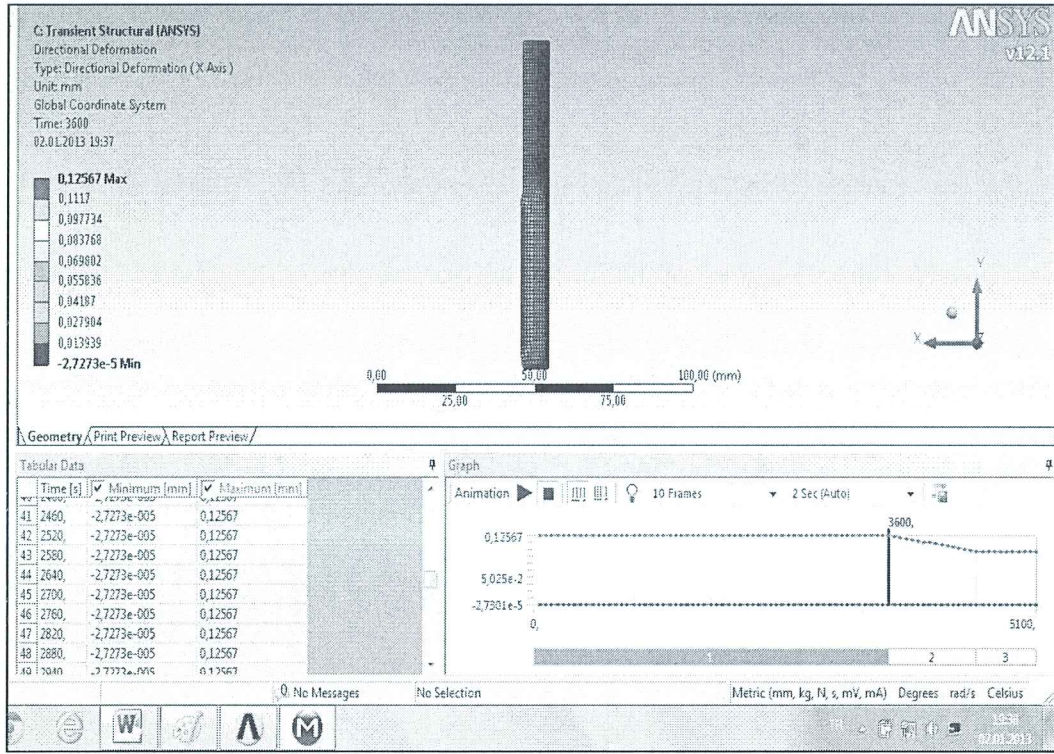
Şekil 5.16' de basınç uygulanmaya başladıktan 3600 sn sonra eşdeğer gerilme değeri verilmiştir. Difüzyon kaynağı sırasında basınç uygulanmaya başladıktan 3600 saniye sonraki eşdeğer gerilme değeri; porselenin ve Cu' ın pek çok bölgesinde 0,424 MPa olduğu gözlenirken, özellikle kaynak bölgesinde ve Cu numunenin alt kısımlarında bu değer 6338,5 MPa'ya yükseldiği gözlenmektedir.



**Şekil 5.17:** Basınç uygulanmaya başlandıktan 3600 sn sonra y yönündeki doğrusal deformasyon değeri

Şekil 5.17’ de basınç uygulanmaya başlandıktan 3600 sn sonra y yönündeki doğrusal deformasyon değeri görülmektedir. Difüzyon kaynağı deneyi sırasında basınç uygulanmaya başlandıktan 3600 saniye sonraki y eksenini yönündeki doğrusal deformasyon değerinin numunelerin toplam boyunda kısalma olarak izlendiği ve 0,7918 mm olduğu gözlenmektedir.

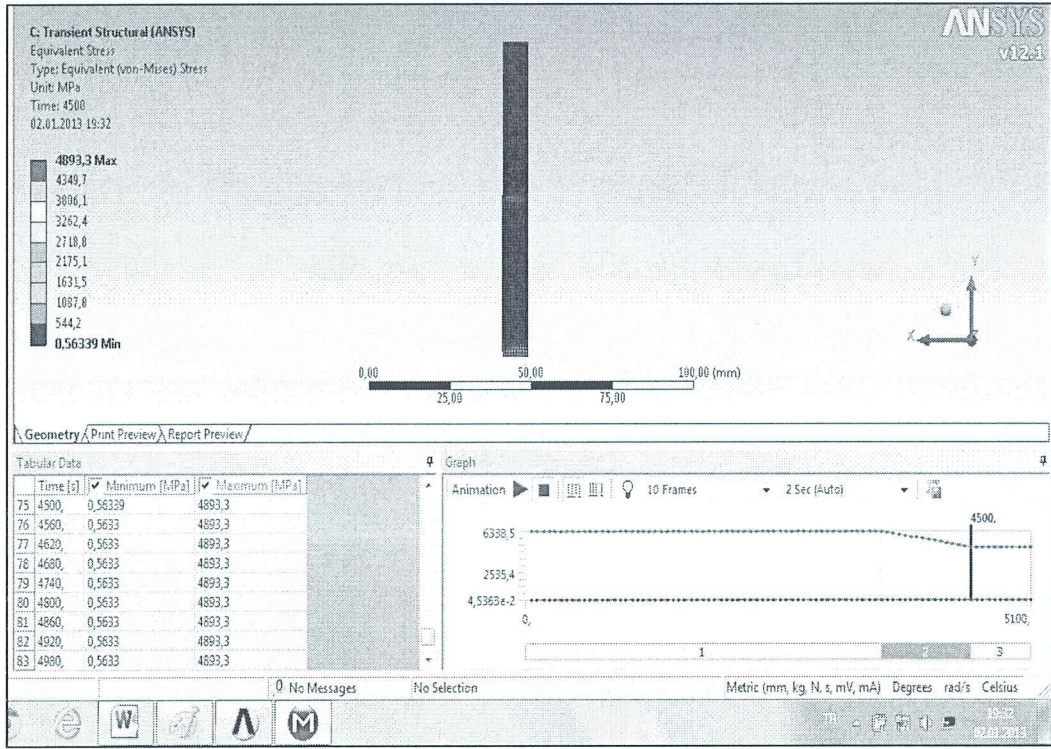




**Şekil 5.18:** Basınç uygulanmaya başladıktan 3600 sn sonra x yönündeki doğrusal deformasyon değeri

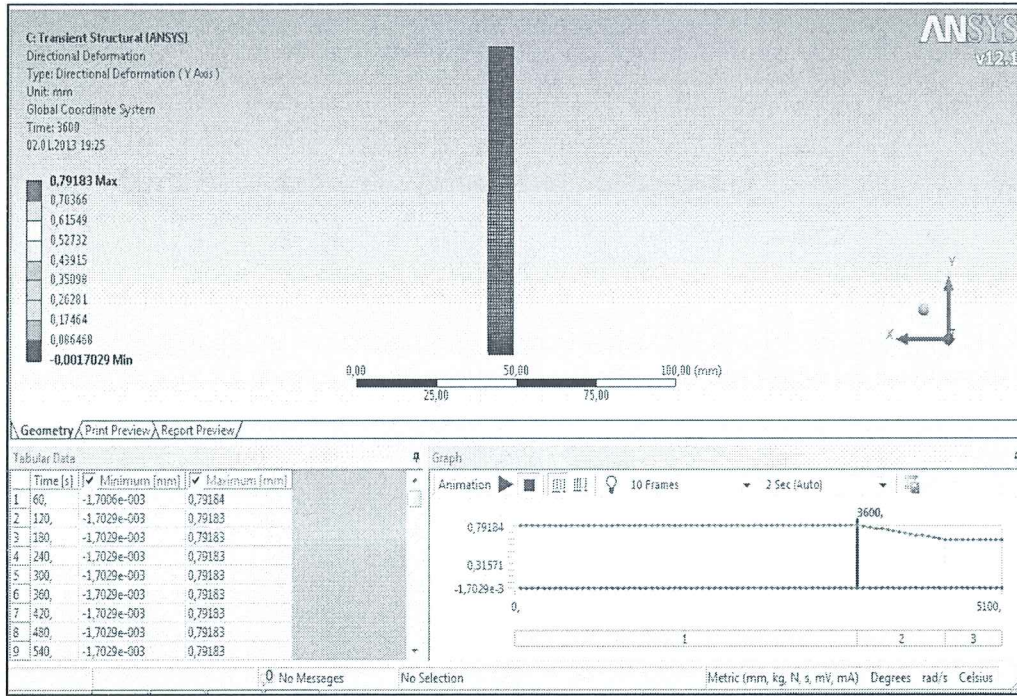
Şekil 5.18’ da basınç uygulanmaya başladıktan 3600 sn sonra x yönündeki doğrusal deformasyon değeri görülmektedir. Difüzyon kaynağı deneyi sırasında basınç uygulanmaya başladıktan 3600 saniye sonraki saniye sonraki x eksen yönündeki doğrusal deformasyon değeri, numunelerin çapında genişleme olarak görülmüştür. Çaptaki genişlemenin maksimum 0,12 mm olarak izlendiği ve özellikle bakır numunede daha fazla oluştuğu görülmüştür.





**Şekil 5.19:** Basınç uygulanmaya başladıktan 4500 sn sonra Cu- porselen için eşdeğer gerilme değeri

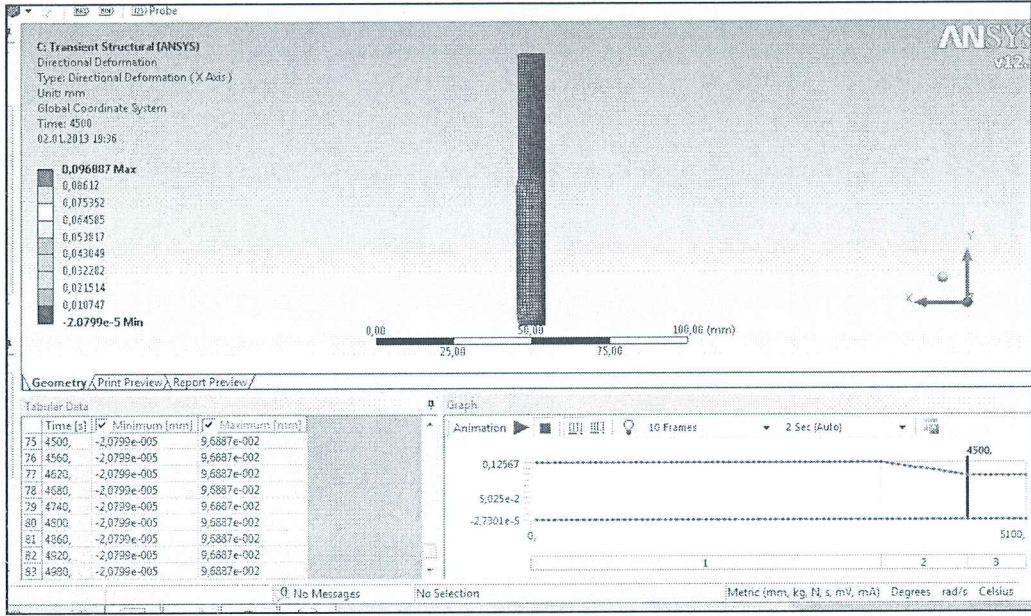
Şekil 5.19' de basınç uygulanmaya başladıktan 4500 sn sonra eşdeğer gerilme değeri verilmiştir. Difüzyon kaynağı sırasında basınç uygulanmaya başlandıktan 4500 saniye sonraki eşdeğer gerilme değeri; porselenin ve Cu' ın pek çok bölgesinde 0,563 MPa olduğu gözlenirken, özellikle kaynak bölgesinde ve Cu numunenin alt kısımlarında bu değer 4893.3 MPa olarak gözlenmektedir.



**Şekil 5.20:** Basınç uygulanmaya başladıktan 4500 sn sonra y yönündeki doğrusal deformasyon değeri

Şekil 5.20' de basınç uygulanmaya başladıktan 4500 sn sonra y yönündeki doğrusal deformasyon değeri görülmektedir. Difüzyon kaynağı deneyi sırasında basınç uygulanmaya başladıktan 4500 saniye sonraki y eksenini yönündeki doğrusal deformasyon değerinin numunelerin toplam boyunda kılma olarak izlendiği ve 0,7918 mm olduğu gözlenmektedir.





**Şekil 5.21:** Basınç uygulanmaya başladıktan 4500 sn sonra x yönündeki doğrusal deformasyon değeri

Şekil 5.21’ de basınç uygulanmaya başladıktan 4500 sn sonra x yönündeki doğrusal deformasyon değeri görülmektedir. Difüzyon kaynağı deneyi sırasında basınç uygulanmaya başladıktan 3600 saniye sonraki saniye sonraki x eksenindeki doğrusal deformasyon değeri, numunelerin çapında genişleme olarak görülmüştür. Çaptaki genişlemenin maksimum Cu numunede 0,096 mm, porselen numunede 0.03 mm olarak izlendiği görülmüştür.

Difüzyon kaynağı sırasında numunelere uygulanan basınç işlemi 5100 sn sonra kaldırılmaktadır. Deneye başladıktan 4500 saniyeden sonra 5100 saniyeye kadar deformasyon ve eşdeğer gerilme sonuçları değişmemektedir. Yapısal analiz incelendiğinde; 5100 saniye sonra, numunenin boyunda yaklaşık olarak 0.7918 mm lik bir kısalma çaplarında ise; Cu numunede 0,096 mm’ lik, porselen numunede 0,03 mm’lik bir genişleme olduğu gözlenmektedir. Deneyler sonrasında yapılan ölçümlerle, analiz sonuçları karşılaştırıldığında çok yakın sonuçlar olduğu tespit edilmiştir.



## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Elektromekanik sanayinde kullanılmakta olan SF<sub>6</sub> gazlı kesicilerinde ve vakumlu kesicilerde kullanılan; Cu ve porselen malzemeler lehimli yapıştırma tekniği ile bağlanmaktadır. Difüzyon kaynağı ile Cu ve porselenin birleştirilmesi yöntemi, vakumlu kesicilerin üretimi sırasında kullanılacak önemli bir teknik olacaktır.

Ayrıca; TRT'nin orta ve yüksek frekanslı vericilerinde kullanılan elektron tüplerinde de Cu ve porselen malzeme birarada kullanılmaktadır ve henüz ülkemizde üretimi sağlanamamaktadır. Cu ve porselen malzemelerin difüzyonla birleştirilmesi yönteminin elektron tüplerinin üretiminde kullanılması ile yurt dışından alınan bu malzemenin Türkiye' de de üretilebilmesi adına önemli bir gelişme olacaktır.

Bu çalışmada Cu ve porselen malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir.

Numunelerin birleştirilmesinde, BAÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi'nde bulunan; sıcaklık, basınç ve koruyucu gaz atmosferinin kontrol edilebildiği difüzyon kaynağı cihazı kullanılmıştır. Difüzyon kaynağı işlemi belirlenen 12 farklı kaynak parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. Difüzyon kaynağında sıcaklık parametresi olarak 875, 900 °C, basınç parametresi olarak 4,5, 5,5 MPa, zaman parametresi olarak ise 45, 60, 75, 90 dak alınmıştır.

Deneylerden sonra; numunelerin boyutları ölçüldüğünde; kaynaklı numunenin toplam boyunda 0,8 mm' lik bir kılma, çaplarında ise özellikle Cu numunede daha belirgin olarak izlenen 0,1mm' lik bir genişleme, porselen numunede ise; 0,03 mm'lik bir genişleme olduğu tespit edilmiştir.

Deneyler sonrasında kaynaklı numunelere, kesilmeye karşı dayanımlarını ölçmek için kesme testi uygulanmıştır. Kesme testi; Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Malzeme Laboratuvarı'nda, çekme deney cihazına monte edilen kesme kalıbında yapılmıştır. Deneyler sonrasında, kesme testi sonuçlarına göre, 875 ° C'de yapılan deneylerde de kaynak dayanımının oldukça

düşük olduğu tespit edilmiştir. En iyi kesme testi sonucunu veren parametreler 4,5 MPa basınçta, 60 dak' da ve 900 °C' de yapılan 11 nolu deney numunesine ait çıkmıştır. Parametrelerin birbiriyle bağlantılı olduğu tespit edilmiştir. 45 dak' da yapılan deneylerde de kaynak dayanımının oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Kaynak süresi gerekenden az olduğunda kaynaklı birleştirmenin kalitesi düşebilmekte, gerekenden daha uzun süre uygulandığında ise elementler arasında yeni faz oluşumu ve mevcut faz oranlarında artış ya da tane büyümesi gibi istenmeyen durumlar meydana gelebilmektedir. Kesme testi sonuçları incelendiğinde 900 °C' de yapılan deneylerde, 60 dak difüzyon süresinin ve 4,5 MPa difüzyon basıncının üzerindeki değerlerde; kesme dayanımının düştüğü görülmüştür. Bunun sebebinin, porselene ait olan ve kaynak sonrası arttığı tespit edilen mevcut fazlar ile porselene difüze olan Cu' ın oksijenle birleşerek oluşturduğu düşünülen yeni fazların 5µm' yi geçmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür (Şekil 3.15).

Deneyle sonrasında kaynaklı numunelerin birleşme yüzeyine dik olarak alınan kesit üzerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca Cu ve porselen ana malzemelerine de sertlik ölçümü yapılarak kaynak öncesi ve sonrası sertlikler karşılaştırılmıştır. Kaynak işlemi sonrasında; porselen numunenin sertliğinde artış, Cu numunenin sertliğinde düşüş tespit edilmiştir. Cu numunenin sertliğinin düşme sebebinin; soğuk çekilerek imal edilen Cu' ın, difüzyon kaynağı sırasında uygulanan 900 °C' lik sıcaklık nedeniyle gerilim giderme tavlmasına maruz kalmış gibi bir etki göstererek, içeriğindeki gerilmelerin kaynak sonrasında azalmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Porselen numunenin sertliğinin artmasına ise; porselenin mevcut faz oranlarındaki saptanan artışların neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak bölgesindeki sıcaklığa ve difüzyona bağlı olarak, porselene difüze olan Cu' la oksijen arasındaki meydana gelen yeni faz oluşumlarının sertlik değerinin artmasına neden olduğu düşünülmüştür (Şekil 3.20).

Elektron mikroskopuyla mikroyapı incelemeleri ve EDX analizleri Anadolu Üniversitesi'ne bağlı Seramik Araştırma Merkezi A.Ş' de yapılmıştır. Yapılan incelemelerde; Cu-porselen numunelerin kaynak bölgesinde difüzyonun gerçekleştiği tespit edilmiştir. İkincil elektron ve geri yansıyan elektronla yapılan incelemeler sonucu elde edilen mikroyapı görüntülerinde, difüzyon bölgesinde, Cu ve porselen malzemelerin birleştiği görülmüştür. EDX analizlerine göre; difüzyon bölgesinde, Cu tarafında porselene ait, porselen tarafında Cu' a ait elementlerin varlığı tespit edilmiş,

difüzyonla kaynaklanmanın gerçekleştiği gösterilmiştir. Kaleseramik Çanakkale Kalebodur Seramik Sanayi A.Ş. Kompozit İzolatör Üretim ve Arge Bölümü'nde XRD faz analizi yapılmıştır. Difüzyon kaynağı sonrası porselen malzemenin yapısındaki; mullit, korund, kristobalit ve cam fazlarının oranlarında artış görülmüştür (Şekil 4.38-4.41). Difüzyon bölgesinde meydana gelen bu durum; porselen malzemenin sertlik değerinin artmasına ve kaynak dayanımını artmasına neden olmaktadır.

Kesme testi sonuçlarına göre, deney parametreleri; Minitab programında istatistiksel modelleme analizi ile değerlendirilmiştir. İstatistiksel modelleme analizi ile en iyi sonuç; 900 °C'de, 4,5 MPa basınçta ve 60 dak difüzyon süresinde yapılan deney için elde edilmiştir. Yapılan kesme testi sonuçlarına göre de; en yüksek kesme dayanımı 900 °C'de, 4,5 MPa basınçta ve 60 dak difüzyon süresinde yapılan deney için elde edilmiştir. Yapılan istatistiksel modelleme analizi ile kesme testi sonuçları eşleşmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle en yüksek kesme testi sonucunu veren parametrelere göre yapısal ve termal analizler yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemine göre yapılan yapısal analiz sonuçları incelendiğinde; numunelerin toplam boyunda 0,798 mm' lik bir kısalma, çaplarında ise özellikle Cu numunede daha belirgin olarak izlenen 0,096 mm' lik bir genişleme, porselen numunede 0,03 mm'lik bir genişleme olduğu tespit edilmiştir. Deney sonrasında yapılan ölçümlerle analiz sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.



## 7. GENEL SONUÇLAR

1. Cu ile porselen difüzyon kaynağıyla birleştirilmiş vaziyette, SF6 gazlı kesicilerde, vakumlu kesicilerde ve TRT'nin orta ve yüksek frekanslı vericilerinde kullanılan elektron tüplerinde uygulama alanı bulmaktadır.
2. Bu çalışmada Cu ile porselenin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır.
3. Cu ile porselenin difüzyon kaynağında, yanal yüzeylerde, Cu' da 0,1 mm'lik, porselende 0,03 mm'lik genişleme, kaynaklı numunenin toplam boyunda ise 0,8 mm'lik kısalma görülmüştür.
4. Cu-porselen kaynaklı numunelerinin kesilmeye karşı dayanım testinde en büyük değer; 4,5 MPa basınç, 900 °C sıcaklık ve 60 dak sürede elde edilmiştir. Bu parametrelerde yapılan difüzyon kaynağı sırasında porselen malzemenin içeriğinde bulunan fazlarının oranlarında meydana gelen artışın kesme dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca difüzyon kaynağı sırasında porselen numuneye difüze olan Cu' m, ısınmada etkisi ile porselenin içeriğinde bulunan; oksijenle birleşerek, yeni fazlar meydana getirdiği ve bu fazların da kaynak dayanımını arttırdığı düşünülmektedir. 60 dak' nın üzerindeki sürelerde, bu fazlardaki artış miktarının gevreklik ve kırılmalığa neden olduğu için dayanımı düşürdüğü düşünülmektedir.
5. Cu-porselen kaynaklı numunelerinin kaynak öncesi ve sonrası sertlik değerleri karşılaştırılmış, bakırın sertliğinde düşüş, porselenin sertliğinde ise artış meydana gelmiştir.
6. Cu-porselen kaynaklı numunesi ve orijinal porselen numune XRD faz analizine tabi tutulmuştur. Difüzyon kaynağı sonrası porselen malzemenin yapısındaki; mullit, korund, kristobalit ve cam fazlarının oranlarında artış görülmüştür. Faz oranlarındaki artışın, porselen malzemenin sertlik değerinin yükselmesine neden olduğu tespit edilmiştir.

7. Cu-porselen difüzyon kaynağı numuneleri EDX analizine tabi tutulmuştur. Difüzyon sonrasında kaynaklı bölgedeki elementlerin oranları araştırılmıştır. Porselen tarafında Cu elementi, Cu tarafında porselen elementleri görülmüştür.
8. Cu-porselen difüzyon kaynağı sonrası elde edilen değerler, Minitab programında istatistiksel modelleme analizleri ve ANSYS programında sonlu eleman analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Aşağıda bu karşılaştırma verilmektedir.

**a) Minitab Programında**

<u>En İyi Parametre</u>	<u>Gerçek</u>	<u>Minitab Programında</u>
Sıcaklık	900 °C	900 °C
Basınç	4,5 MPa	4,5 MPa
Zaman	60 dak	60 dak

**b) ANSYS Programında**

<u>Tespitler</u>	<u>Gerçek</u>	<u>ANSYS Programında</u>
Bakırın çapında genişleme	0,1 mm	0,096 mm
Porselenin çapında genişleme	0,03 mm	0,03 mm
Toplam boyda kısalma	0,8 mm	0,798 mm

## 8. KAYNAKLAR

- [1] Çelik, S. ve Ay, İ., “Koruyucu Gaz Altında Difüzyon Kaynağı ve Uygulaması”, *J. of Engineering and Environmental Science Dergisi*, 23, 63-70, (1999).
- [2] Buytoz, S., “Aliminyum Matrisli AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviyeli Kompozit Malzemelerin Katı Hal Birleştirme Teknikleri ile Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (1999).
- [3] Zhong, Z., Hinoki, T., Jung, H.C., Park, Y.H. and Kohyama, A., “Microstructure And Mechanical Properties Of Diffusion Bonded SiC/Steel Joint Using W/Ni İnterlayer”, *Materials & Design*, 31(3), 1070-1076, (2010).
- [4] Sinnott, S.B. and Dickey, E.C., “Ceramic/Metal İnterface Structures and their Relationship To Atomic- And Meso-Scale Properties”, *Materials Science and Engineering*, 43(1-2), 15, 1-59, (2003).
- [5] Aydın, M., Şan, O. ve Özgür, C., “Difüzyon Kaynağı Bağlantısı ile Kartuş Seramik Filtre Üretimi”, *TÜBİTAK 106M147*, Kütahya, (2007).
- [6] Zhang. Y., Feng. D., He. Z.Y. ve Chen. X.C., “Progress in Joining Ceramics to Metals”, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 13(2), 01-05, (2006).
- [7] Akselsen, O.M., “Review Diffusion Bonding of Ceramics. *Journal Of Materials*”, *Science*, 27, 569-579, (1992).
- [8] Liu, H.J., Feng, J.C. and Qian, Y.Y., “Interface Structure and Formation Mechanism of Diffusion-Bonded Joints of SiC Ceramic to TiAl-based Alloy”, *Scripta Materialia*, 43(1), 49-53, (2000).



- [9] Martinez, M. A., Rodriguez, J., Navarro, C., Cortes, R. and Sanchez, V., "Welding Of Dense Alumina And Aluminium By Plastic Deformation and Diffusion", *Journal Of Materials Science*, 27, 4230-4236, (1992).
- [10] Hattali, M.L., Valette, S., Ropital, F., Mesrati, N. and Treheux, D., "Interfacial Behavior On Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HAYNES<sup>®</sup> 214<sup>™</sup> Joints Fabricated By Solid State Bonding Technique With Ni Or Cu–Ni–Cu Interlayers", *Journal of the European Ceramic Society*, In Press, (2012).
- [11] Barrena, M.I., Matesanz, L. and Gómez de Salazar, J.M., "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti6Al4V Diffusion Bonding Joints Using Ag–Cu Interlayer", *Materials Characterization*, 60(11), 1263-1267, (2009).
- [12] Travessa, D., Ferrante, M. and Ouden, G., "Diffusion Bonding Of Aluminium Oxide To Stainless Steel Using Stress Relief Interlayers", *Materials Science and Engineering*, 337( 1–2), 287-296, (2002).
- [13] Serier, B., Bouiadjra, B. B., Belhouari, M. and Treheux, D., "Experimental Analysis Of The Strength Of Silver–Alumina Junction Elaborated At Solid State Bonding", *Materials & Design*, 32( 7), 3750-3755, (2011).
- [14] Shen, X., Li, Y., Putchkov, U.A., Wang, J. and Huang, W., "Finite-Element Analysis Of Residual Stresses In Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiC/W18cr4v Diffusion Bonded Joints", *Computational Materials Science*, 45(2), 407-410, (2009).
- [15] Kliauga, A.M., Travessa, D., Ferrante, M., "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti Interlayer/AISI 304 Diffusion Bonded Joint: Microstructural Characterization Of The Two Interfaces", *Materials Characterization*, 46(1), 65-74, (2001).
- [16] Duarte, L.I., Viana, F., Ramos, A.S., Vieira, M.T. Leinenbach, C., Klotz, U.E. and Vieira, M.F., "Diffusion Bonding Of Gamma-TiAl Using Modified Ti/Al Nanolayers", *Journal of Alloys and Compounds*, In Press, (2011).

- [17] Çalık, A., “Interface Microstructure of Diffusion Bonded Ni<sub>3</sub>Al Intermetallic Alloy And Austenitic Stainless Steel”, *Materials Letters*, 63(28), 2462-2465, (2009).
- [18] Kara, R., Virdil, H., Çolak, F. ve Taşgetiren, S. “Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilen Fe- Cu Çiftinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 45-52, (2006).
- [19] Kolukisa, S., “The Effect of the Welding Temperature on the Weldability in Diffusion Welding of Martensitic (AISI 420) Stainless Steel With Ductile (Spheroidal Graphite-Nodular) Cast Iron”, *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 33–36, (2007).
- [20] Gürler, R., Torun, O., Çelikyürek, İ. ve Yağan, M., “Fe-40Al Alaşımının Difüzyon Kaynağı”, *Tübitak 105M066*, Eskişehir, (2007).
- [21] Çelik, S., “Koruyucu Gaz Altında Saf Alüminyum ve Bakırın difüzyon Kaynağı Şartlarının Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir (1996).
- [22] Taşkın, M. ve Ozan, S., “AISI 430/AISI 1010 Çelik Çiftinin Cu Ara Tabaka Kullanılarak Yapılan TLP Difüzyon Kaynağında Sıcaklığın Birleşmeye Etkisinin Araştırılması”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 2(3), 180-184, (2004).
- [23] Talaş, Ş., “Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo(%) Alaşımının Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmesinde Basınç Ve Yüzey Özelliklerinin Etkisi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3, 7-14, (2004).
- [24] Kurt, B. ve Orhan, N., “Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmiş Ti-6Al-4V Alaşımı ve 316 Paslanmaz Çelik Çiftinin Ara Yüzey Mikroyapısının İncelenmesi”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 3(3), 65-70, (2005).

- [25] Li, J., Han, Z., Xiong, J., Zhang, F. and Li, W.Y., “Study On Microstructure And Strength of AgNi Alloy/Pure Al Vacuum Diffusion Bonded Joints”, *Materials and Design*, 30, 3265–3268, (2009).
- [26] Ravisankar, B., Krishnamoorthi, J., Ramakrishnan, S.S. and Angelo, P.C., “Diffusion Bonding of SU 263”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 209, 2135–2144, (2009).
- [27] Aydın, K., Kaya, Y. and Kahraman, N., “Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper”, *Materials & Design*, 37, 356-368, (2012).
- [28] Yuan, X.J., Sheng, G.M., Qin, B., Huang, W.Z. and Zhou, B., “Impulse Pressuring Diffusion Bonding Of Titanium Alloy To Stainless Steel”, *Materials Characterization*, 59(7), 930-936, (2008).
- [29] Elrefaey, A. and Tillmann, W., “Solid State Diffusion Bonding Of Titanium To Steel Using A Copper Base Alloy As Interlayer”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209( 5), 2746-2752, (2009).
- [30] Atasoy, E. and Kahraman, N., “Diffusion Bonding of Commercially Pure Titanium to Low Carbon Steel Using a Silver Interlayer”, *Materials Characterization*, 59( 10), 1481-1490, (2008).
- [31] Zhang, J., Shen, Q., Luo, G., Li, M. and Zhang, L., “Microstructure And Bonding Strength Of Diffusion Welding of Mo/Cu Joints With Ni Interlayer”, *Materials & Design*, 39, 81-86, (2012).
- [32] Sabetghadam, H., Hanzaki, A.Z. and Araee, A., “Diffusion Bonding Of 410 Stainless Steel To Copper Using a Nickel Interlayer”, *Materials Characterization*, 61, Issue 6, 626-634, (2010).
- [33] Torun, O., Çelikyürek, İ. ve Gürler, R. “Diffusion Bonding Of Iron Aluminide Fe<sub>72</sub>Al<sub>28</sub> Using a Copper Interlayer”, *Materials Characterization*, 59(7), 852-856, (2008).



- [34] Huijie, L. and Xiuli, F. "Study of Diffusion Bonding of Fine Grain TC21 Titanium Alloy", *Rare Metal Materials and Engineering*, 38(9), 1509-1513, (2009).
- [35] Li, Y., Liu, P., Wang, J. and Ma, H., "XRD and SEM Analysis Near The Diffusion Bonding Interface Of Mg/Al Dissimilar Materials" *Vacuum*, 82(1,12),15-19, (2007).
- [36] Klaasen, H., Kübarsepp, J. and Laansoo, A. and Viljus, M., "Reliability of Dual Compounds "Carbide Composite+Steel" Produced by Diffusion Welding", *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28, 580–586, (2010).
- [37] Kejanli, H., "Ti51Ni49 Kompozitinin Cu-Ni Ara Tabakalı Difüzyon Kaynağında Sıcaklık Ve Sürenin Birleşmeye Etkisinin Araştırılması", *E-Journal Of New World Sciences Academy*, Issn:1306-3111 4(2), 2a0019, (2009).
- [38] Kejanli, H., Taşkın, M. ve Çalığülü, U., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Ni-Ti-Cu Kompozitlerin Ni ve Cu Aratabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kaynak Sıcaklığının Bağlantı Karakteristiği Üzerine Etkisi", *E-Journal of New World Sciences Academy*, ISSN:1306-3111, 3(4), Article Number: A0097, (2008).
- [39] Küçükpara, H., Acarer, M., Ahlatcı, H. ve Türen, Y., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-SiCp Kompozitlerin Difüzyon Kaynak Kabiliyetlerinin İncelenmesi", *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (LATS'09)*, (2009).
- [40] Barrena, M.I., Gómez de Salazar J.M. and Matesanz, L., "Ni-Cu Alloy for Diffusion Bonding Cermet/Steel In Air", *Materials Letters*, Volume 63, Issues 24-25, 15 October 2009, Pages 2142-2145, (2009).
- [41] Feng, T., Chen, X., Wu, L. and Lo, S. "Diffusion Welding of SiCp/2014Al Composites Using Ni As İnterlayer", *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 13(3), 267, (2006).

- [42] Anık, S., *Kaynak Tekniği El Kitabı Yöntemler ve Donanımlar*, Gedik Eğitim Vakfı, Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, (1991).
- [43] Koçer, S., “Yüksek Krom Nikel Alaşımli Paslanmaz Çeliğin Alaşimsız Düşük Karbonlu Çelikle Difüzyon Kaynağının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (1998).
- [44] Dağlılar, S., “Difüzyon Kaynağı”, *Mühendis ve Makine Kaynak Özel Sayısı*, MMO Yayınları, (1994).
- [45] Owczarski, W.A. and Duvall, D.S., “Advanced Diffusion Welding Processes”, *New Trend in Materials Processing*, 301-329, (1976).
- [46] Oates, W.R., *Welding Handbook 2*, Eight Edition, (1987).
- [47] Tuncel, S. “Yüksek Alaşımli Bir Takım Çeliği ile Az Alaşımli Bir İslah Çeliğinin Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi Üzerine Deneysel Çalışmalar”, Doktora Tezi, *TÜBİTAK Gebze Araştırma Merkezi*, Gebze, (1989).
- [48] Taşkın, M., “Yüksek Karbonlu Çeliklerin Süper Plastik Halde Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2000).
- [49] Tekin, A., *Malzemelerin Elektronik Özellikleri*, İTÜ Yayını, (1986).
- [50] Bargel, H.J. and Schulze, G., *Malzeme Bilgisi I ve II*, (Çevirenler: Güleç, Ş. ve Aran, A.), TÜBİTAK Yayınları, Gebze, (1985-1987).
- [51] Kurt, A., “Toz Metalden Üretilen Bronz Yatağın Düşük Karbonlu Çeliğe Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi” Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (1996).
- [52] Oğuz, B., “*Demir Dışı Metaller Kaynağı*”, Oerlikon Yayını, İstanbul, 468-469, (1990).
- [53] Kazakov, N.F., *Diffusion Bonding of Materials*, (Edt: Russian: Kuznetsov, B.V.) Pergamon Pres, (1985).

- [54] Fidan, L., “Saf Alüminyum ve Saf Bakırın difüzyon Kaynağında Arafazların Oluşumu ve Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2006).
- [55] Oğuz, B., *Sertlehimleme*, Oerlikon Yayınları, İstanbul, (1988).
- [56] Ushakova, S.E. and Kotelnikov, A.A., “The Vacuum Diffusion Welding of Grade 15 Steel to Ams Alloy or ADI Aluminium Using An Interlayer of Nickel”, *Automatic Welding*, 10, 52-53, (1970).
- [57] Atasoy, E., “Titanyum ve Düşük Karbonlu Çelik Çiftinin Bağlayıcı Kullanılarak Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, Bilim Uzmanlığı Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi*, Zonguldak, (2007).
- [58] Askeland, D.R., *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, (Çev: Erdoğan, M.), Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 1, 40, 51, 76-80,120, 288, (1998).
- [59] Demirci, A. H., *Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi*, Alfa Basım Yayım Dağıtım Sti, İstanbul, 88-94, (2004).
- [60] Topbaş, M.A., *Isıl İşlemler*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 34-40, (1993).
- [61] Güleç, Ş. ve Aran, A. *Malzeme Bilgisi I*. İTÜ, İstanbul, 34-40, (1993).
- [62] Erdoğan, M., *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, 3. Baskı, Ankara : Nobel Yayın Dağıtım, 76-93, (1998).
- [63] Spanswick, O. S., “*Diffusion Bonding – Engineering Applications*”, *Production Engineer*, 45-51, (1989).
- [64] *Welding Handbook*, Eight Edition, 2, American Welding Society, isbn: 0871712814 and 0871713543, (1987).
- [65] SALEHİ, M.T., “Isostatic Diffusion Bonding of Some Superplastic Alloys”, Doktora Tezi *UMIST*. Manchester, (1990).
- [66] Alm, G.V., “Desing Feature Space-Age Bonding Techiques”, *Mechanical Engineering*, 1, 24-32 , (1970).



- [67] Kearns, W.H., "Diffusion Welding and Brazing-Fundamentals Of The Processes", *AWS Welding Handbook*, Florida, 313-335, (1980).
- [68] PARTRIDGE, P.G., "Diffusion Bonding of Metals", Agard 168, *NATO Yayını*. Essex, (1989).
- [69] Guo, Z.X., "Diffusion Bonding of Superplastic Metarials", Yüksek Lisans Tezi, *UMIST*. Manchester, (1985).
- [70] Yılmaz, O., "Östenitik Paslanmaz Çelik ve Bakır Çiftinin difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Birleşmeye Etkisi", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1999).
- [71] WILLAMSON, J.R., "Superplastic Forming Diffusion Bonding of Titanium", *Proc. The Ist. Int. Cant. Materials in Areospace*. 10817, 373-394, (1986).
- [72] İpekoglu, G., "Difüzyon Kaynaklı TiAl- TiAl Alaşımlarının İyçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, (2003).
- [73] Aydın, M., "Gözenekli Seramik Malzeme ile Paslanma Çeliğın Difüzyon Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi*, 23(3) , 595-599, (2008).
- [74] Çerçi, Z., "Yüksek Oranda Alüminyum Oksit İhtiva Eden Yüksek Gerilim İzolatör Massesi Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, ( 2006).
- [75] Erol, M., "*Yeni Malzemeler 2007-2008 Ders Notları, Bölüm2 Seramik Malzemeler*", KYM 345, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği, (2007).
- [76] Ferro, R., Saccao, A., *Intermetallic Chemistry*, (Edit: Chan, R, W.), Pergamon Materials Series, Elsevier Ltd., (2008).
- [77] Kesici , T. and Kocabaş, Z., *Biyoistatistik*, Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi, Yayın No : 94, Ankara, (2007).

- [78] Girginer, N. ve Kaygisiz, Z., “İstatistiksel Yazılım Seçiminde Analitik Hiyerarşi Süreci Ve 0–1 Hedef Programlama Yöntemlerinin Birlikte Kullanımı”. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, Haziran 2009, 10(1) Isbn: 1302-9703, 211-233, (2009).
- [79] Tolun, F.G., “Yük Taşıtlarının Taşıyıcı Aksamalarının Gerçek Yol Yükleri Altında Analiz Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2007).
- [80] Altan, M., “Kaynak Distorsiyonları ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2002).