

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ**

**Al-Cu ÖTEKTİK ALAŞIMINA YAPILAN KATKI MADDELERİNİN
(Si, Co, Ni, Sb ve Bi) MİKROYAPI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI
PROJE NO: FBA-2013-4508**

**Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Hasan KAYA
Araştırmacılar: Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI
Prof. Dr. Emin ÇADIRLI
Doç. Dr. Uğur BÜYÜK
Aynur AKER**

**Temmuz 2014
KAYSERİ**

ONAY

Bu projenin kabulü Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunun
..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... /..... / 2014

EÜBAP Komisyonu Başkanı

Mühür ve İmza

TEŞEKKÜR

Bu proje çalışmasının yapılabilmesi için sağladığı maddi destekten dolayı Erciyes Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

Al-Cu ÖTEKTİK ALAŞIMINA YAPILAN KATKI MADDELERİNİN (Si, Co, Ni, Sb ve Bi) MİKROYAPI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada, özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılan, Al-ağ.%33Cu yapılan katkılama [ağ.% (Si, Co, Ni, Sb ve Bi)] alaşımlarının mekanik ve elektriksel özelliklerinin katılaştırma hızına bağlılığı araştırıldı. Bu amaçla, vakumlu eritme fırını ve döküm fırını yardımıyla belirlenen bileşimde alaşımlar hazırlanarak grafit numune kalıplarına dolduruldu. Daha sonra bu alaşımlar, Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınında, Argon ortamında sabit sıcaklık gradyenti altında aşağıdan yukarı doğru farklı katılaştırma hızlarında katılaştırıldı.

Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (*SEM*) yardımıyla kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerin mikroyapı fotoğrafları çekildi. Çekilen bu fotoğraflar üzerinden lamel, çubuk ve levha olarak tanımlanan ötektik mesafeler (λ_E) ölçüldü. Farklı katılaştırma parametrelerinde üretilen her bir numunenin mikrosertlik (*HV*), çekme-dayanım (σ_U) ve elektriksel öz direnç (ρ) değerleri de ölçüldü. Katılaştırma hızının (*V*) ötektik mesafeler, mikrosertlik, çekme-dayanım ve elektriksel öz direnç değerleriyle ilişkisi lineer regresyon analizi yöntemi kullanılarak belirlendi.

Bu sonuçlara göre, katılaştırma hızının artmasıyla ötektik mesafelerin azaldığı, buna karşın mikrosertlik, çekme-dayanım ve elektriksel öz direnç değerlerinin arttığı tespit edildi.

Anahtar Kelimeler: Al-Cu Ötektik, Üçlü Alaşımlar, Mikroyapı, Mikrosertlik, Çekme Gerilimi, Elektriksel İletkenlik.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CONTENT MATTERS (Co, Ni, Sb, Bi ve Si) ON THE MICROSTRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES IN THE Al-Cu EUTECTIC ALLOY

ABSTRACT

In this study, the mechanical and the electrical properties of the Al-wt.%33Cu-%2x [wt.%2x (Si, Co, Ni, Sb ve Bi)] alloys which are especially using at automotive industry were investigated in terms of the dependency on the growth rates. For this purpose, the alloys with determined components were placed in a graphite sample crucible by using a vacuum melting furnace and casting furnace. Then, these alloys have been directionally solidified upwards under argon atmosphere and with different growth rates at a constant temperature gradient in a Bridgman type directional solidification furnace. The microstructures of the controlled directionally solidified samples were photographed by using an optical light microscopy and the scanning electron microscope (SEM). On these photographs of samples, the eutectic spacings (λ_E) such as lamellar, rod and plate spacings have been measured. And also the microhardness (HV), tensile strength (σ_t) and electrical resistivity (ρ) of each sample which produced under the different solidification conditions has also been measured. The correlations between the growth rate and the eutectic spacings, the microhardness, tensile strength, electrical resistivity were determined by using a linear regression analysis method. According to these results, it has been found that the value of eutectic spacing decreases with the increasing value of growth rate, whereas the values of the microhardness, tensile strength and electrical resistivity increases with the increasing value of growth rate.

Keywords: Al-Cu Eutecticalloy, Ternary Alloys, Microstructure, Microhardness, Resistivity.

İÇİNDEKİLER

ONAY	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
1. BÖLÜM TEMEL BİLGİLER.....	1
1.1. GİRİŞ	1
1.1.1. Faz Dönüşümlerinde Denge.....	1
1.1.2. Katılaşmada Sürücü Kuvvet.....	3
1.1.3. Aşırı Soğumalar	4
1.1.4. Katılaştırma.....	4
1.1.5. Doğrusal Katılaştırma	5
1.1.5.1. Saf Metallerin Katılaştırılması	7
1.1.5.2. Alaşımların Katılaştırılması	9
1.1.6. Alaşımların Ötektik Katılaştırılması	10
1.1.7. Sertlik.....	12
1.1.7.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi	12
1.1.7.2. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi	13
1.1.7.3. Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi.....	13
1.1.7.4. Vickers sertlik Ölçme Yöntemi.....	14
1.1.8. Çekme Deneyi.....	15
1.1.9. Elektriksel Özdirenç ve İletkenlik Ölçümleri	16

2. BÖLÜM YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	22
2.1. GİRİŞ	22
2.2. Numunelerin Hazırlanması İçin Deneysel Sistem	22
2.2.1. Vakumlu Eritme Fırını	22
2.2.2. Döküm Fırını	23
2.2.3. Kontrollü Katılaştırma Fırını	23
2.2.3.1. Isıtıcı Sistem	24
2.2.3.2. Soğutucu Sistem	24
2.2.3.3. Sürücü Sistem	25
2.3. Doğrusal Katılaştırma İçin Bir Deneyin Yapılışı.....	27
2.3.1. Numunenin Hazırlanması.....	27
2.3.2. Numune Potasının Yapılması.....	29
2.3.3. Alaşımın Hazırlanması.....	29
2.3.4. Dökümünün Yapılması	29
2.3.5. Metalografik İşlemler.....	30
2.3.6. Numunelerin Parlatılması	31
2.3.7. Mikroyapıların Gözlenmesi	32
2.3.8. Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi	33
2.3.9. Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi.....	33
2.3.10. Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi	33
3. BÖLÜM DENEYSEL SONUÇLAR	35
3.1. Doğrusal Katılaştırılan Numunelerin Mikroyapılarının İncelenmesi	35
3.2. Fazların Kimyasal Bileşimlerinin Belirlenmesi	35
3.3. Mikrosertlik Ölçümleri	46
3.4. Çekme-Dayanım Ölçümleri	47
3.5. Elektriksel özdirenç Ölçümleri	48
KAYNAKLAR	54

1.1. GİRİŞ

Saf metal veya eriyik kristallerin çekirdeklenme ve büyümeleri üzerinde yürütülen çalışmalar, dökümlerle elde edilen malzemelerin yapı ve özelliklerinin anlaşılmasında yeni boyutlar kazandırmıştır. Sıvı fazdan katı faza geçiş ve katı-sıvı arayüzey yapısı üzerine son elli yıldır fizikçiler, malzeme bilimcileri ve özellikle son yıllarda uygulamalı matematikçiler yoğun bir şekilde çalışmaktadırlar. Çok fazlı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar güncelliğini korumakta, yeni teori ve bulgularla çalışmalar sürdürülmektedir. Özellikle ötektik, peritektik ve dendritik formda katılaşma yapısı sergileyen metalik ve kompozit malzemelerin üretimi üzerine çalışmalar hızla devam etmektedir [1-3].

Alaşımların sistemlerinin kontrollü olarak doğrusal katılaştırılması, pratikte tek kristallerin büyütülmesinde, malzemelerin saflaştırılmasında (bölgesel arıtma) ve malzemedeki homojen bileşim elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bu tür katılaştırmaların bazı ticari uygulamaları; yarı iletken kristallerin büyütülmesi, oksit lazer sistemleri, ısıya ve zora dayanıklı savunma sistemleri ve optik uygulamalar için kristallerin büyütülmesidir.

Katılaştırma olayında, katılaştırılan malzemenin bileşimi (C_o), sıcaklık gradyenti (G) ve katılaştırma hızı (V) birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. C_o , G ve V parametreleri "*katılaştırma parametreleri*" olarak bilinir. Bu proje kapsamında hazırlanan numuneler döküm fazında ele alınıp buna bağlı olarak malzemelerin mekanik özellikleri incelenecektir.

Bu bölümde katılaştırma olayının daha iyi anlaşılabilmesi için faz dönüşümlerinde denge durumu, sürücü kuvvet, aşırı soğumalar (altsoğuma) ve çekirdeklenme olayı anlatılacaktır. Daha sonra saf metal ve alaşımların döküm fazında elde edilip mekanik özelliklerinin elde edilmesine geçilecektir.

1.1.1. Faz Dönüşümlerinde Denge

Bir sistemin dengede olması, mekanik, termal ve kimyasal olarak dengede olması demektir. Katı-sıvı arayüzeyi hareket etmediği zaman sistem mekanik olarak dengededir. Arayüzey sabit bir

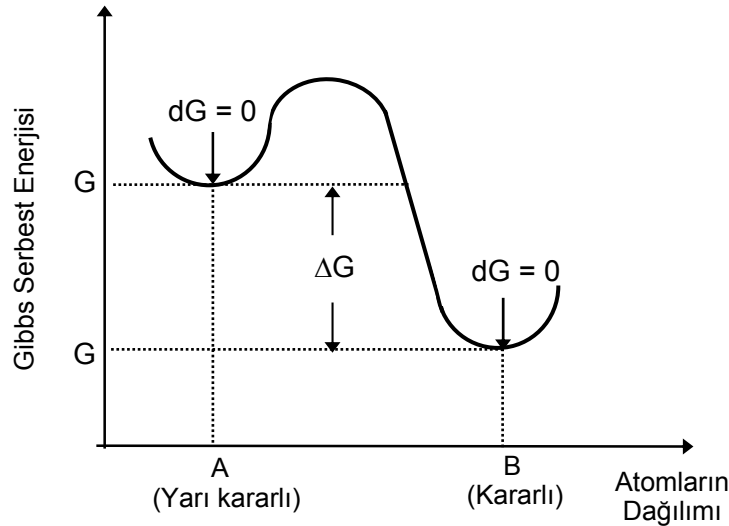
sıcaklıkta tutulduğu zaman ise termal dengededir. Kimyasal denge durumunda ise fazların kimyasal potansiyelleri eşit olmalıdır, yani kütle akışı olmamalıdır.

Sıvı fazın entropisinin büyük olmasından dolayı sıvının Gibbs serbest enerjisi katının Gibbs serbest enerjisinden daha hızlı azalmaktadır. Erime sıcaklığına (T_E) kadar katı fazın serbest enerjisi sıvı fazın serbest enerjisinden daha küçüktür. Bu yüzden katı faz kararlı denge durumundadır. T_E sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ise sıvının serbest enerjisi katının serbest enerjisinden daha küçüktür. Dolayısıyla erime sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda sıvı faz kararlı denge durumundadır. T_E sıcaklığında ise her iki fazın Gibbs serbest enerjileri birbirlerine eşittir. Böylece erime sıcaklığında katı ve sıvı faz birlikte dengede bulunurlar.

Klasik termodinamiğe göre sabit basınç ve sıcaklıkta bulunan yalıtılmış bir sistemin Gibbs serbest enerjisi minimum değerde ise bu sistemin dengede olduğu söylenir. Yani yalıtılmış bir sistemin denge durumu için Gibbs serbest enerjisi matematiksel olarak,

$$(dG)_{T,P} = 0 \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 1.1’de atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjileri verilmektedir.



Şekil 1.1. Atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjisinin değişimi [1]

Şekil 1.1’deki B durumunda sistemin Gibbs serbest enerjisi mümkün olabilecek en küçük değere sahip olduğundan sistem *kararlı denge* durumundadır denir. A durumunda da Gibbs serbest enerjisindeki değişim sıfırdır fakat mümkün olabilecek minimum değerden büyüktür. Bu durumu kararlı denge durumundan ayırt etmek için A noktasına *yarı kararlı denge* durumu denir. Kararlı

denge durumu ile yarı kararlı denge durumu arasındaki geçiş durumlarına ise *kararsız denge* durumları denir [1].

1.1.2. Katılaşmada Sürücü Kuvvet

Bir sıvı erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulursa Gibbs serbest enerjisinde $G = G_l - G_s$ kadar değişme olacaktır (Şekil 1.1). Gibbs serbest enerjisindeki bu azalma katılaşma için gerekli olan sürücü kuvveti sağlar [1]. Katılaşma için gerekli olan serbest enerji değişim miktarı aşağıdaki şekilde elde edilebilir;

Sabit basınçta ΔT sıcaklık aralığında katı ve sıvı fazlar için Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişiminin lineer olduğu kabul edilir. Böylece Gibbs serbest enerjileri,

$$G_k = H_k - T S_k \text{ ve } G_s = H_s - T S_s \quad (1.2)$$

olur. Bu durumda,

$$\Delta G = G_k - G_s = H_k - H_s - T(S_k - S_s) = \Delta H - T\Delta S \quad (1.3)$$

şeklinde elde edilir. Burada k ve s indisleri sırasıyla katı ve sıvı fazları göstermektedir. Saf bir maddenin faz dönüşüm sıcaklığında (yani T_E 'de), $G_k = G_s$ olacağından $\Delta G = 0$ olur. Buna göre denklem (1.3)'den,

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T_E} \quad (1.4)$$

yazılabilir. Burada ΔS erime entropisidir. Sonuç olarak herhangi bir T sıcaklığında Gibbs serbest enerjisindeki değişim (1.3) ve (1.4) denklemlerinden,

$$\Delta G \cong \Delta H - \frac{\Delta H T}{T_E} = \frac{\Delta H (T_E - T)}{T_E} = \frac{\Delta H \Delta T}{T_E} = \Delta T \Delta S \quad (1.5)$$

olarak elde edilir. Denklem (1.5)'e sıvı fazdan katı faza dönüşüm için hacimsel serbest enerji değişimi veya *sürücü kuvvet* denir [1]. Saf maddeler için erime sıcaklığındaki entalpi değişimi erime gizli ısısına eşittir, yani $\Delta H = L$ dir.

1.1.3. Aşırı Soğumalar

Sıvıdan katıya dönüşüm için, bir metalin sıcaklığı dengedeki erime sıcaklığı (T_m)'nin altındaki herhangi bir T sıcaklığına kadar indirmek gerekir. Bu esnada sistemin toplam aşırı soğuması ΔT ile gösterilir ve ifade olarak

$$\Delta T = T_m - T \quad (1.6)$$

yazmak mümkündür. Alaşımlarda ΔT 'nin değeri arayüzey eğrilğine, sıvının bileşimine ve sıvıdan katıya geçen atomların enerji engeline bağlıdır. Yani ΔT bu etkilerden gelen aşırı soğumaların toplamına eşittir. İfade olarak yazarsak,

$$\Delta T = T_m - T = \Delta T_s + \Delta T_c + \Delta T_k \quad (1.7)$$

Burada; ΔT_s sıvıdaki çözünen yayınımdan ileri gelen aşırı soğuma, ΔT_c sıvı-katı arayüzeyinin eğrilğinden ileri gelen aşırı soğuma ve ΔT_k kinetik aşırı soğumadır. Bu aşırı soğumaları şimdi sırayla görelim.

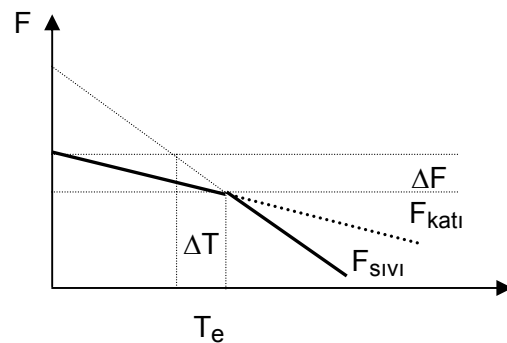
1.1.4. Katılaştırma

Bir fazın başka bir faza göre kararlı olup olmadığı mol başına düşen serbest enerji ile belirlenir ve bu serbest enerji Helmholtz serbest enerjisi olarak ifade edilir.

$$F = E - TS \quad (1.8)$$

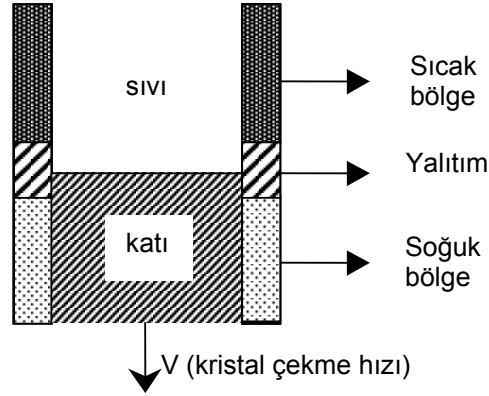
Burada E , fazın iç enerjisidir. Enerjinin miktarına göre atomlar faz değiştirebilirler. Atomlar arasındaki kohesif (yapışıcı) kuvvetler büyüktür ve iç enerji negatiftir. Denklem (1.8)' de ikinci terim sıcaklık (T) ve entropidir (S). Entropi tanım olarak herhangi bir fazdaki atomların sıralanmasındaki düzensizlik ölçüsüdür. Katı bir kristalde atomların termal titreşimlerinden dolayı

Şekil 1.2' de sıcaklık ile bir metalin katı ve sıvı fazlarının serbest enerjilerinin değişimi şematik olarak gösterilmektedir. $T=0\text{ K}$ ' de $F=E$ ve katı atomlar arası kohezyon kuvveti büyük olduğundan dolayı iç enerji küçük olup, bu nedenden dolayı serbest enerjide küçük olacaktır. Sıcaklık artışıyla TS terimi nispeten önemli olmaya başlar ve $S>0$ olduğundan dolayı serbest enerji azalır. Ancak sıvının entropisi katının entropisinden daha büyüktür ve sıvı fazın serbest enerjisindeki azalış artan sıcaklıkla katı fazından daha hızlıdır. Bu nedenden dolayı iki fazın serbest enerji eğrileri denge erime sıcaklığında kesişir. Yüksek sıcaklıklarda ise katı faz, sıvı fazdan daha düşük enerjiye sahip olduğundan katı faz kararlı durumdadır. Eğer sistem dengede ise, sıvı ve katının serbest enerjileri birbirine eşittir [8].



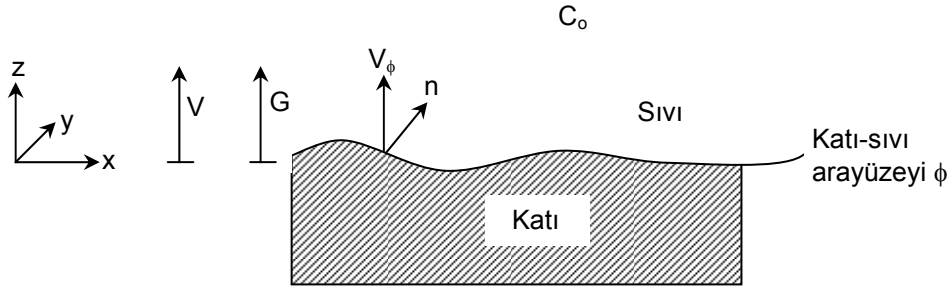
Şekil 1.2. Katı ve sıvı fazların serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi [7].

Bir alaşımın doğrusal katılaştırılmasında, numune sabit sıcaklıktaki sıcak ve soğuk bōlgelerle temas maruz kalarak oluşan sabit sıcaklık gradyentinde yerleştirilir (şekil 1.3). Numune, sabit hızla soğuk bōlgeye çekilerek yada termal dūzeneđin hareketi ile katılaştırılır. Katılaşan malzemenin ōzelliklerini etkileyen mikroyapı parametrelerinin kontrolū, doğrusal katılaştırma yōnteminde mōmkūndūr[10]. Bu nedenle doğrusal katılaştırma teknolojiye ōnemli bir yere sahiptir. şimdi ikili alaşımların doğrusal katılaştırılmasındaki temel bağıntıları ve bu bağıntılar elde edilirken yapılan kabulleri inceleyelim.



Şekil 1.3. Doğrusal katılaştırma [14].

Katı ve eriyik, katılaşmanın gerçekleştiği katı-sıvı arayüzeyi ile ayrılır (Şekil 1.4). Bu durumda, katı ve sıvı fazı için çözünme ve ısı korunumu denklemlerinin ve faz sınırı için yüzey dengesinin ve katılaştırma yüzeyinin ilerleme şeklinin tanımlanması gerekmektedir. Bu tanımlar yapılırken arayüzeyin matematiksel olarak keskin, katı ve sıvı fazlarının eşit yoğunlukta olduğu, katı içerisinde çözünme difüzyonunun ihmal edildiği ve arayüzeyde sıcaklığın sürekli olduğu kabulleri yapılır. Ayrıca tüm fiziko kimyasal katsayıların sabit nicelik olduğu ve katıdaki elastik ve plastik etkilerin ihmal edilebilir derecede olduğu varsayılır. Daha etkili varsayım ise, gerçek deneysel ortamlarda uygulanabilirliği kısıtlı olan, sıvı fazda konveksiyonun olmadığı kabulüdür.



Şekil 1.4. V hızı G sıcaklık gradyentine maruz kalan başlangıç C_0 çözünme konsantrasyonundaki eriyiğin doğrusal katılaştırma şekli [10].

Sabit V hızı ile ilerleyen katılaştırma yüzeyine ilişkin referans sisteminde korunum denklemleri şöyledir;

(a) Katı (k) ve sıvı (s) fazında ısı dengesi:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = D_{th}^i \nabla^2 T_i + V \frac{\partial T_i}{\partial z}, \quad (1.9)$$

burada $i=k$ yada s olabilir, T_i ve D_{th}^i sırasıyla i fazındaki sıcaklık ve difüzyon gücüdür.

(b) Sıvıdaki çözünen dengesi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + V \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (1.10)$$

burada C ve D sıvıdaki çözünen konsantrasyonu ve difüzyon sabitidir.

(c) Arayüzeyde termal akı dengesi:

Katılaştırma yüzeyinde; ısı korunum denklemi, sıvı ve katıdaki normal sıcaklık gradyentleri ile bölgesel erime gizli ısının oluşumu ile ilgilidir;

$$\left[K_k \vec{\nabla} T_k - K_s \vec{\nabla} T_s \right]_{\phi} \cdot \hat{n} = L \vec{V}_{\phi} \cdot \hat{n}, \quad (1.11)$$

burada L birim hacimdeki erime gizli ısı, $\vec{V}_{\phi}$ ve $\hat{n}$ faz sınırından sıvıya yönelmiş büyüme hızı ve yüzey normali, K_k ve K_s ise sırasıyla katı ve sıvının termal iletkenliğidir. İlgili niceliklerin katılaştırma yüzeyinde değerlendirilmesi gerektiğinden ϕ indisi kullanılmıştır.

(d) Arayüzeyde çözünen akı dengesi:

Çözünen korunumu, katılaştırmada eriyiğe serbest bırakılan çözünen ($k < 1$) yada çözücü ($k > 1$) difüzyonla sıvıya taşınmasını gerektirir,

$$[C_k - C]_{\phi} \vec{V}_{\phi} \cdot \hat{n} = D [\vec{\nabla} C]_{\phi} \cdot \hat{n}, \quad (1.12)$$

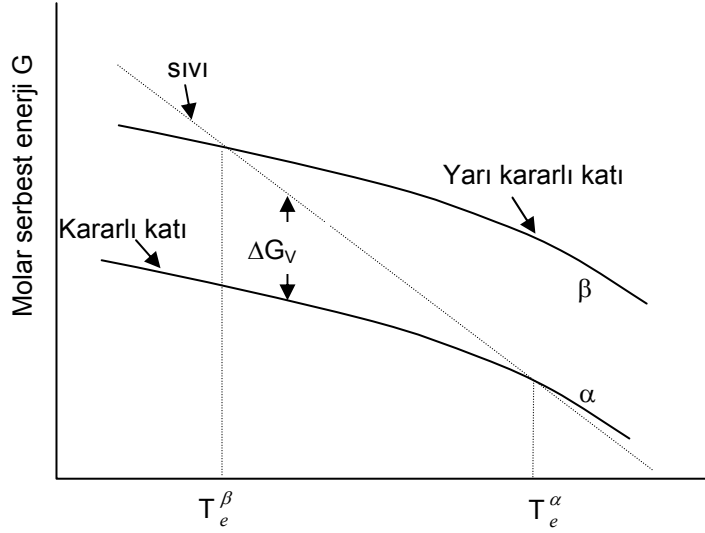
burada C_k katıdaki çözünen konsantrasyonudur.

1.1.5.1. Saf Metallerin Katılaştırılması

İlk olarak dengedeki saf metali ele alalım. Bir saf metalin sıvı-katı fazlarının sıcaklık ile serbest enerji değişimleri şekil 1.5’ de gösterilmektedir. Düşük serbest enerjiye sahip fazda belirli sıcaklık bölgesinde (katının sıcaklığı $< T_e$ ve sıvının sıcaklığı $> T_e$) katı ve sıvı faz bir arada dengede ise serbest enerjileri eşit olup bu iki fazın sıcaklıkları dengesel erime sıcaklığı (T_e)’ dir. Bu dengesel erime sıcaklığı (T_e)’ nin basınca göre değişimini veren bağıntıya “Clapeyron eşitliği” adı verilir.

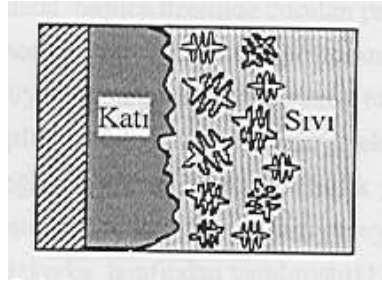
$$\frac{\Delta T_e}{\Delta P} = T_e \frac{\Delta V}{\Delta H} \quad (1.13)$$

Burada, ΔP basınçtaki değişimi, ΔH , entalpideki değişimi, ΔT_e , basınç değişiminden ileri gelen sıcaklık değişimi, ΔV ise, sıvı ve katı fazları arasındaki molar hacim farkıdır [11]. Eriyik metalin çok yavaş soğutulması durumunda, bütün metalde sıcaklık üniform şeklinde ise, katılaşma bölgesinin tam ortasındaki bir noktada katılaşma başlar ve çekirdekler sıvı içine dağılır. Her bir çekirdek tercihli bütün yönlerde büyüyerek irileşir ve sonuçta eşeksenli dendritik tane yapısını oluşturur.



Şekil 1.5. Saf metalin sıvı-katı fazlarının sıcaklık ile serbest enerji değişimleri[4].

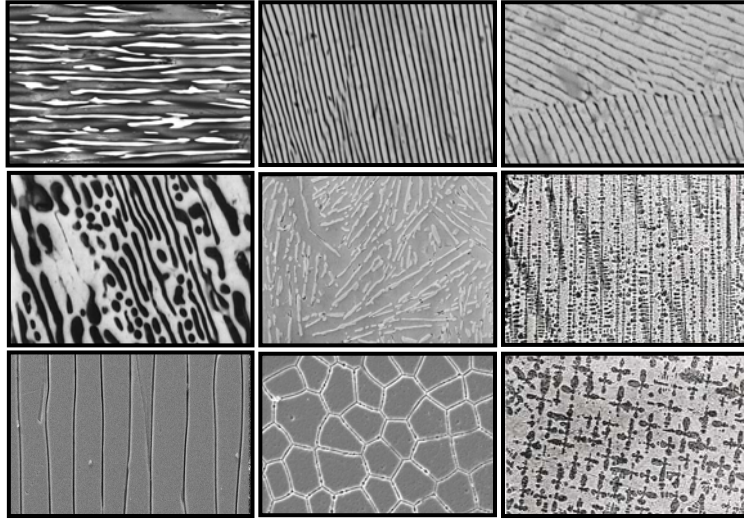
Eğer sıvı tamamen üniform şeklinde hızlı bir şekilde soğutulursa, aşırı soğuma büyük olacak ve eriyikte çok daha fazla çekirdek oluşacaktır. Şekil 1.6' de bu durumdaki eşeksenli dendritik tane yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Saf metallerin katılaştırılmasında olduğu gibi değişik bileşimdeki alaşım sistemlerinde doğrusal olarak katılaştırılabilmektedir.



Şekil 1.6. Eşeksenli dendritik tane yapısı

1.1.5.2. Alaşımların Katılaştırılması

Metaller ve metalik alaşımlar daha fazla işlenebilirlik (ısıl işlem, haddelenme, dövülme vs.) iyi ısıl ve elektriksel iletim özelliğine sahiptir. Mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan ve üzerinde durulan malzemeler alaşım sistemleridir. Malzemelerin mikroyapılarındaki değişiklikler (tanecik büyüklüklerinin) malzemenin fiziksel özelliklerini (başta mikrosertlik özelliklerini, H_V) ve diğer özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Malzemenin mikroyapı parametreleri (λ_E , λ_1 , λ_2 , R ve d) bu malzemelerin katılaştırılması esnasındaki katılaştırma parametrelerine yani sıcaklık gradyenti G , katılaştırma hızı V ve alaşımın bileşimi C_o 'a bağlıdır. Katılaştırma parametreleri G , V ve C_o birbirinden bağımsız kontrol edilerek malzemelerin tanecik boyutundaki mikroyapılarına ve mekanik özelliklerine (mikrosertlik) etki etmek kontrollü (doğrusal) katılaştırma yöntemi ile mümkündür. Bu yöntem ile değişik malzemelerden elde edilen farklı mikroyapı şekilleri Şekil 1.7'de verilmiştir.

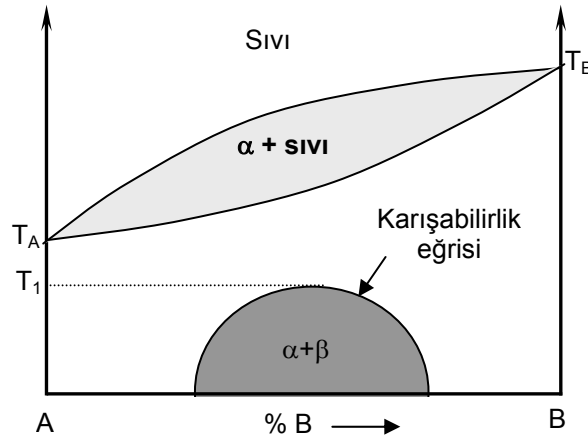


Şekil 1.7. Değişik malzemelerde gözlenen mikroyapılar

Bir alaşım sistemi, iki veya daha fazla elementin belirli bir sıcaklık, basınç ve bileşimde eritilmesiyle elde edilen yeni bir katı çözeltilidir. Alaşımlar, alaşım tipine bağlı olarak kendisini oluşturan elementlerin özelliklerini taşıyabileceği gibi, bu elementlerin özelliklerinden başka yeni özellikler de taşıyabilirler. Örneğin saf bir metale alaşım elementi ilave edilerek, onun mekanik özellikleri büyük ölçüde geliştirilebilmektedir [5]. Alaşımlar, kendisini oluşturan elementlerin birbiri içerisindeki karışımına göre tek fazlı ve çok fazlı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Heterojen bir sistemin fiziksel sınırlarla ayrılmış olan kısmına *faz* denir. Birbiri içerisinde her oranda homojen olarak karışabilen alaşımlar, tek fazlı alaşımlardır. Böyle bir alaşım sistemindeki, alaşım elementlerinin örgü sistemlerinde bir değişiklik olur ve alaşım elementinden birinin atomları

diğerinin kristal örgüsüne yerleşir. Yeni örgüde farklı özelliklere sahip atomların bulunmasından dolayı farklılıklar oluşur ve yeni bir malzeme ortaya çıkar. Çok fazlı alaşımlarda, alaşımı oluşturan elementlerin baskın özellikleri görülür ve örgü yapılarında bir değişiklik olmaz [6,7].

Endüstride kullanılan metalik sistemler, yüksek sıcaklıklarda birbirini her oranda eritebilmelerine rağmen, düşük sıcaklıklarda sınırlı oranda eritebilmektedirler. Şekil 1.8’de ikili bir alaşım sistemine ait faz diyagramı verilmektedir. Faz diyagramından da görüldüğü gibi alaşım sistemi, sıvı halden soğutulmaya başlatıldığında, önce katı çökelti oluşmasıyla α fazı meydana gelmektedir. Daha sonra sıcaklık T_1 ’e düşürüldüğünde α fazı B atomlarınca zenginleşmekte ve bu sıcaklığın altında B atomlarının fazlası β fazı şeklinde çökelererek, α ve β fazlarını oluşturmaktadır.



Şekil 1.8. Birbirini sınırlı oranda eriten ikili sistemlerde denge faz diyagramı [7]

Katılaştırma yapılarına göre alaşımların (organik, metalik, komposit vs.) katılaşmasını

(a) Düzlemsel cephede katılaştırma (b) Hücreli katılaştırma (c) Dendritik katılaştırma

üç kısımda inceleyebiliriz. Ancak malzemenin fazına ve bileşimine bağlı olarak ötektik ve peritektik katılaştırma yapılarında oluşmaktadır.

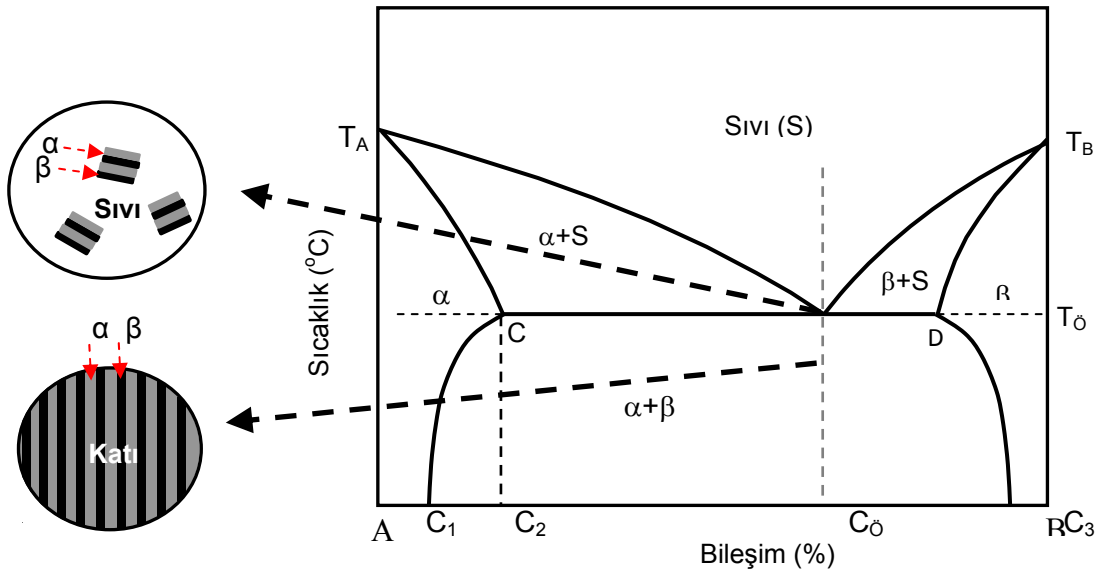
1.1.6. Alaşımların Ötektik Katılaşması

“Ötektik” kelimesi, Yunancada kolay eriyen anlamına gelmektedir. Ötektik bölge, bir alaşım sisteminde α , β ve γ gibi katı fazlar ile sıvı fazın dengede olduğu üçlü bölgedir. Şekil 1.9’daki ikili faz diyagramında ötektik bölge gösterilmektedir. Bu noktadaki sıcaklığa *ötektik sıcaklık*, bileşime de *ötektik bileşim* denir. Ötektik alaşımı oluşturan iki bileşenli sistemlerde, bileşenler birbirinin

erime sıcaklıklarını düşürür ve ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda iki farklı katı faza dönüşür. Dolayısıyla ötektik reaksiyon,



şeklinde ifade edilir [11]. Bu tür reaksiyona sahip sistemlerde *ötektik sistemler* denir. Bu reaksiyon esnasında iki katı faz yan yana gelerek şekillenir ve ötektik yapı oluşur [12]. Ötektik yapının oluşumu, katılaşma hızı, sıcaklık gradyenti ve alaşımın bileşimine göre değişim gösterir. Şekil 1.9'de iki bileşenli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve katılaşma yapısı görülmektedir.



Şekil 1.9. İki bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu [16]

Şekil 1.9'da verilen faz diyagramındaki sembollerden C_0 ; ötektik bileşim, T_0 ; ötektik sıcaklık, T_A ve T_B ; A ve B bileşenlerin saf haldeki erime sıcaklıkları, C_1 ; oda sıcaklığında B metalinin α fazındaki erime sınırı, C_2 ; B metalinin α fazındaki en yüksek erime sınırı, C_3 ; A metalinin β fazındaki en yüksek erime sınırı anlamına gelmektedir. Faz diyagramında gösterilen C_E ötektik bileşimindeki alaşım sistemi, sıvı halden soğuyarak, T_E ötektik sıcaklığa geldiğinde, ötektik reaksiyon sonucu α ve β fazları oluşur. Bu dönüşüm sırasında α ve β kristalleri yan yana, sık ve ince tabakalar halinde büyür ve katılaştırma şartlarına bağlı olarak ötektik yapı oluşur [9].

1.1.7. Sertlik

Malzemelerin sertliğinin ölçülmesi endüstride büyük önem taşır. Sertlik, dayanım ve aşınma direncine bağlı bir özelliktir. Bir malzemenin yüzeyine batırılan bir cisme, malzemenin gösterdiği dirence o malzemenin *sertliği* veya *mikrosertliği* denir.

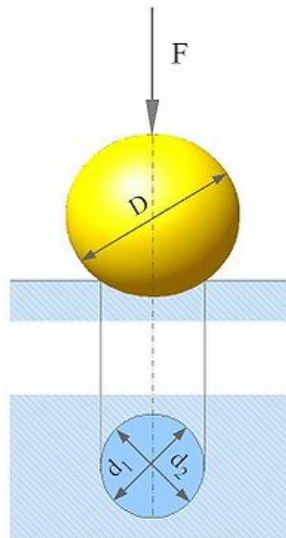
Bir malzeme ne kadar sert ise dayanımı o kadar yüksek ve aşınma direnci o kadar fazladır. Makine elemanlarında kullanılan malzemelerin ömrü, sertlikleriyle yakından ilişkilidir. Ayrıca, sert malzemelerin içyapıları düzensiz ve stresli olduğundan, elektriksel iletkenlikleri de düşüktür. Bu bakımdan malzemelerin sertlikleri ile elektriksel iletkenlikleri arasında yakın bir ilişki vardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan dört çeşit sertlik ölçme yöntemi vardır [13]. Bunlar,

- (a) Brinell sertlik ölçme yöntemi,
- (b) Rockwell sertlik ölçme yöntemi,
- (c) Knoop sertlik ölçme yöntemi,
- (d) Vickers sertlik ölçme yöntemidir.

1.1.7.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi

Bu yöntemde batıcı uç olarak sertleştirilmiş çelik küre veya tungsten karbür kullanılmaktadır. Kullanılacak kürenin çapı numune kalınlığına ve malzemenin şekline göre seçilir. Yükün uygulanma süresi 10-15 saniyedir. Sertliği ölçülecek numune üzerine batırılan çelik küre, hacmi nedeni ile numune üzerine küresel iz bırakır. Şekil 1.10'da Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi verilmiştir.

Şekil 1.10. Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi



Numune üzerindeki izin alanı hesaplanarak, Brinell sertlik (H_B) değeri;

$$H_B = \frac{\text{Uygulanan yük (kgf)}}{\text{İz yüzeyi (mm}^2\text{)}} \quad (1.14)$$

$$H_B = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{kgf} / \text{mm}^2) \quad (1.15)$$

bağıntısı ile bulunur [20]. Burada F ; numuneye uygulanan yük, D ; baskı küresinin yarıçapı, d ; numune üzerinde oluşan izin çapıdır.

1.1.7.2. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi

Rockwell sertlik ölçme yönteminde, *standart cihaz* ve *yüzeysel cihaz* olmak üzere iki tip sertlik ölçme cihazı kullanılmaktadır. Standart cihazda, 60, 100, 150 kg'lık kütleler kullanılır. Batıcı uç olarak, sert malzemeler için uç kısmında tepe açısı 120° olan, 0.2 mm çapında yuvarlaklaştırılmış elmas koni kullanılırken, yumuşak malzemeler içinde 1/16" (~1.59 mm) çapında sertleştirilmiş çelik bilye kullanılmaktadır. Yüzeysel cihazlar çok ince ve yumuşak malzemeler için kullanılmakla beraber, sertlik ölçümünde 15, 30, 45 g'lık kütleler kullanılır. Uç olarak standart cihazlarda kullanılan çelik bilyeler ve elmas koni yüzeysel cihazlarda da kullanılmaktadır. Rockwell yönteminde sertlik, numuneye batan ucun meydana getirdiği derinlik esas alınarak bulunmaktadır.

Sertlik ölçme cihazının hassasiyeti kontrol edildikten sonra sertliğini ölçmek istediğimiz malzemeye uygun ağırlık ve uç seçilir. Uç, malzemeye önce 10 kg'lık bir kütle ile yük uygulanır. Ön yükleme ile öncelikle malzemeye temas sağlanır. Böylelikle sertlik ölçümünde ön yükleme ile bir başlangıç noktası tespit edilmiş olur. 10 kg'lık yüklemeden sonra cihazın ibresi sıfıra ayarlanarak kalan ağırlıklar yüklenir. Bu durumda ucun, sertliği ölçülen numuneye batması beklenir. Bir süre sonra son yüklenen ağırlık kaldırılarak sertlik değeri göstergeden okunur. Sertlik ölçümünde uç, numuneye ne kadar derin batarsa numunenin o kadar yumuşak olduğu anlamına gelir [13].

1.1.7.3. Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi

Mekaniksel sertlik ölçme yöntemlerinden biri olan Knoop sertlik ölçme yöntemi, özellikle çok ince ve kırılgan malzemelerin mikrosertlik değerlerinin ölçülmesinde kullanılır. Bu yöntemde amaç, sertliği ölçülecek numune üzerinde sadece küçük bir iz bırakılmasıdır. Bir piramit elmas uç, belirli

bir kuvvet ve süre kadar uygulanır. Sonuçta numune üzerinde ancak mikroskopla okunabilecek bir iz oluşur. Knoop sertliği H_K veya KHN ile gösterilir ve aşağıdaki formülle ifade edilir;

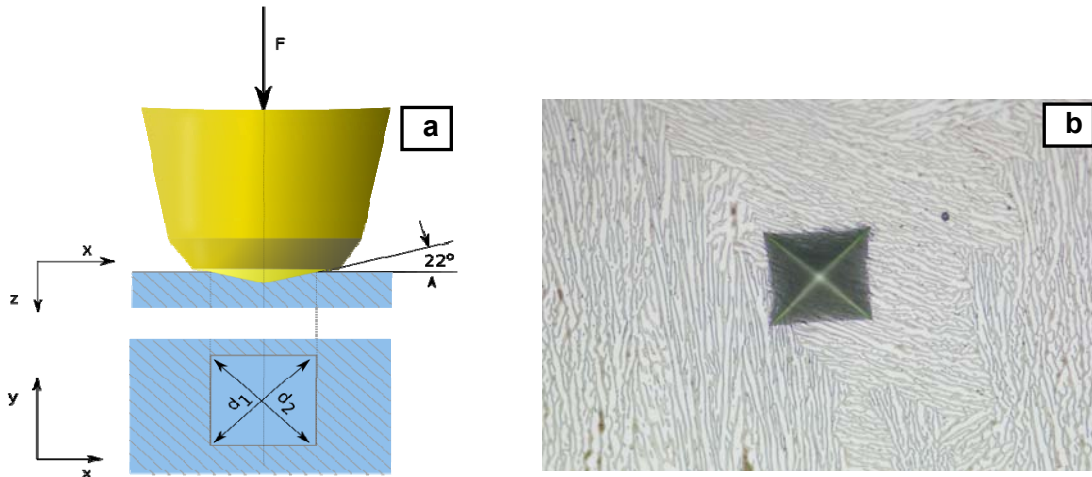
$$H_K = \frac{\text{Uygulanan Yük}}{\text{İz Alanı}} = \frac{P}{C_p L^2} \quad (\text{kgf} / \text{mm}^2) \quad (1.16)$$

Burada L ; numune üzerindeki izin eksenel uzunluğu, C_p ; düzeltme faktörü (izin şekline bağlıdır ve genellikle 0.070279 değeri kullanılır) ve P ; uygulanan yük miktarıdır.

H_K genellikle 100'den 1000'e kadar değişen sertlik değerlerini alır. Bu metotla çok küçük boyutlu malzemelerin bile mikrosertlik değerleri ölçülebilmektedir. Bununla beraber numune üzerinde oluşturulan izin boyutu ölçülürken mikroskobun kullanılmasının zor olması, numuneyi hazırlama ve iz uygulama işlemlerinin zaman alması bu metodun zorluklarındandır [13].

1.1.7.4. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi

Vickers sertlik ölçümünde kullanılan uç, yüzeyleri arasında 136° açı bulunan bir elmas piramittir. Darbelere karşı daha hassas olduğundan en sert malzemeler bile bu metotla ölçülebilir. Uygulanan yük 10 g ile 1000 g arasında değişmektedir. Uç, numuneye belli bir kuvveti 5-30 saniye kadar uygulayarak, numune üzerinde kare şeklinde iz oluşturur. İzin köşegen boyutları (d), cihaz mikroskobundan okunarak belirlenir. Şekil 1.11'de Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi ve batıcı ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 1.11. (a) Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi, (b) Batıcı ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin fotoğrafı

Vickers sertliği (H_V), Brinell sertliğine benzer şekilde, uygulanan kuvvetin iz alanına bölünmesi ile belirlenir.

$$H_V = \frac{2F \sin(\theta / 2)}{g \cdot d^2} \quad (\text{kgf} / \text{mm}^2) \quad (1.17)$$

Burada, F ; uygulanan yük, g ; yer çekim ivmesi, d ($d^2 = d_1 \cdot d_2$); izin alanıdır. Vickers sertliği ile çok ince bölge veya tabakaların bile sertliği hassas bir şekilde ölçülebildiğinden, bu metotla ölçülen sertlik değerleri, mikrosertlik olarak da bilinir [21].

1.1.8. Çekme Deneyi

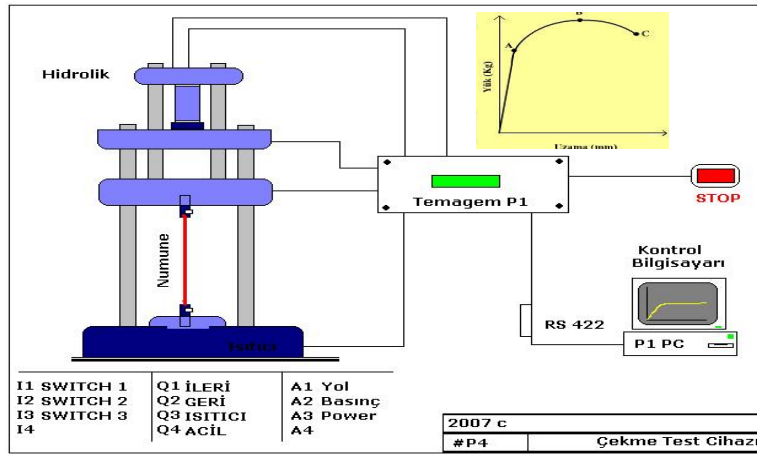
Çekme deneyi, malzemelerin statik yük altındaki mekanik özelliklerini belirlemek ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak amacıyla uygulanan, mühendislik açısından çok önemli bir mekanik deneydir. Deney, mekanik özellikleri belirlemek amacıyla bir deney parçasının, genellikle kopuncaya kadar, gerilmesini kapsar. Belirlenecek mekanik özellikler:

- a) Elastisite katsayısı
- b) Elastiklik sınırı
- c) Rezilyans
- d) Akma gerilmesi
- e) Çekme dayanımı (Maksimum gerilme)
- f) Uzama (%)
- g) Kesit daralması (%)

Elastisite katsayısı (E): Gerilme (σ) ile birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişkiyi belirleyen malzemenin temel özelliği olan sabit.

$$\sigma = E \epsilon$$

Elastiklik sınırı: Elastik şekil değişiminin görüldüğü en yüksek gerilme değerine denir. Rezilyans (u_r): Elastik şekil değişimi esnasında numunenin depoladığı enerji anlamına gelir. Bu enerji, gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin altında kalan alana eşittir. Deney numunenin kırılması ile sonuçlanırsa bu enerji geri verilir. Çekme deneyine tabi tutulan numunenin yukarıda belirtilen özelliklerin sıhhatli bir şekilde ortaya çıkarılabilmesi için, alındığı malzemeyi tam olarak temsil edebilmesi gerekir.



Şekil 1.12. Çekme deneyi düzeneği

1.1.9. Elektriksel Özdirenç ve İletkenlik Ölçümleri

Elektriksel yüklerin herhangi bir etki ile bir yönde veya her iki yöndeki hareketi elektriksel iletkenlik olarak tanımlanır. Elektriksel iletkenlik hareketli taneciklere göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırmada hareketli tanecikler elektronlar ise elektronik iletkenlik, iyonlar ise iyonik iletkenlik, her iki tanecik türününse hareketli olduğu iletkenlik türü karma iletkenlik olarak tanımlanmıştır. Bu durumda iletkenlik üçe ayrılır ve Tablo 1.1’de verilen şekilde gruplandırılır;

Tablo 1.1. Elektriksel iletkenliğin sınıflandırılması.

Elektriksel İletkenlik		
Elektronik İletkenlik	İyonik İletkenlik	Karma İletkenlik
Metalik İletkenlik (Au, Cu gibi)	Katı Elektrolitler (Zirkonyum tabanlı katı elektrolit gibi)	(δ -Bi ₂ O ₃ Fazı)
Yarıiletkenlik (Si, Ge, Polimer gibi)	Süper İyonik İletkenlik (SrF ₂)	
Süper İletkenlik (Hg, Al, MgB ₂ gibi)	Hızlı İyon İletkenliği (Tl ₃ Cu ₂ Cl ₅)	

Bir malzemenin elektrik iletimi iyonik ya da elektronik mekanizmalardan biri ile olur [14]. İyonik ve elektronik iletkenliğe sahip malzemelerin iletkenlik aralıkları Tablo 1.2’de verilmiştir. Yarıiletkenlik, süperiletkenlik ve metalik iletkenliği içine alan elektronik iletkenliğin dışında diğer bir iletkenlik türü iyonların hareketine bağlı olan iyonik iletkenliktir. İyonik iletkenlik özellikle O⁻²,

N^{-3} , Cl^{-} , B^{-2} gibi anyonlar veya H^{+} , Na^{+} , Li^{+} gibi katyonların hareketleri ile görülür [14]. İyonların (katyon veya anyon) kristal örgüde hareket etmeleri (göç etmeleri) ile gerçekleşen iletkenliğe *iyonik iletkenlik*, bu tür iletkenliğe sahip katılarda ise *katı elektrolit* denir.

Yalnızca yüksek sıcaklıkta atomların termal enerjilerinin yüksek olduğu ve örgü kusuru konsantrasyonunun çok yüksek sayılara ulaştığı yerlerde bu tür iletkenlik fark edilebilir. NaCl, MgO gibi çoğu kristal malzemeler düşük iyonik iletkenliğe sahiptir. Çünkü atomlar termal titreşimlerine rağmen örgü noktalarından ayrılamazlar. Bunun tersi olarak, çoğu katı elektrolit malzemeler yüksek iyonik iletkenliğinden dolayı hızlı iyonik elektrolit ya da süper iyonik elektrolit olarak sınıflandırılırlar.

Tablo 1.2. Malzemelerin elektriksel iletkenlik değer aralıkları.

Malzeme		İletkenlik ($\Omega \text{ cm}$) ⁻¹
İyonik İletkenlikler	İyonik Kristaller	$< 10^{-16} - 10^{-2}$
	Katı Elektrolitler	$10^{-1} - 10^3$
	Sıvı Elektrolitler	$10^{-1} - 10^3$
Elektronik İletkenlikler	Metaller	$10^3 - 10^7$
	Yarıiletkenler	$10^{-3} - 10^4$
	Yalıtkanlar	$< 10^{-10}$

Genel olarak kristal içinde iyonik iletkenliğin ortaya çıkması için şu şartlar gereklidir; *i)* Tek tip iyonların çoğu hareketli olmalıdır, *ii)* Hareketli iyonların atlayabilmesi için çok sayıda boş örgü noktaları olmalıdır, *iii)* İki komşu örgü noktası arasında atlamanın olabilmesi için düşük bir aktivasyon enerji engeline sahip örgü olmalıdır.

Bazı iyonik katılar yapılarında, bir elektrik alan içinde iyonların göç etmesine izin veren noktasal örgü kusurları içerirler. Bu örgü kusurları yük taşıyıcılar olarak görev alırlar. Örgüdeki kusurlardan iyonun hareketi ile iyonik iletkenlik gerçekleşir. İyonik iletkenlik için iyonların bir ya da daha fazla tipinin malzeme boyunca iletilmesi gerekir. Düşük sıcaklıklarda, bir iyonun örgü içinde hareket etmesi için küçük bir alan vardır. Bu alan sadece atomların, bulundukları nokta civarında titreşimi için yeterlidir. İyonların örgü içindeki hareketine örgü çeşitli kısıtlamalar getirir ve hareket rastgele olmaz. Ancak sıfırdan farklı bir sıcaklıkta örgüde kusur meydana getirilirse iyonlar hareket edebileceklerdir. Sıfır sıcaklıkta sistemin serbest enerjisi potansiyel enerji tarafından baskılanır. Sıcaklık artırıldıkça sistemin düzensizliğinin derecesi olan entropinin artmasından dolayı sistemin

serbest enerji dağılımı oldukça belirginleşir. Tablo 1.3'te alışımlarda sıkça kullanılan bazı metalik malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri azalan sıralanışa göre verilmiştir.

Tablo 1.3. Alaşımlarda kullanılan bazı malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri [15].

Malzeme	Sembolü	Elektriksel İletkenlik ($\times 10^7 (\Omega \text{ m})^{-1}$)
Gümüş	Ag	6.3
Bakır	Cu	5.96
Altın	Au	4.52
Alüminyum	Al	3.77
Magnezyum	Mg	2.26
Tungsten	W	1.89
Molibdenyum	Mo	1.87
Kobalt	Co	1.72
Çinko	Zn	1.66
Nikel	Ni	1.43
İndiyum	In	1.16
Lityum	Li	1.08
Demir	Fe	0.993
Platin	Pt	0.966
Kalay	Sn	0.917
Krom	Cr	0.774
Kurşun	Pb	0.481
Uranyum	U	0.38
Antimon	Sb	0.288
Titanyum	Ti	0.234
Neodyum	Nd	0.157
Cıva	Hg	0.104
Bizmut	Bi	0.0867
Plutonyum	Pu	0.0666
Karbon	C	0.0061
Germanyum	Ge	1.45×10^{-7}
Silikon	Si	2.52×10^{-11}
Selenyum	Se	1.0×10^{-11}
Bor	B	1.0×10^{-11}

Sistem artan serbest enerjiyi en aza indirmek ve kararlılığını artırmak için en düşük düzeyde örgü boşluklarına sahip olmalıdır. Bu durum hareketli taneciklerin sürekli örgü kusurlarından hareketi ile gerçekleştirilir [15]. Taneciklerin bu hareketi bir elektrik alan ile yönlendirilerek iletkenlik meydana getirilir. Katı haldeki malzemenin iletkenliği, yük taşıyıcıların konsantrasyonu, kristalin

sıcaklığı, iyonun örgü içinde hareket edebilirliği, kristal içindeki kusurun miktarı gibi özelliklerden etkilenir. Örgüde boşluk kusurları normalde iki metotla meydana getirilir. Bunlardan biri kristalin ısıtılması sonucunda meydana gelen örgü kusurlarıdır. Bir diğer yolu ise safsızlık katkılamaaktır. Sıcaklık ve safsızlık iyonik iletkenliği büyük oranda etkiler. Safsızlık katkılanmış bileşiklerde yüksek sıcaklıkta bu iki etki de iletkenlikte rol oynar. Düşük sıcaklıklarda, elektriksel iletkenlik oldukça azdır. Bu durumda safsızlık etkisi ile meydana gelen kusurlar daha baskındır. Ancak yüksek sıcaklıklara çıktıkça sıcaklık etkisiyle oluşan kusurlar artacağından katı, karışık tip örgü kusur içermeye başlar. Bu durumda gözlenen iletkenlik türü karışık tip iletkenliktir. Elektriksel iletkenliğin artmasının ana nedeni kristal örgüde oluşan örgü kusurlarıdır [15].

Elektriksel iletkenlik ve öz direnç (dirençlilik) bir malzemenin karakteristik özelliğidir. Bir numunenin elektriksel iletkenliğinin belirlenebilmesi için ölçülen voltaj ve akım şiddeti, hesaplanan öz direnç değeri ile numunenin geometrik yapısı arasındaki ilişki kullanılır. Bu nedenle öz direncin hesaplanmasında kullanılan Ohm Kanunu;

$$\frac{V}{I} = R \quad (1.18)$$

eşitliğine, geometrik yapıya bağlı olan bir düzeltme faktörü (resistivity correction factor) değeri ilave edilerek öz direnç hesaplanır. Bu düzeltme katsayısı numunenin kalınlığına ve geometrik yapısına, yüzey büyüklüğüne, numune kenar sınırlarının yapısına, kontakların numune üzerinde bulunduğu konuma ve kontakların düzenine bağlı olarak değişir [16].

Malzemelerin öz dirençlerinin belirlenebilmesi için numune içinde elektrik alan oluşturacak bir akım kaynağına, bu elektrik alan nedeniyle numune içinde meydana gelen I elektrik akımının şiddeti ve keyfi seçilen herhangi iki nokta arasında meydana gelen V potansiyel düşmesinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bir maddenin elektriksel öz direnci, maddenin üzerinden geçen I akımı ve bunun meydana getirdiği V geriliminin oranı ile bulunur [17].

İki iletken kontak tel ile yapılan elektriksel iletkenlik ölçüm yöntemine *iki nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçümü* denir. Burada direncin belirlenebilmesi için V ve I değerinin doğrudan ölçülmesi yeterlidir. Bu yöntemle yapılan direnç belirleme ölçümünde elde edilen R değeri ileride de belirteceğimiz şartlara bağlı olarak kontakların direncini de içerir. Bu durumda elde edeceğimiz R direnci ve buna bağlı elde edilen ρ elektriksel öz direnç değeri sadece numuneye ait olmayacaktır [18,19].

Direncin elde edilmesi numunenin öz direncinin belirlenmesini sağlar. Homojen bir numunenin elektriksel öz direnci belirlenmek istendiğinde malzemenin geometrik özelliklerindeki bilinmesi gereklidir. Elektriksel öz direnç ifadesi aşağıdaki şekilde verilebilir [16].

$$\rho = \frac{V}{I} G \quad (1.19)$$

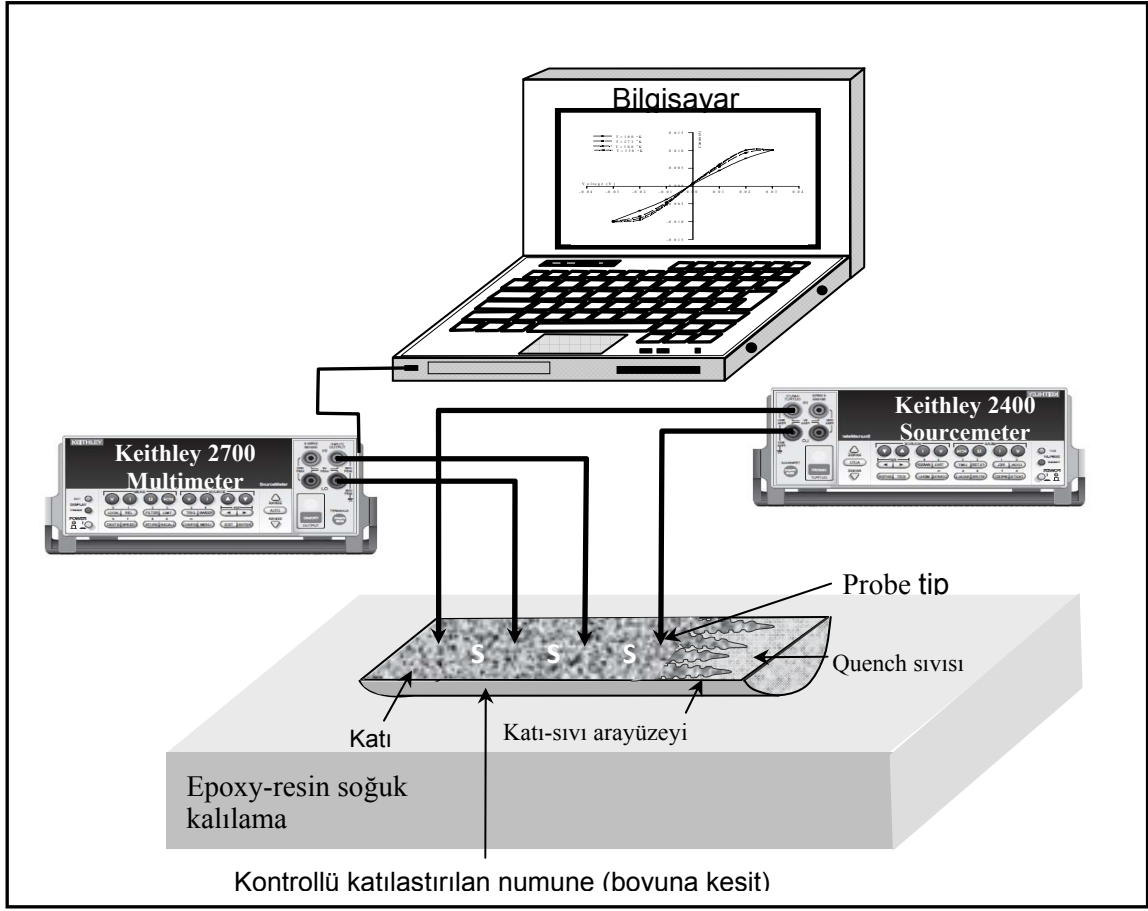
Burada G ; numunenin yüzey geometrik sınırlarını ve kalınlığını, elektriksel kontakların numune üzerindeki konumlarını, kontakların diziliş düzenlerini içeren bir katsayıdır ve “*Geometrik Düzeltme Katsayısı / Faktörü*” (Resistivity Correction Factor, RCF) olarak tanımlanır.

İki nokta (d.c.) elektriksel ölçüm yöntemi ile elde edilen $R_{toplaml}$ direnç değeri numunenin direncinin dışında başka ek dirençleri de içerir. Bu ek dirençler iletken telin (R_{tel}), numuneye akımı aktaran iğne uçların (prob, pin) (R_{prob}), gerekirse problemleri numuneye tutturarak iletken lehimin (R_{pasta}), kontak ucu ve numune temas ara yüzeyinin dirençlerinin (R_{kontak}) toplamıdır. Bu nedenle numunenin hesaplanan ρ öz direnci olması gerekenden daha yüksektir.

Numuneye kontak olarak kullanılan iletken teller genel olarak iki parçalıdır ve bu da iki farklı dirençli kontak kullanmak demektir. Bu kontakların bir kısmı, ölçüm cihazlarına bağlı olan iletken tel kablolar ve diğer kısmı da bu kabloların numuneye temas eden uç kısımları olan problemlerdir. Problemler genelde ihtiyaca uygun farklı metallerden yapılır. Bunun nedeni numunenin cinsine göre numuneye sert ve sağlam temasın sağlanmasıdır. Bu gibi durumlardan dolayı sadece numunenin direncini belirleyen bir direnç ölçme tekniği daha uygun olacaktır. Bu durum özellikle kontak direnci numune direncine oranla yüksek olan iyi iletkenlerin ve yarıiletkenlerin öz direncinin belirlenmesinde ortaya çıkar.

Elektriksel iletkenliğin ölçümünde kullanılan diğer bir yöntem olan *dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik* ölçme tekniğinde, kullanılan kontakların dirençleri ölçümde hesaba girmez ve hesaplanan değer sadece numunenin öz direncidir. Bu amaçla kurulan düzenekte kontaklardan ikisi numune üzerinden akan akımı ölçmek için, diğer ikisi ise herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı ölçmek için kullanılır. Şekil 1.13’de görüldüğü gibi 1.ve 4. problemlerden akım, 2. ve 3. problemlerden ise potansiyel fark ayrı ayrı ölçüldüğü için iki nokta iletkenlik ölçüm tekniğindeki gibi kontak dirençleri, ölçüme doğrudan dahil olmaz. Yine bu sistemde de kontak direnci söz konusudur ama ölçümün sonucunu çok az etkileyeceğinden ihmal edilebilir. Kontakların aynı doğrultuda dizilmeleri en avantajlı ölçüm şekli olacaktır. Bu durumda G faktörünün belirlenmesi ve hesabı daha kolaydır. Burada s ardışık kontaklar arası mesafedir (Şekil 1.13). Böyle bir ölçüm düzeneğinde

yukarıda yer alan ρ öz direnç denklemindeki G katsayısı numune geometrisine, kontakların numune üzerindeki



Şekil 1.13. Dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm sistemi

konumuna ve kontaklar arası s mesafesine bağlıdır.

$$\rho = \frac{V_{23}}{I_{14}} G \quad (1.20)$$

Uygulamada genel olarak yapılan kontak dizilişi $s_{12} = s_{23} = s_{34} = s$ olan eşit aralıklı düzendir. Bu ölçüm tekniğinde elektriksel öz direnç denklemi yukarıda verilenden farklı olmamakla beraber yukarıdaki şekildedir.

2. BÖLÜM YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, Al-ağ.%33Cu ötektik alaşımına yapılan katkılama ağ.% 2x (x= Co, Si, Ni, Sb ve Bi) metalleri ile hazırlanması ve numune kalıplarına doldurulmasında vakumlu eritme fırını ve döküm fırını kullanılmıştır. Bu bölümde, yapılan deneysel aşamaların detayları verilmiştir.

2.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI İÇİN DENEYSEL SİSTEM

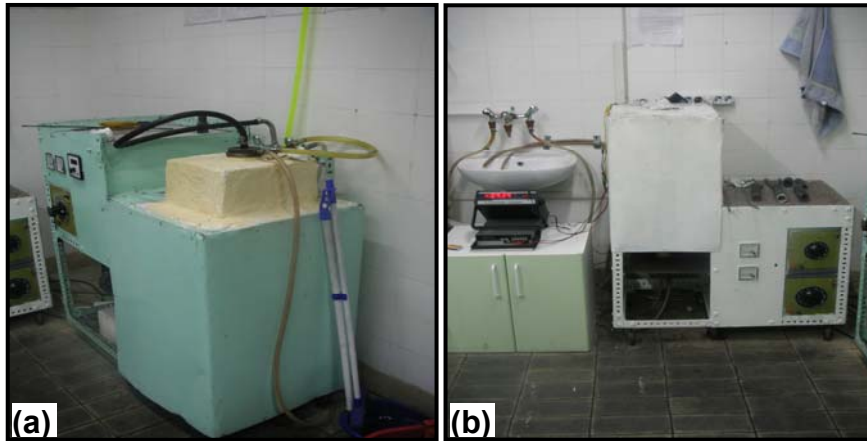
Bu proje çalışmasında vakumlu eritme fırını, döküm fırını ve Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırını kullanılmıştır. Bu bölümde, deneylerde kullanılan bu fırınlar ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2.2.1 Vakumlu Erime Fırını

Vakumlu eritme fırını alaşım yapılacak metallerin vakumlu ortamda oksitlenmeden eritilmesinde kullanılır. Vakumlu eritme fırını; iç içe geçmiş iki alümina tüp, vakum pompası, sıcaklık kontrolcüsü, sabit güç vermekte kullanılan varyak ve soğutma sisteminden oluşmaktadır. İçteki alümina tüpün iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 700 mm olup bir ucu kapalıdır. Bu alümina tüpün içinde vakumlu ortam sağlanır. Dış alümina tüpün ebatları ise 80 mm × 90 mm × 500 mm olup her iki ucu da açıktır. Dış alümina tüpün etrafına 1.2 mm kalınlığındaki *Kanthal Al* telinden (FeCrAl alaşımından yapılmış tel) 80 sarım sarılmıştır. Isıtıcı telin toplam direnci 28.1 Ω olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde, tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Vakumlu ortam oluşturabilmek için bir ucu kapalı alümina tüpün açık ucuna vakum pompasını bağlayacak şekilde pirinçten bir soğutma sistemi yapılmıştır. Vakumlama esnasında hava sızması için iç alümina tüp ile pirinç soğutma sisteminin arası zift ile yalıtılmıştır. Fırın ısıtıldığında ziftin erimemesi için ise soğutma sisteminden sürekli su dolandırılmaktadır. Fırının sıcaklığı sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmektedir. Vakumlu eritme fırını 1100 °C'ye kadar (± 2 °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. Eritme işlemi vakum pompası yardımıyla 10^{-3} mbar basınç altında yapılmaktadır.

2.2.2. Döküm Fırını

Döküm fırını; iki ucu açık alümina, alt ısıtıcı, üst ısıtıcı ve soğutma kazanından oluşmaktadır. İç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 750 mm olan alümina tüpün etrafındaki farklı iki bölgeye ısıtıcı teller sarılarak birbirinden bağımsız iki ısıtıcı bölge oluşturulmuştur. Isıtıcı tel olarak 1.2 mm kalınlığında *Kanthal A1* teli kullanılmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların dirençleri sırasıyla 16.675 Ω ve 9.725 Ω olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların sıcaklıklarını ölçmek için ısıtıcıya yakın mesafelere iki adet yalıtılmış *K*-tipi termal çift yerleştirilmiştir. Alümina tüpün alt tarafına 40 mm çapında ve 160 mm uzunluğunda silindirik bir su kazanı yerleştirilmiştir. Alümina tüpün etrafı ise ısı yalıtımı amacıyla gaz beton (Ytong) tuğlası ile kaplanmıştır. Döküm fırını 1100 °C'ye kadar (± 2 °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. akumlu eritme ve döküm fırınları şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. (a) Vakumlu eritme fırını (b) Sıcak döküm fırını

2.2.3. Kontrollü Katılaştırma Fırını

Kristal büyüme çalışmalarının yaklaşık % 40'ı Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını ile yapılmaktadır. Özellikle mühendislik alanında gerilime dayanıklı malzeme üretiminde bu fırınlardan yaygın olarak yararlanılmaktadır. Sıcak döküm fırınında elde edilen numunelerin, değişik sıcaklık gradyenti ve hızlarda katılaştırılması, kontrollü katılaştırma fırını yardımıyla yapılmaktadır.

Şekil 2.2’te şematik olarak gösterilen kontrollü katılaştırma fırınında, değişik katılma hızları elde etmek için kullanılan motor bağlantılı bir sürücü sistem, farklı sıcaklık gradyenti oluşturmak için kullanılan ısıtıcı ve soğutucu sistemler bulunmaktadır. Bu fırında numune tutucusuna yerleştirilen numuneler, sürücü sistem vasıtasıyla sıcak bölgeden soğuk bölgeye çekilirken, kalıp içerisindeki sıvı alaşım, en alt kısımdan başlayarak katılaşmakta ve katı-sıvı arayüzeyi yukarı yönde ilerlemektedir.

Kontrollü katılaştırma fırını 1100 °C sıcaklığa kadar çıkılabilmektedir. Ayrıca bu fırına takılan numune içerisinde 10 ile 100 °C/cm arasında bir sıcaklık gradyenti elde edilebilmektedir. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını başlıca *ısıtıcı sistem*, *soğutucu sistem* ve *sürücü sistem* olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Şimdi bu kısımları detaylı bir şekilde inceleyelim.

2.2.3.1. Isıtıcı Sistem

Isıtıcı sistem, yüksek sıcaklıklara dayanıklı iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm, uzunluğu 800 mm olan iki ucu açık alümina tüp etrafına 1 mm çapında, toplam direnci 25 Ω olan Cr-Ni tel 300 mm sarılarak yapılmıştır. Alümina tüpün iki ucuna pirinçten yapılmış dairesel kesitli kaideler geçirilmiştir. Alümina tüp ile pirinç kaideler arasındaki boşluk 180 °C’ye dayanıklı zift (black wax) ile doldurulmuş ve böylece numunenin argon atmosferinde kalması sağlanmıştır. Dolgu ziftinin aşırı ısınmasını önlemek ve pirinç kaideyi soğuk tutmak için kaidelerin içerisinden sürekli su dolanımı yapılmıştır. Fırının sıcaklığını kontrol etmek için 0.5 mm çapında yalıtılmış, metal kaplı K-tipi termal çift sıcak bölgenin tam ortasına yerleştirilmiştir. Ayrıca üst bölgede pirinç kapak ile pirinç kaide arasından hava sızması için lastik halka (O’ring) yerleştirilmiştir. Kontrollü katılaştırma fırınının ısıtıcı sistemi ± 0.1 °C hassasiyetinde **2604S Eurotherm** sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmiştir.

2.2.3.2. Soğutucu Sistem

Soğutma sistemi, fırın içerisinde sıcaklık gradyenti oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. Yeterli uzunlukta katılaştırılan numune, aniden soğutma bölgesine (iç su havuzuna) çekilerek ani soğutma (quench) sağlanmaktadır. Soğutucu sistem, 300 mm uzunluğunda 23 ve 33 mm çaplara sahip iç içe geçmiş iki pirinç borudan oluşmaktadır. Pirinç boruların alt kısmı yaklaşık 10 mm kalınlığında, 100 mm çapında dairesel pirinç parçaya kaynatılmıştır. Dolayısıyla soğutucu sistem iç içe geçmiş iki

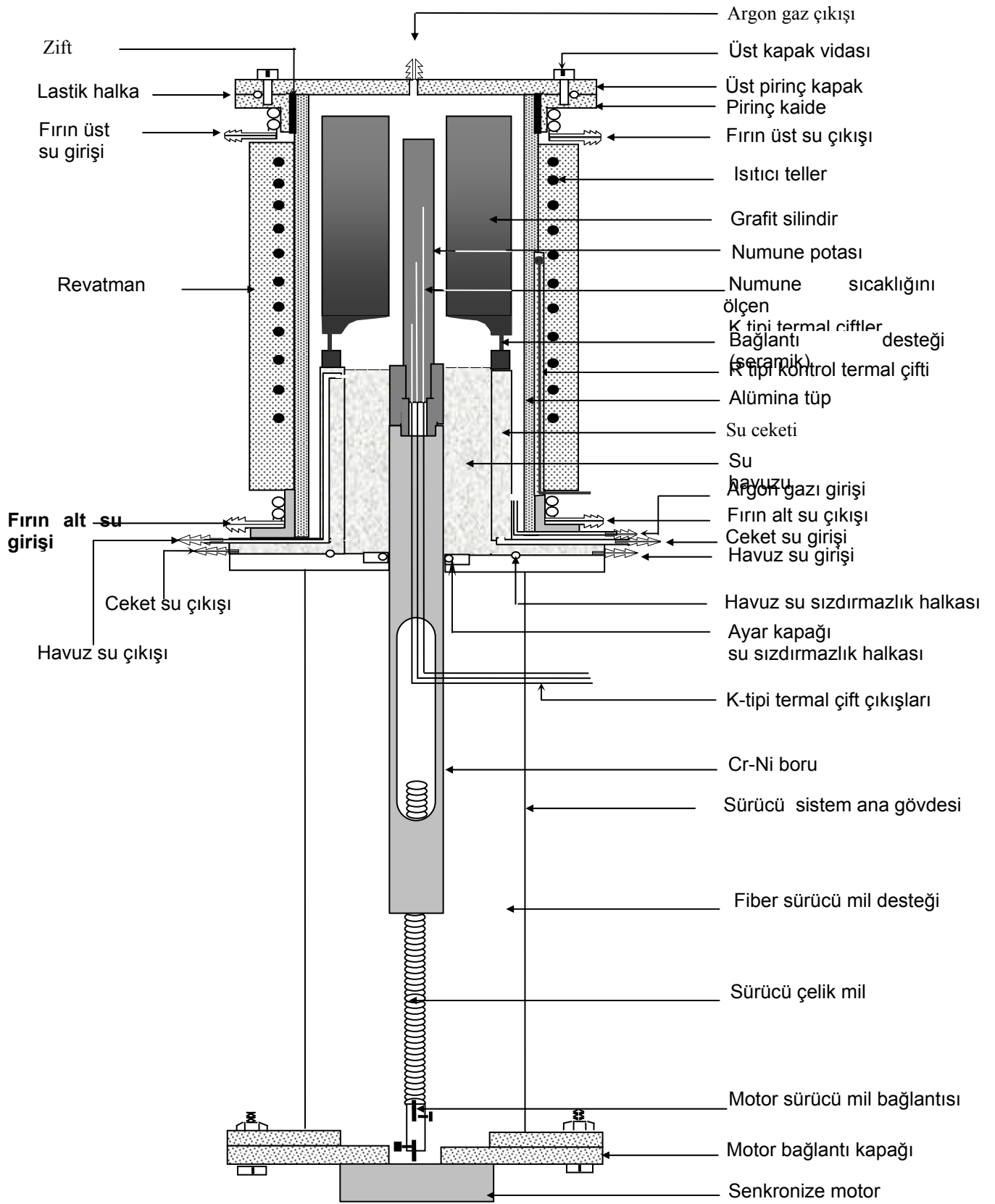
silindirin (iç ve dış silindir) oluşturduğu bir havuzdan yapılmıştır. Numune doğrudan havuza çekilmektedir.

Havuzlardaki suyun sıcaklığı, ± 0.01 °C hassasiyetinde -40 °C ile 200 °C sıcaklık aralığında çalışabilen **PolyScience** dijital kontrollü ısıtmalı/soğutmalı akışkan dolanım sistemi ile kontrol edilmektedir. Dolanım sisteminden gelen akışkan (antifrizli su) ilk olarak havuzun taban kısmından girmekte, havuzda belli bir seviyeye kadar birikmekte ve sonrada fırını terk ederek dolanım sistemine geri dönmektedir. Böylece havuz ve içerisindeki akışkanın sürekli soğuk kalması sağlanabilmektedir. Dolanım sisteminin akışkan tankı 13 L hacminde ve bu tank içerisindeki akışkan belli bir sıcaklık aralığında (-40 °C ile 200 °C) hem ısıtılıp hem de soğutulabilmektedir. Ayrıca dolanım sisteminin tankında bulunan akışkanın, fırın içerisinde istenilen hızda dolanımı sağlanabilmekte yani dolanım sisteminin akışkan pompalama hızı ayarlanabilmektedir.

2.2.3.3. Sürücü Sistem

Farklı katılaştırma hızları elde etmek amacı ile kullanılan sürücü sistem, 540 mm boyunda ve 40 mm çapında pirinç gövde içerisinde bulunan, dış çapı 12 mm, iç çapı 10 mm, uzunluğu 650 mm olan Cr-Ni borudan oluşmaktadır. Üzerinde cetvel ölçeği bulunan sürücü sistemin alt kısmında, değişik katılaştırma hızları sağlayan sürücü mile bağlı senkronize motor bulunmaktadır. Pirinç gövde içerisindeki Cr-Ni boru, alt ucundan fiberglastan yapılmış mil yuvasına, üst ucundan da numune tutucusuna sabitleştirilmiştir. Cr-Ni borunun kenarlarından su sızıntılarını önlemek amacıyla lastik halkalar kullanılmıştır. Pirinç gövde içine yerleştirilmiş fiberglas, 65 mm uzunluğundadır. Fiberglas'ın bir ucu 12 mm çapındaki Cr-Ni boruya sıkı bir şekilde geçebilmesi için delinmiştir.

Diğer ucuna ise sürücü milin içinde hareket edebilmesi için 20 mm çapında 30 mm uzunluğunda pirinç blok yerleştirilmiştir. Bu parçanın merkezine 3 mm çapında metrik diş açılmıştır. Sürücü mil çelikten yapılmış olup buna da 3 mm'lik metrik diş açılmıştır. Numune bu çelik mil vasıtasıyla motor devir hızına bağlı olarak, soğuk bölgeye doğru çekilip, düşey doğrultuda kontrollü olarak katılaşması sağlanmaktadır.

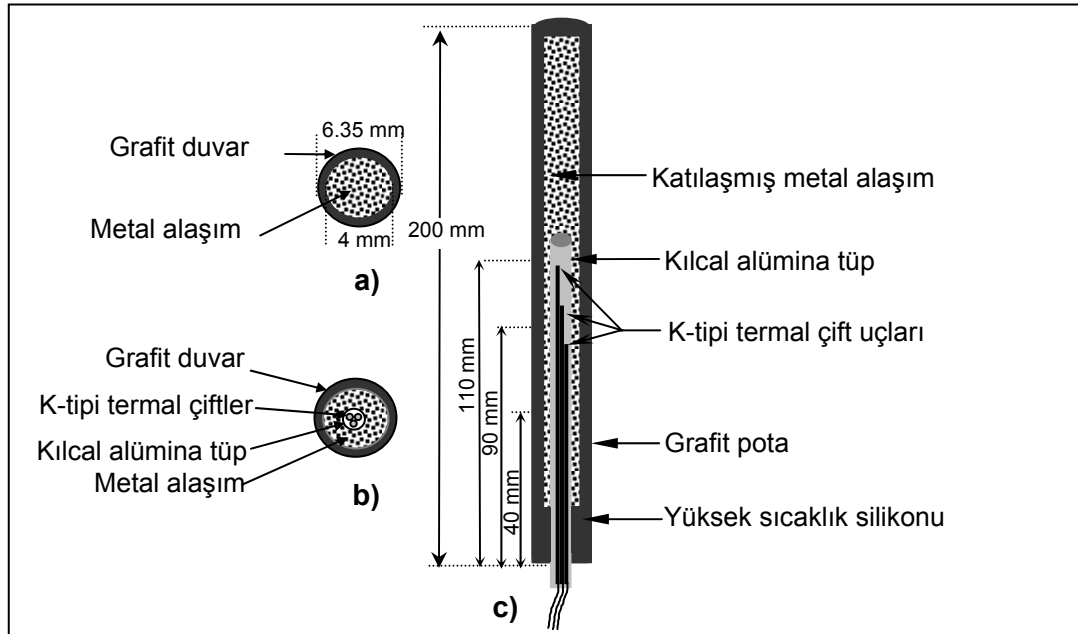


Şekil 3.5. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırını [12].

2.3. BİR DENEYİN YAPILIŞI

2.3.1. Numunenin Hazırlanması

Numune pota ve kalıplarının hazırlanmasında iyi bir ısı iletkenliğine ve kolay işlenebilme özelliklerine sahip olması, metalik alaşımlarla reaksiyona girmemesi nedeniyle grafit tercih edilmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmalarda kolay işlenebilen, yüksek ısı iletkenliğe sahip, korozyona karşı dayanımı yüksek ve erime sıcaklığı 400 °C ile 1400 °C arasında olan metaller için kullanılabilen **Morgan** marka grafitler kullanılmıştır. Deneylerde numune kalıbı olarak 200 mm uzunluğunda ve 6.35 mm çapında grafit çubuklar kullanılmıştır. Bu grafit çubuklar delinme esnasında kolayca kırılabilirdikleri için, pirinçten yapılmış kalıbın içine yerleştirilerek 4 mm çapında 220 mm uzunluğunda özel matkap uçları ile tornada delinmiş ve böylelikle içi boş grafit kalıplar elde edilmiştir. Şekil 2.3’ de görüldüğü gibi, alümina tüp iki ucu delik olan numune kalıbının bir ucundan geçirilip diğer ucu merkezde olacak şekilde yerleştirilerek sızıntı olmaması için etrafı sıkı bir şekilde cam pamuğu ve silikonla desteklenmiştir.

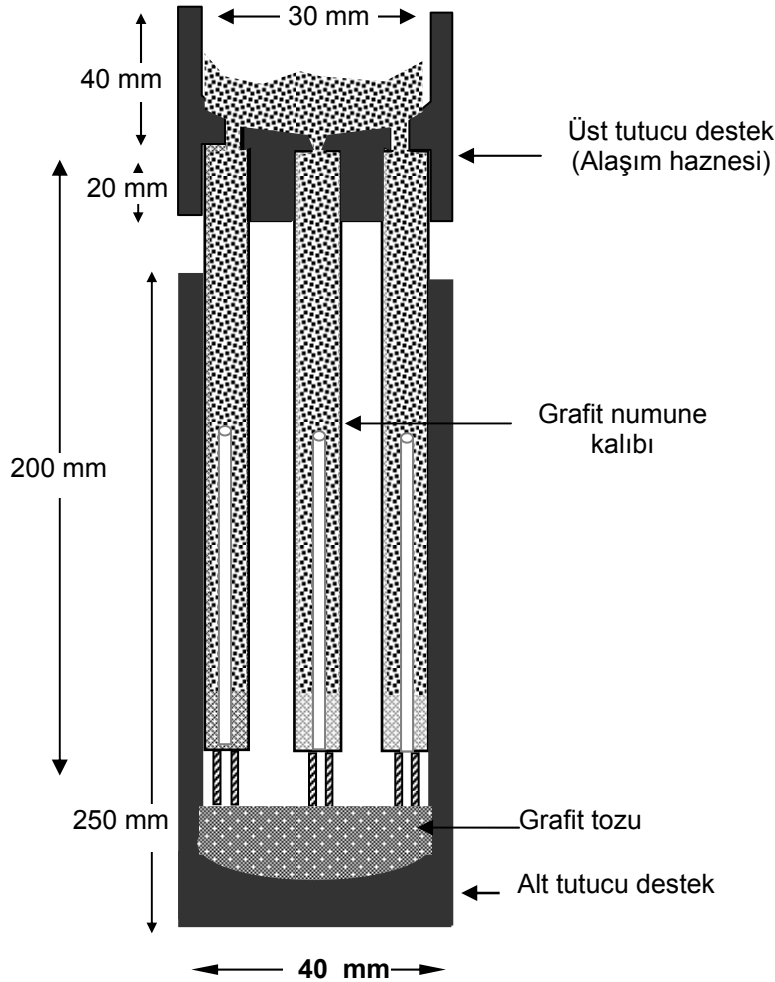


Şekil 2.3. Grafit numune kalıbı (a) Üst enine kesiti, (b) Alt enine kesiti (c) Yandan görünüşü

2.3.2. Numune Potasının Yapılması

Aynı anda, aynı bileşime sahip alaşımı numune kalıplarına doldurmak amacıyla numune pota kalıbının hazırlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 2.4’de verildiği gibi, hazırlanan numune kalıplarından 13 adet numune elde edilebilmektedir. Numune potası, alt ve üst olmak üzere 2 adet

grafit destekten oluşmaktadır. Alt destek 40 mm çapında, 250 mm uzunluğunda silindir biçimli grafit parçadan yapılmış ve içerisine 30 mm çaplı 200 mm uzunluğunda bir ucu kapalı kalacak şekilde delik açılmıştır.



Şekil 2.4. Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi

Üst destek yapımı için 60 mm uzunluğunda, 40 mm çapında bir grafit parça kullanılmıştır. Grafit parçanın bir ucu 30 mm çapında matkap ucu kullanılarak 40 mm uzunluğunda delinmiştir. Diğer ucuna ise 3 mm çapında 20 mm uzunluğunda 13 adet delik açılmıştır. Bu delikler 6.35 mm çapındaki matkap ucuyla 15 mm uzunluğunda genişletilmiştir. Önceden hazırlanmış olan numune kalıplarının açık uçları üst destekteki deliklerden geçirilmiştir. Birleşme noktaları 1200 °C'ye dayanıklı karbon katkılı silikon yapıştırıcı ile tutturulmuştur.

2.3.3. Alaşımın Hazırlanması

İncelenecek olan alaşımların bileşim oranları her birinin faz diyagramları yardımıyla tespit edildi. Alaşım yapımında kullanılan malzemelerin yüksek saflıkta olmasına özellikle dikkat edildi. Yeterince saf olmayan malzemelerle alaşım hazırlandığında safsızlıklar arayüzeyde birikmekte ve deneysel süreçte arayüzeyde oluşan yapı şekillerini olumsuz etkilemektedir. Alaşım üretimi için %99.99 saflıkta alüminyum ve %99.99 saflıkta nikel metalleri kullanıldı. Her bir bileşen, uygun oranlarda 0.1 mg'a duyarlı **AND GX-600** tipi hassas terazi ile tartıldı (şekil 2.5).



şekil 2.5. Alaşım metallerinin tartılmasında kullanılan hassas terazi.

2.3.4. Dökümünün Yapılması

Alaşım hazırlamada kullanılacak metallerin miktarları hassas terazi ile tartıldıktan sonra alaşımın hazırlanması ve hazırlanan alaşımın numune kalıplarına doldurulması aşamalarına geçildi. Erime sıcaklığı düşük olan metal altta gelecek şekilde metal malzemeler grafit potaya yerleştirildi. Grafit pota uygun bir çengelli tel pota tutucusu yardımıyla vakum fırınına indirildi. Vakum pompası çalıştırılarak fırın vakumlandı. Fırın ısıtmaya başlamadan önce fırının kapaklarında bulunan ziftin sıcaklığın etkisiyle erimemesi için kapak içlerinden su geçirilerek soğutma yapıldı. Varyak en düşük güç durumunda çalıştırıldı ve yaklaşık her 5 dakikada varyağın değeri %5 artırıldı. Varyağın değerinin artırılmasına fırın istenilen sıcaklığa çıkıncaya kadar devam edildi. Metaller tamamen eridikten sonra vakum kapağı açılarak grafit karıştırmacı çubuk yardımıyla metal eriyik karıştırdı. Bu işlem 20-25 dakika arayla 4-5 defa tekrarlandı. Böylece eriyik halde alaşım hazırlanmış oldu. Vakumlu eritme fırınında alaşım hazırlama işlemleri devam ederken diğertaraftan döküm fırınında dökümün yapılması ve önceden yapılan numune kalıplarına alaşımın doldurulması hazırlıklarına başlandı. Numune potalarıyla desteklenen numune kalıplarının etrafı cam pamuğı ile sarılarak çevresine sarılan tel yardımıyla fırına indirildi. Dökümü kolaylaştırmak amacıyla kalıp üzerine

grafitten yapılmış bir huni yerleştirildi. Döküm sırasında sıvı alaşımın dışarıya taşıp fırına sızmasını engellemek için grafit huni ile alümina tüp arasına yüksek sıcaklığa dayanıklı cam pamuğu sıkıştırıldı. Fırının alt ve üst ısıtıcılarına güç verilerek fırının iç bölgesinin ısıyı çekmesi beklendi. Döküm fırınının varyakları yavaş yavaş artırılarak alt ısıtıcının sıcaklığı alaşımın erime sıcaklığının yaklaşık 50 °C üzerindeki bir sıcaklığa, üst ısıtıcının ise erime sıcaklığının 100-150 °C üzerindeki bir sıcaklığa çıkması sağlandı. Burada amaç vakumlu eritme fırınından eriyik halde çıkarılan alaşımın döküm fırınına yerleştirilen numune kalıplarına dolması esnasında akışkanlığını koruması ve bu süreç esnasında katılaşmadan kalıp içlerine tam bir dolum yapmasıdır.

2.3.5. Metalografik İşlemler

Döküm fazındaki mikroyapıların gözlemleyebilmek için numune metalografik işlemlere tabi tutulmuştur. Numunelerin kesilmesi, zımparalanması, kalıplanması, parlatılması, ultrasonik temizlenmesi ve dağlanması gibi metalografik işlemler sonunda, açığa çıkan mikroyapıların fotoğrafları SEM yardımıyla çekilmiştir.

Numunelerin zımparalanması silisyum karbür (SiC) taneleri veya %55-75 Al₂O₃ (korindon) ve magnetit tozu içeren zımpara kâğıtlarıyla yapıldı. Kullanılan zımpara kâğıtları ve tane büyüklükleri Tablo 2.1’de verilmektedir. Zımpara kâğıtlarında birim alana düşen tane sayısı (grid) arttıkça mikron cinsinden tane boyutu azalmaktadır. 80-600 gridler kaba, 800-2500 gridler ise ince zımpara olarak sınıflandırılmaktadır

Tablo 2.1. Bazı zımpara kâğıtları ve tane büyüklükleri [24].

Zımpara Tane No (Grid)	Tane Boyutu (µm)
80	210-177
150	105-88
180	88-74
240	53-45
320	37-31
400	31-27
600	22-18
800	15-11
1000	
1200	

Numuneler, 80 gridlik zımpara kâğıdından başlayarak 2500 gride kadar, kabadan inceye doğru kademeli olarak zımparalandı.

2.3.6. Numunelerin Parlatılması

Zımparalama ve parlatma işlemleri **Struers LaboPol-5** tipi otomatik parlatma robotu ile yapıldı. Otomatik parlatma robotunun fotoğrafı şekil 2.6'da verilmiştir. Öncelikle parlatma robotun disklerine farklı tane büyüklüklerine sahip zımparalar takıldı. Cihazın su modu açılarak numunelere sulu zımparalama yapması sağlandı. Böylelikle numunenin hem ısınması engellendi hem de homojen bir temas sağlandı.

Zımparalamanın düzgün ve itinalı yapılması fotoğraf çekmede odaklama kolaylığı sağlamaktadır. Her bir zımparalama kademesinden sonra numune yüzeyinin düz olmasına ve derin çiziklerin giderilmiş olmasına dikkat edildi. Daha sonra dönüş hızı ve baskı basınç değeri ayarlanabilen otomatik parlatma robotunun disklerine, parlatılacak numuneye uygun parlatma kumaşları takıldı. Kaba ve ince parlatma için farklı tane büyüklüğüne sahip elmas süspansiyonlar kullanıldı.

Parlatma işleminde kullanılan elmas süspansiyonlar sırasıyla 6 μm , 3 μm , 1 μm , 0.25 μm ve 0.05 μm tane büyüklüğüne sahip elmas çözeltilerdir. Parlatma sırasında her bir elmas süspansiyon için ayrı metal diskler üzerine yapıştırılmış parlatma kumaşları kullanıldı. Numune ile parlatma kumaşı arasında yumuşak bir temas sağlamak ve nem miktarını ayarlamak amacıyla parlatıcı ile birlikte **Struers Depif** yağlayıcı (lubrikant) kullanıldı. Parlatma sırasında disk dönerken nem azaldıkça, numune yüzeyine parlatıcı çözeltiler yapışabilmekte ve yüzeyde leke oluşturabilmektedir. Disk üzerindeki kumaşın kurumaması için zaman zaman çözelti veya yağlayıcı ilavesi yapıldı.



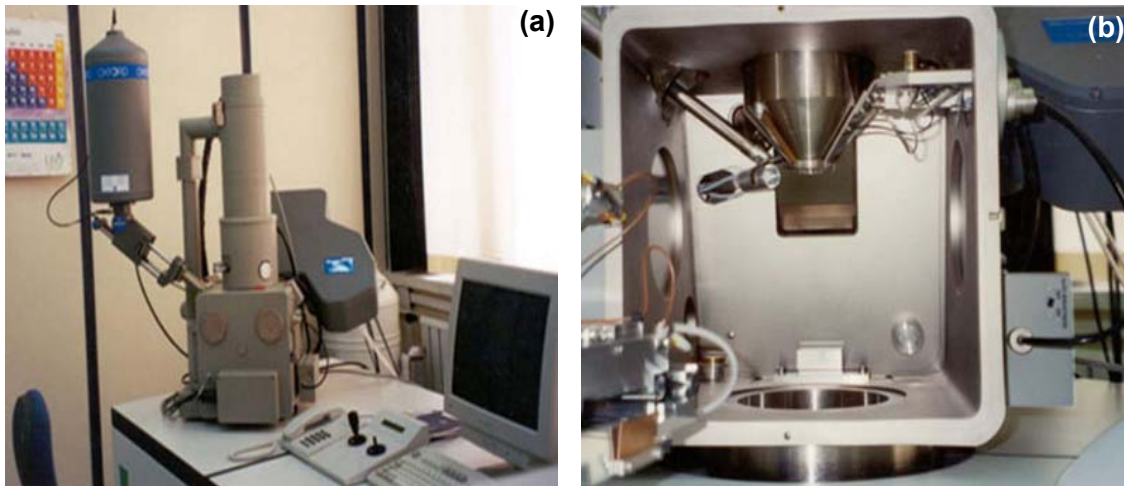
Şekil 2.6. Otomatik zımparalama ve parlatma ünitesi

6 μm , 3 μm ve 1 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken numune üzerine her numunede farklı olmak üzere kuvvet (20-50 N) uygulandı. 0.25 μm ve 0.05 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken uygulanan kuvvetin büyüklüğü azaltıldı. Numuneler her bir çözelti ile ortalama 5-10 dakika parlatıldı. Parlatma sırasında elmas çözeltinin disk üzerinde homojen dağılmasına dikkat edildi. Her aşama sonunda numune bol damıtık su ile yıkandı ve ultrasonik temizleme işlemine tabi tutuldu. Her bir parlatma kademesi değişimde 5-10 dakika süreyle ultrasonik temizleme yapılarak numune yüzeyde biriken kirlilikler temizlendi. Bazı durumlarda parlatma kademesi değişimde numune yüzeyi bol suyla yıkansa bile yüzeyde bulunan kalıntılar tam olarak temizlenememektedir. Böyle durumlarda numunelere ultrasonik temizleme uygulanır.

2.3.7. Mikroyapıların Gözlenmesi

Üretilen ve metalografik işlemlere tabi tutulan her bir numunenin mikroyapı fotoğrafları taramalı elektron mikroskopuyla (*SEM*) çekildi. Numunelerin *SEM* fotoğraflarının çekilmesinde **LEO 440** marka bilgisayar kontrollü dijital taramalı elektron mikroskobu (*SEM*) kullanıldı. Bu mikroskop, 40 kV hızlandırma voltajlı ve Secondary–Backscattered elektron detektörüne sahip $\times(5\text{--}300\,000)$ kat büyütme kapasitelidir. Ayrıca farklı fazların tane yönelimini tespit edebilme özelliği bulunmaktadır. Şekil 2.7’de kullanılan *SEM* mikroskobunun fotoğrafı verilmektedir.

SEM ile fotoğraf çekimine geçmeden önce, parlatılmış ve dağlanmış olan numuneler, kaplama ünitesine yerleştirildi ve yüzeyleri yaklaşık 10–40 nm inceliğinde gümüş tabaka ile kaplanarak vakum altına alındı. Burada elektron demetinin yüzeyden daha iyi saçılması ve görüntünün daha iyi kontrast ve netliğe sahip olması amaçlanmıştır. Bu işlemten sonra gümüş tabaka ile kaplanmış numuneler, *SEM*’in vakum haznesi içindeki numune tablası kısmına yerleştirilerek numunelerin uygun bölümlerinden farklı büyütmelerde fotoğrafları çekildi.



Şekil 2.7 Taramalı elektron mikroskobunun (*SEM*) fotoğrafı

2.3.8 Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi

Numunelerin mikroyapı fotoğrafları optik görüntü sistemi ve *SEM* mikroskobuyla çekildikten sonra mikrosertlik ölçümlerine geçildi. Mikrosertlik ölçümlerinde, şematik yapısı Şekil 2.8’de verilen **Future Tech FM-700** model dijital mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 10 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500 g ve 1000 g’lık yük uygulayabilen, %5 hassasiyette ölçüm alabilen ve elektronik olarak mikrosertlik değerini kendisi hesaplayabilen bir cihazdır. Kendi üzerinde fotoğraf çekme ünitesi olup $\times 200$, $\times 500$ ve $\times 1000$ büyütme değerlerindeki objektiflerle fotoğraf çekebilme özelliklerine sahiptir.

Beş farklı katılaştırma hızında katılaştırılan numuneler sırasıyla ölçüm cihazına bağlanarak, herbir numunenin kesitinden 8–12 adet mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Katkılama elemtlerinin, mikrosertliğe olan araştırılmıştır.

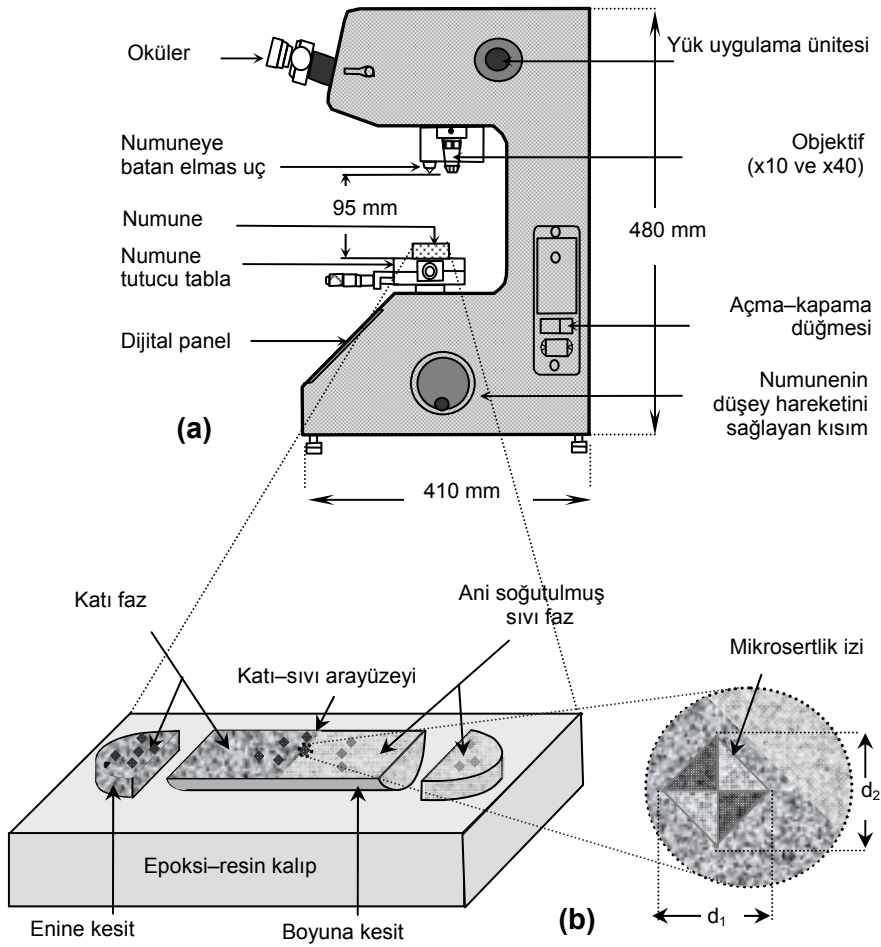
2.3.9. Çekme–Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi

Dökümü yapıp katılaştırılan numunelerin her birinden ikişer adet yapılmıştır. Çünkü çekme–dayanım testi için en az 50 mm uzunluğunda katılaştırmış kesite ihtiyaç duyulmuştur. Böylece mikroyapı belirlenmesi ve elektriksel özellikler için ilk numune kullanılırken aynı şartlar altında katılaştırılan ikinci numuneler çekme–dayanım testi için kullanılmıştır.

Katılaştırılarak hazırlanan 4 mm çaplı ve en az 50 mm uzunluğundaki numuneler **Shimadzu** marka çekme–dayanım cihazının çeneleri arasına sıkıca yerleştirildikten sonra 20 mm/dak hızlarında çekilerek gerilme–uzama eğrileri elde edilmiştir. Böylece elde edilen eğrilerden her bir numunenin çekme–dayanım değeri belirlenerek katkı malzemeleri ile değişimi tanımlanmıştır (Şekil 2.8).

2.3.10. Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi

Hazırlanan kompozisyondaki her bir alaşımın elektriksel özdirenç değerlerinin ölçümünde dört nokta iletkenlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Ölçümler için **Keithley 2400** marka programlanabilir güç kaynağı, **Keithley 2700** marka multimetre ve **Protherm** marka kül fırınından faydalanılmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.8. (a) Mikrosertlik ölçüm cihazının şematik gösterimi, (b) Numune üzerinde cihazın bıraktığı izin detayları.

Ölçümlerde gümüş tellerin çubuk şekilli numunelere doğrudan teması (kontağı) sağlandı. Ölçümler, her bir numune için oda sıcaklığında 0.1 s’de bir olmak üzere 100 defa ölçüm alınarak yapıldı. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle ve tablolarla verilmiştir.



Şekil 2.9. Elektriksel iletkenlik ölçümünde kullanılan düzenek fotoğrafı.

3. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde Al-ağ.%33Cu ötektik alaşımına yapılan katkı maddeleri [ağ.% 2 x (x= Co, Si, Ni, Sb ve Bi)] metalleri ile hazırlanan ve doğrusal katılaştırılan numunelere ait mekanik (mikrosertlik ve çekme dayanımı) ve elektrik (elektriksel öz direnç) özellikleri deneysel olarak ölçülmüştür.

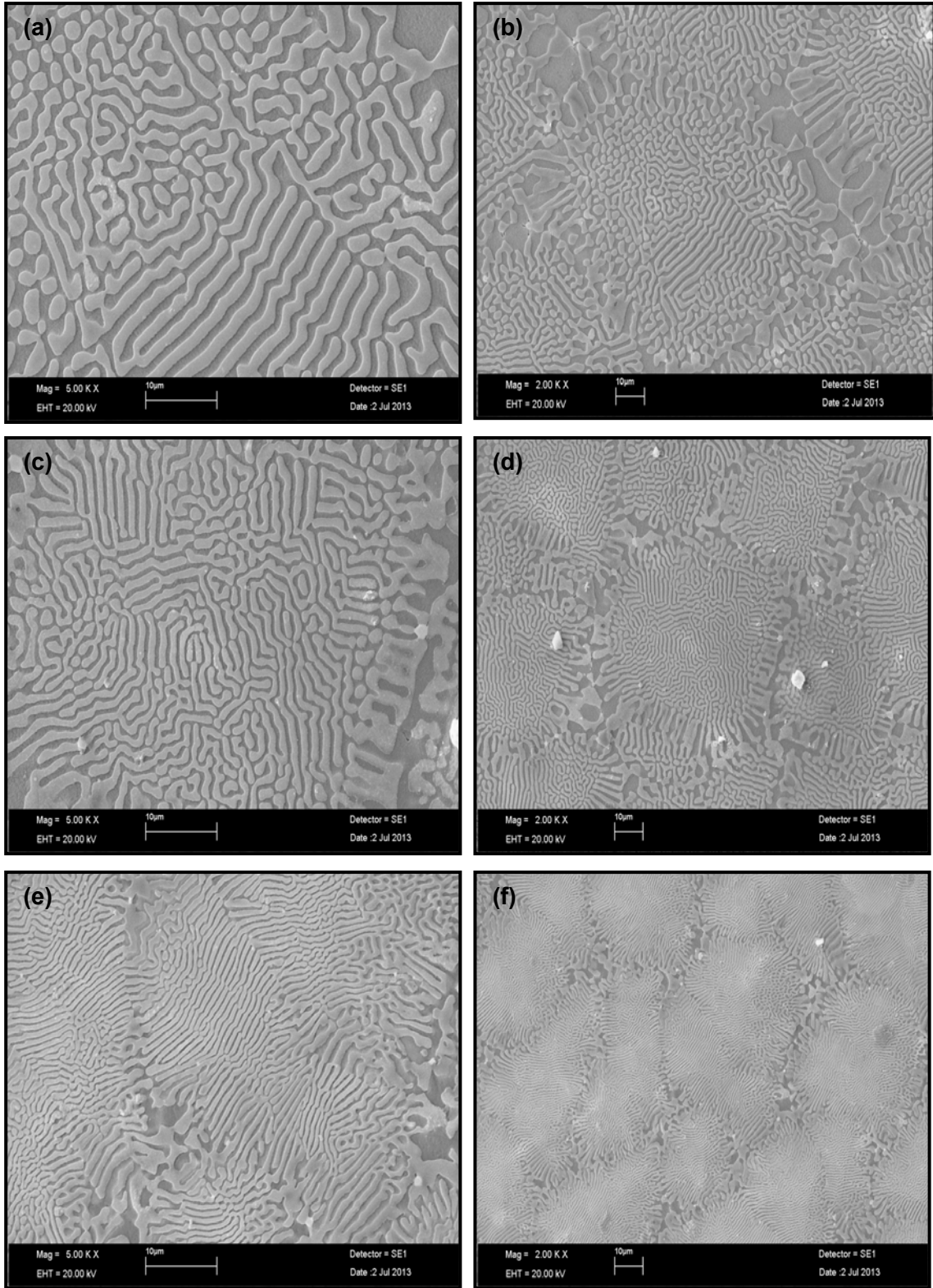
3.1. Doğrusal Katılaştırılan Numunelerin Mikroyapılarının İncelenmesi

Kontrollü katılaştırma fırınında farklı katılaştırma parametrelerinde üretilen her bir numunenin hem optik hem de SEM fotoğrafları farklı büyütme oranlarında çekilmiştir. Katılaştırma deneyleri neticesinde alaşımların mikroyapılarının çekilmesinde öncelikle optik mikroskop kullanılmış, oluşan fazların net bir biçimde belirlenmesi için ise SEM mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 3.1-3.5).

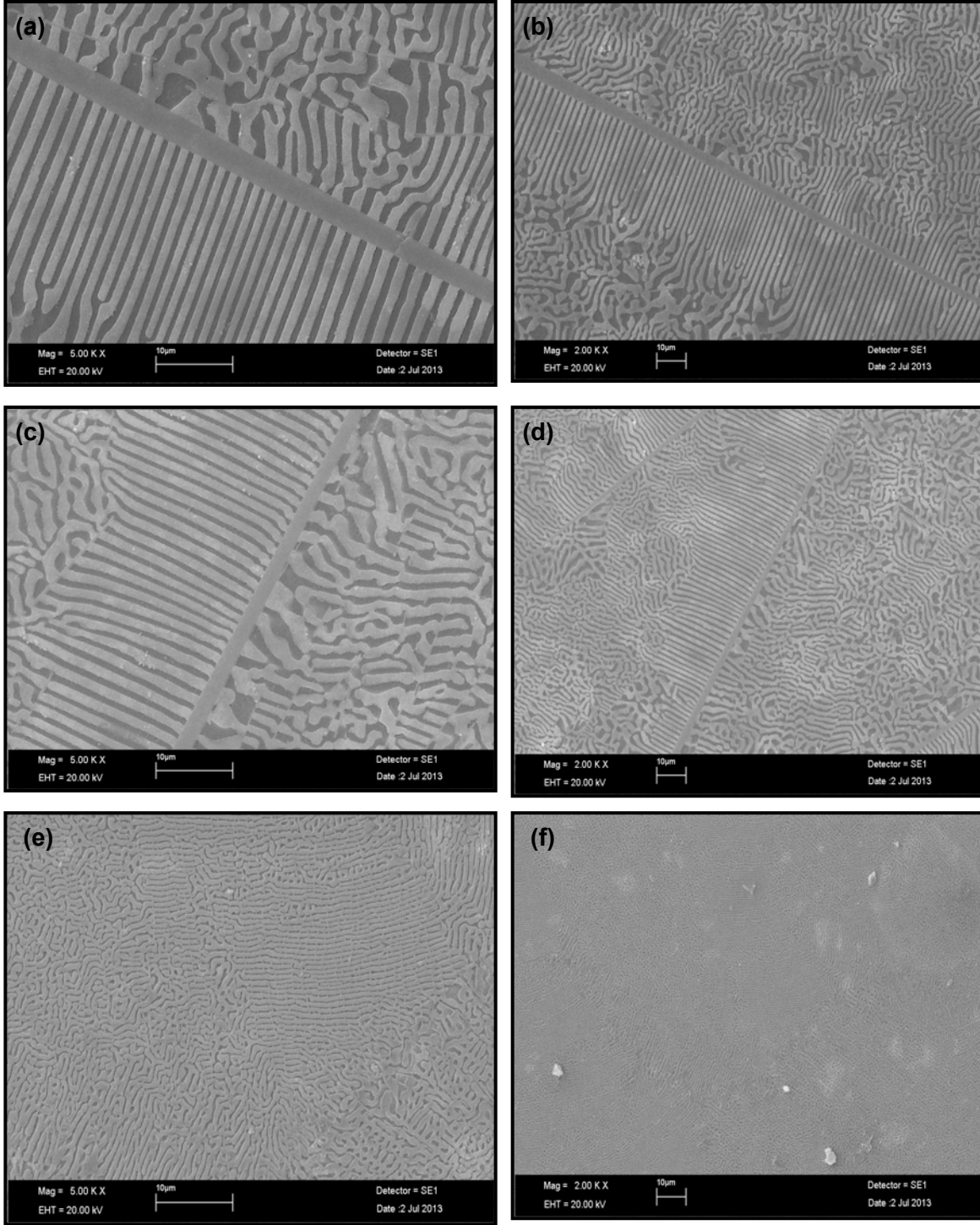
Bu kapsamda; sabit sıcaklık gradyenti (8.03-8.89 K/mm) ve farklı katılaştırma hızlarında ($V = 8.35-167.30 \mu\text{m/s}$) kontrollü katılaştırılmış Al-ağ.%33Cu-%2x (x= Si, Co, Ni, Sb ve Bi) alaşımlarının SEM mikroskoplarıyla çekilen enine kesit mikroyapı fotoğraflarından bazıları Şekil 3.1-3.5’de verilmiştir.

3.2. Fazların Kimyasal Bileşimlerinin Belirlenmesi

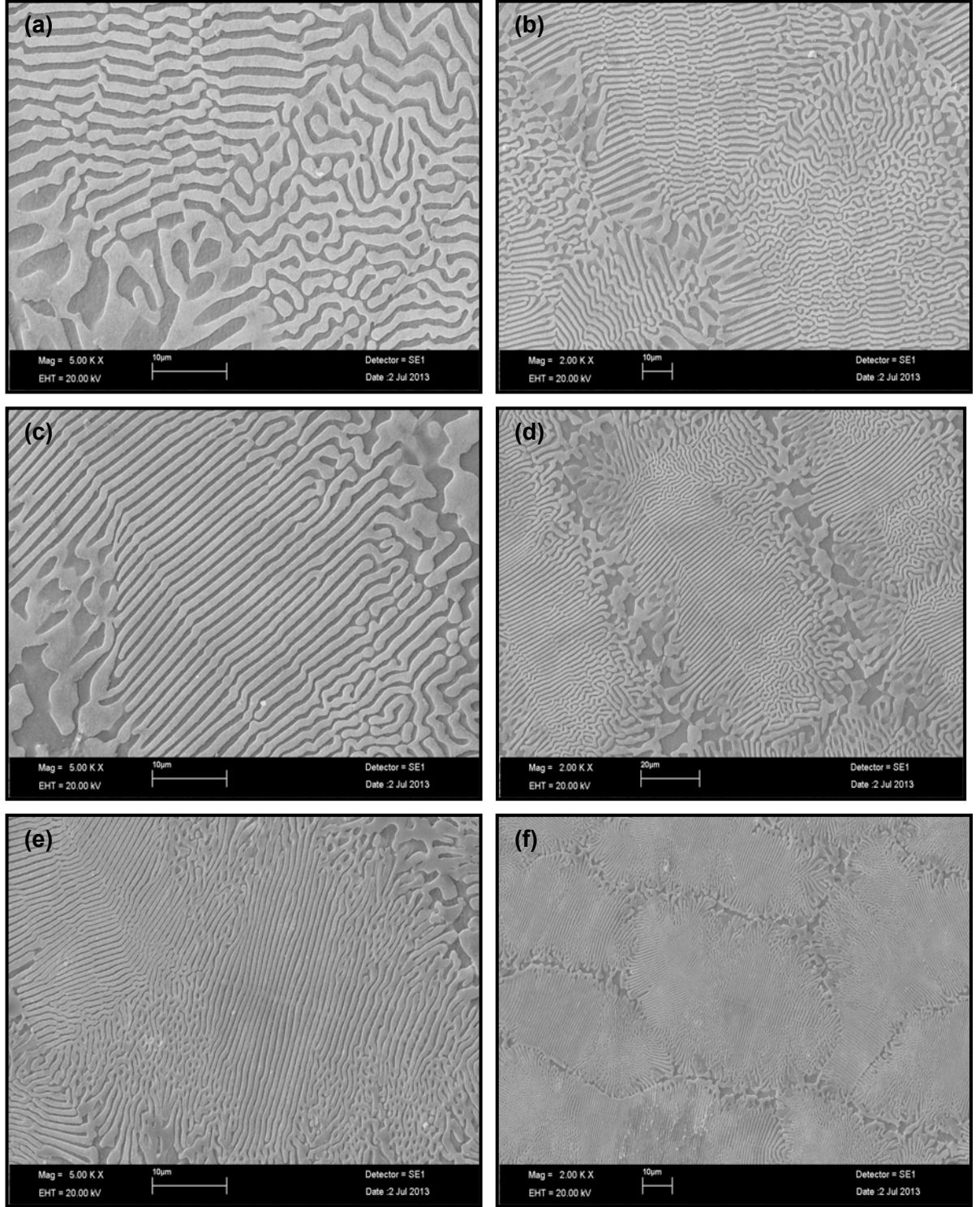
Her bir alaşım sistemine ait numunelerden *SEM* fotoğrafları çekildikten sonra bu fotoğraflarda belirginleşen her bir fazın kimyasal bileşim analizleri (*EDX*) yapılmıştır. Her bir sistem için elde edilen numunelerde faz diyagramlarında da tanımlandığı gibi bazı fazlar birbirinden ayrılmıştır. İncelenen alaşımlarda belirginleşen her bir fazın nokta bileşim analizleri yapılmıştır. (Şekil 3.6-3.10). Her bir ötektik sistem için yapılan katılaştırma deneyleri neticesinde faz diyagramlarında da tanımlandığı gibi bazı fazlar birbirinden ayrılmıştır. İncelenen alaşımlarda belirginleşen her bir fazın nokta bileşim analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucunda Al-Cu-Co alaşımında (Şekil 3.6); Al(α) ana fazı üzerinde, Al₂Cu beyaz lamelsel intermetalik fazı, kalın çubuksal Al₇CoCu₂ intermetalik fazı olmak üzere üç farklı fazın büyüdüğü gözlenmiştir [25]. Al-Cu-Ni alaşımı için yapılan EDX analizi Şekil 3.7’de verilmektedir. Al-Cu-Ni alaşımında Al(α) ana fazı üzerinde, Al₂Cu beyaz lamelsel intermetalik fazı, Al₃Ni intermetalik çubuk fazı gözlenmiştir [24]. Al-Cu-Sb alaşımı için yapılan EDX analizi Şekil 3.8’de verilmiştir. Al(α) ana fazı üzerinde, Al₂Cu beyaz lamelsel intermetalik fazı, AlSb intermetalik çubuk fazı gözlenmiştir [23].



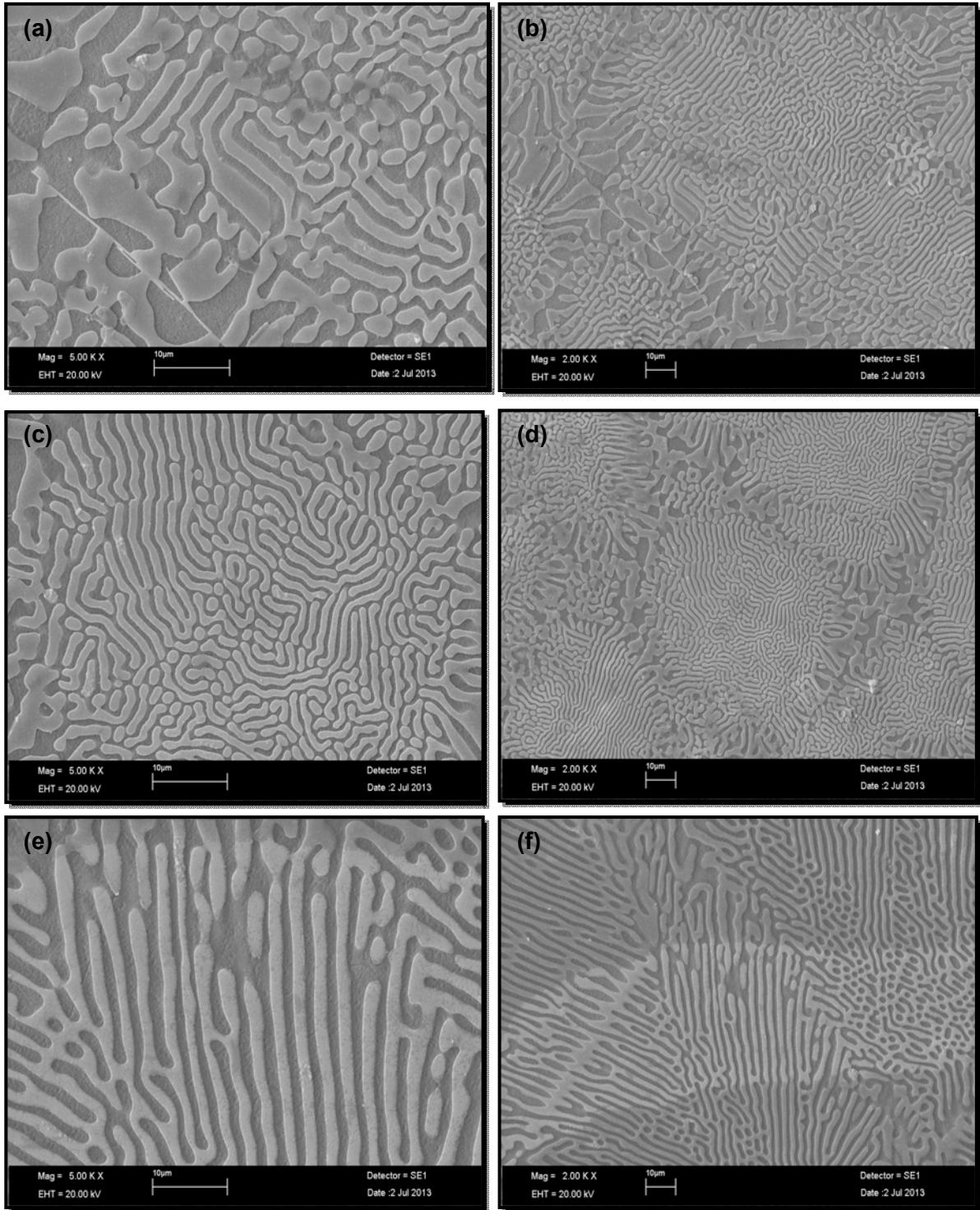
Şekil 3.1. Doğrusal katılaştırılmış Al-33Cu-2Bi alaşımlarının sabit sıcaklık gradyentinde G (8,234 K/mm) farklı katılaştırma hızlarında oluşan mikroyapılarının bazı SEM fotoğrafları. a) $V=1,65 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, b) $V=1,65 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, c) $V=41,6 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, d) $V=41,6 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, e) $V=166,3 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, f) $V=166,3 \mu\text{m/s}$, enine kesit,



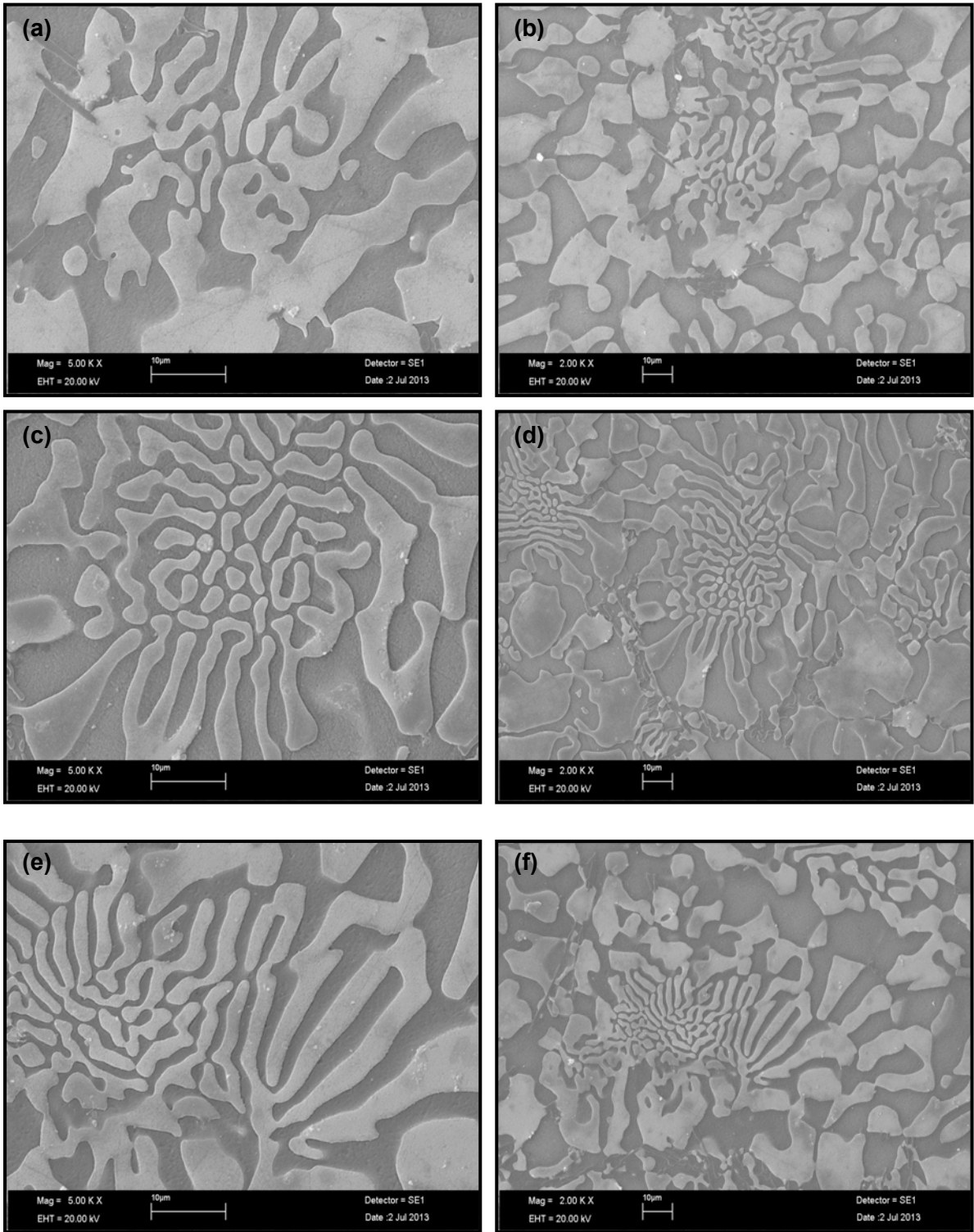
Şekil 3.2. Doğrusal katılaştırılmış Al-%33Cu-%2Co alaşımının sabit sıcaklık gradyentinde G (8,036 K/mm) farklı katılaştırma hızlarında oluşan mikroyapılarının bazı SEM fotoğrafları. a)V= 1,63 $\mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, b) V= 1,63 $\mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, c)V= 41,5 $\mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, d) V= 41,5 $\mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, e)V= 166,3 $\mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, f) V= 166,3 $\mu\text{m/s}$, enine kesit,



Şekil 3.3 Doğrusal katılaştırılmış Al-%33Cu-%2Ni alaşımının sabit sıcaklık gradyentinde G (8,294 K/mm) farklı katılaştırma hızlarında oluşan mikroyapılarının bazı SEM fotoğrafları. a) $V= 1,63 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, b) $V= 1,63 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, c) $V= 41,5 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, d) $V= 41,5 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, e) $V= 165,7 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, f) $V= 165,7 \mu\text{m/s}$, enine kesit,

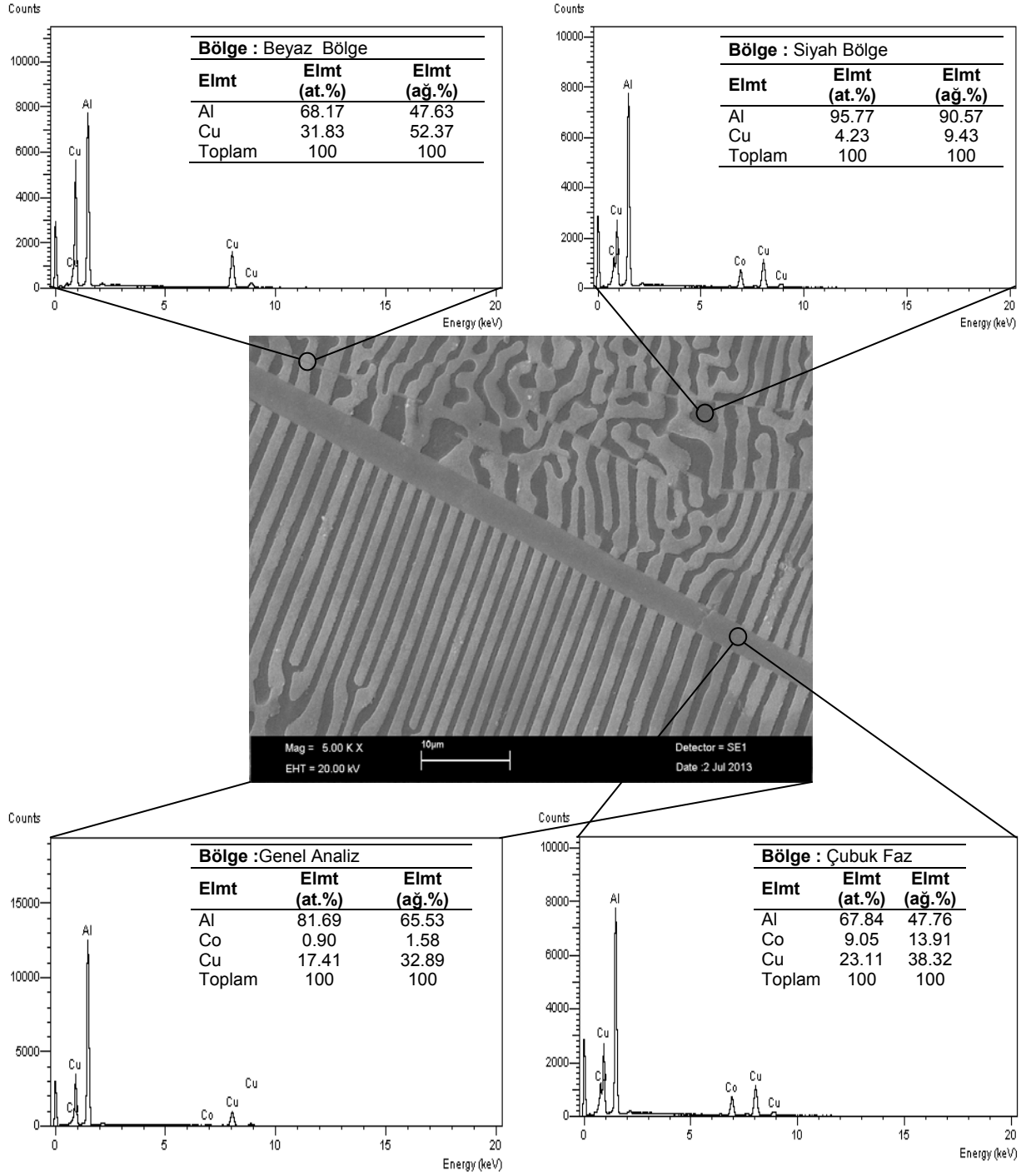


Şekil 3.4 Doğrusal katılaştırılmış Al-33Cu-2Sb alaşımının sabit sıcaklık gradyentinde G (8,764 K/mm) farklı katılaştırma hızlarında oluşan mikroyapılarının bazı SEM fotoğrafları. a) $V= 1,63 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, b) $V= 1,63 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, c) $V= 41,5 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, d) $V= 41,5 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, e) $V= 165,5 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, f) $V= 165,5 \mu\text{m/s}$, enine kesit,

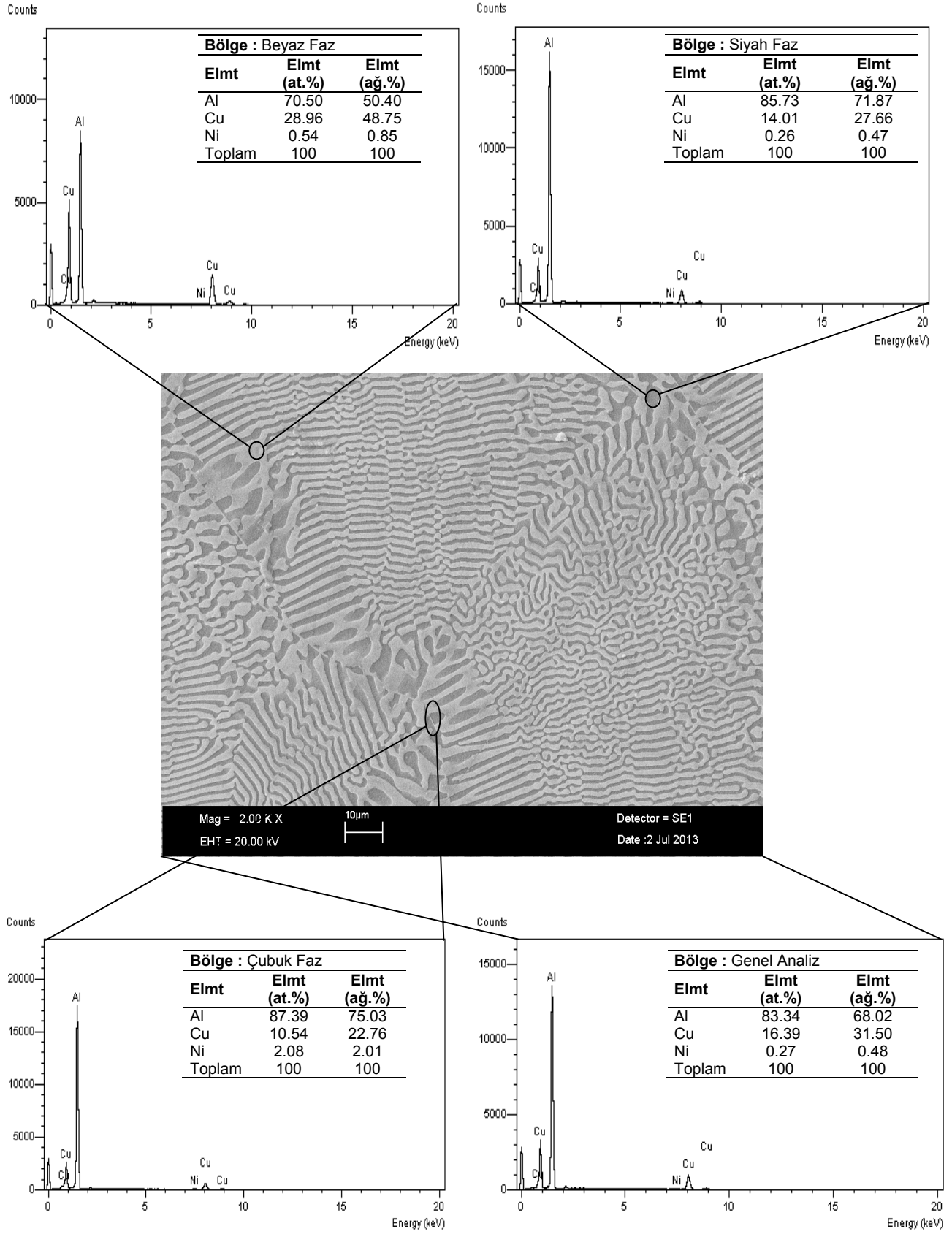


Şekil 3.5 Doğrusal katılaştırılmış Al-%33Cu-%2Si alaşımının sabit sıcaklık gradyentinde G (8,890 K/mm) farklı katılaştırma hızlarında oluşan mikroyapılarının bazı SEM fotoğrafları. a) $V= 1,63 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, b) $V= 1,63 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, c) $V= 41,6 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, d) $V= 41,6 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 2000 Kx, e) $V= 166,3 \mu\text{m/s}$, enine kesit, büyütme 5000 Kx, f) $V= 166,3 \mu\text{m/s}$, enine kesit,

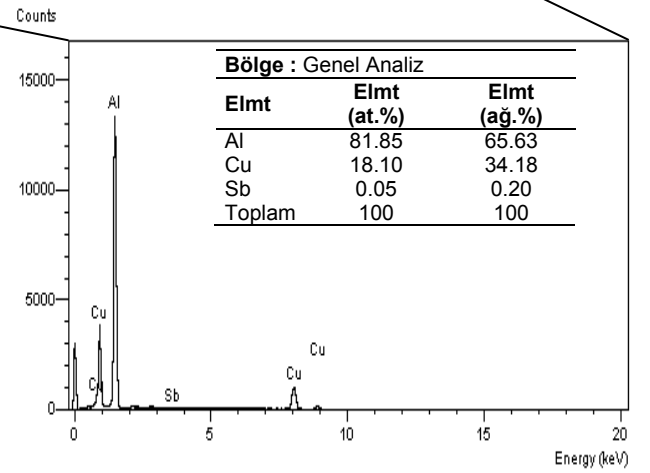
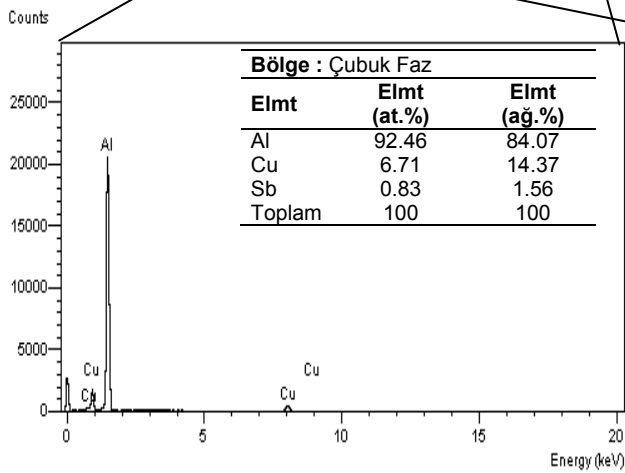
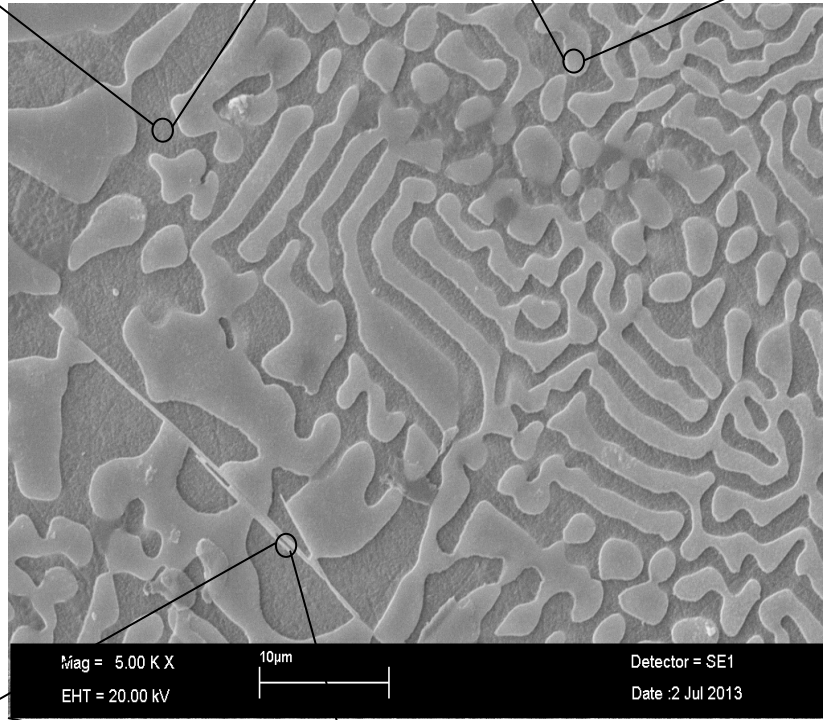
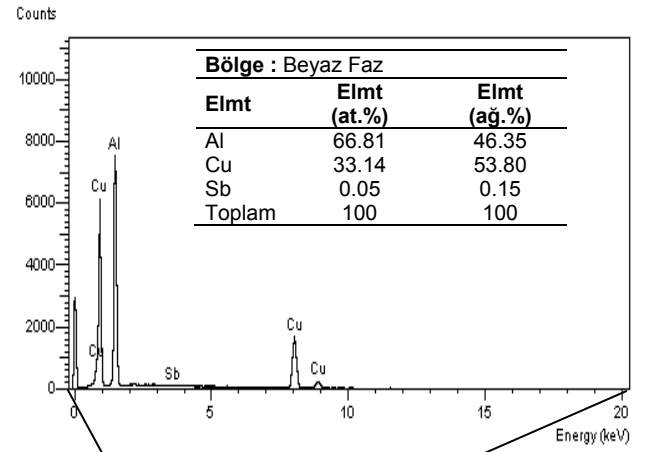
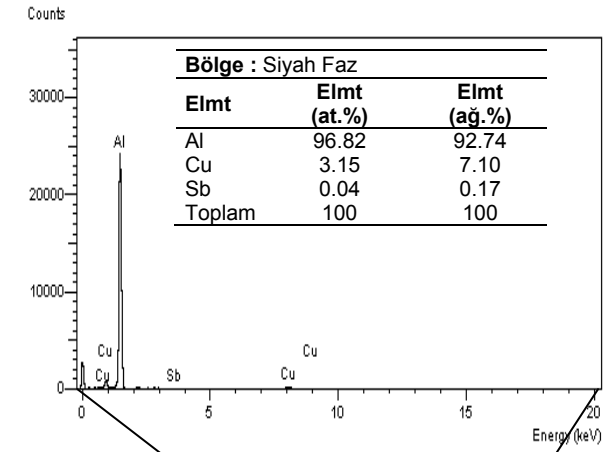
Al-Cu-Si alaşımı için yapılan EDX analizi şekil 3.9’de verilmiştir. Al-Cu-Ni alaşımında Al(α) ana fazı üzerinde, Al₂Cu beyaz lamelsel intermetalik fazı, Si ubuk fazı gözlenmiştir [22]. Al-Cu-Bi alaşımı için yapılan EDX analizi şekil 3.10’de verilmektedir. Al-Cu-Bi alaşımında Al(α) ana fazı üzerinde, Al₂Cu beyaz lamelsel intermetalik fazı büyümüş Bi diğerk fazlar içinde çözündüğü gözlenmiştir.



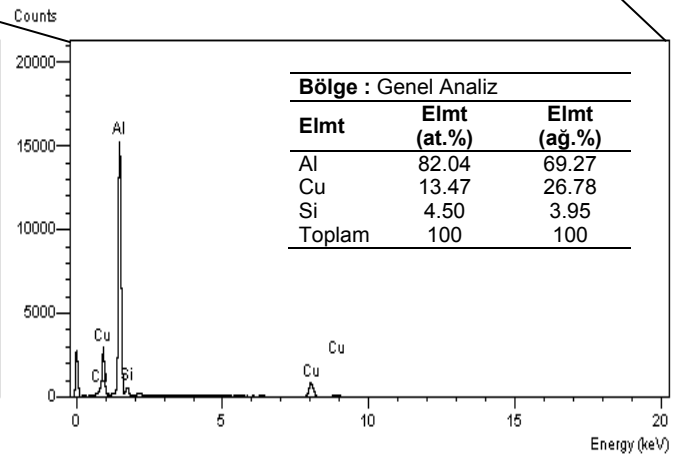
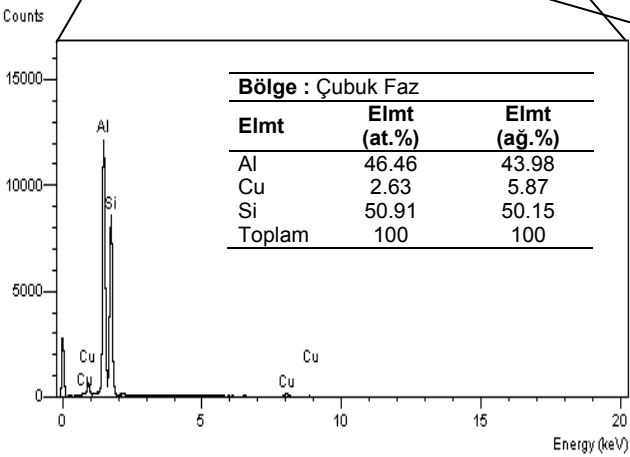
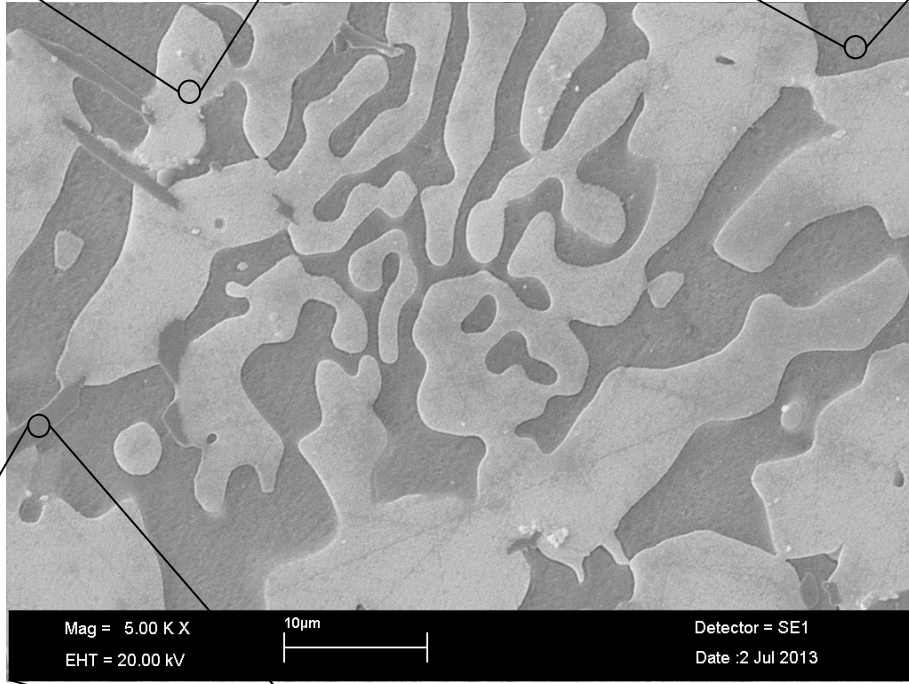
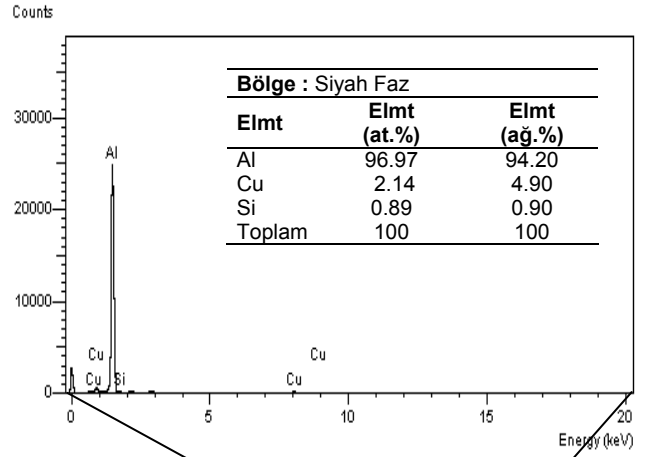
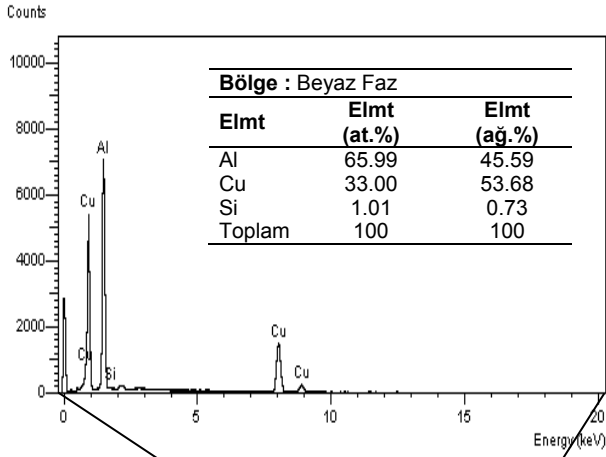
şekil 3.6 Al-33Cu-2Co alaşımının kimyasal bileşim analizi (EDX).



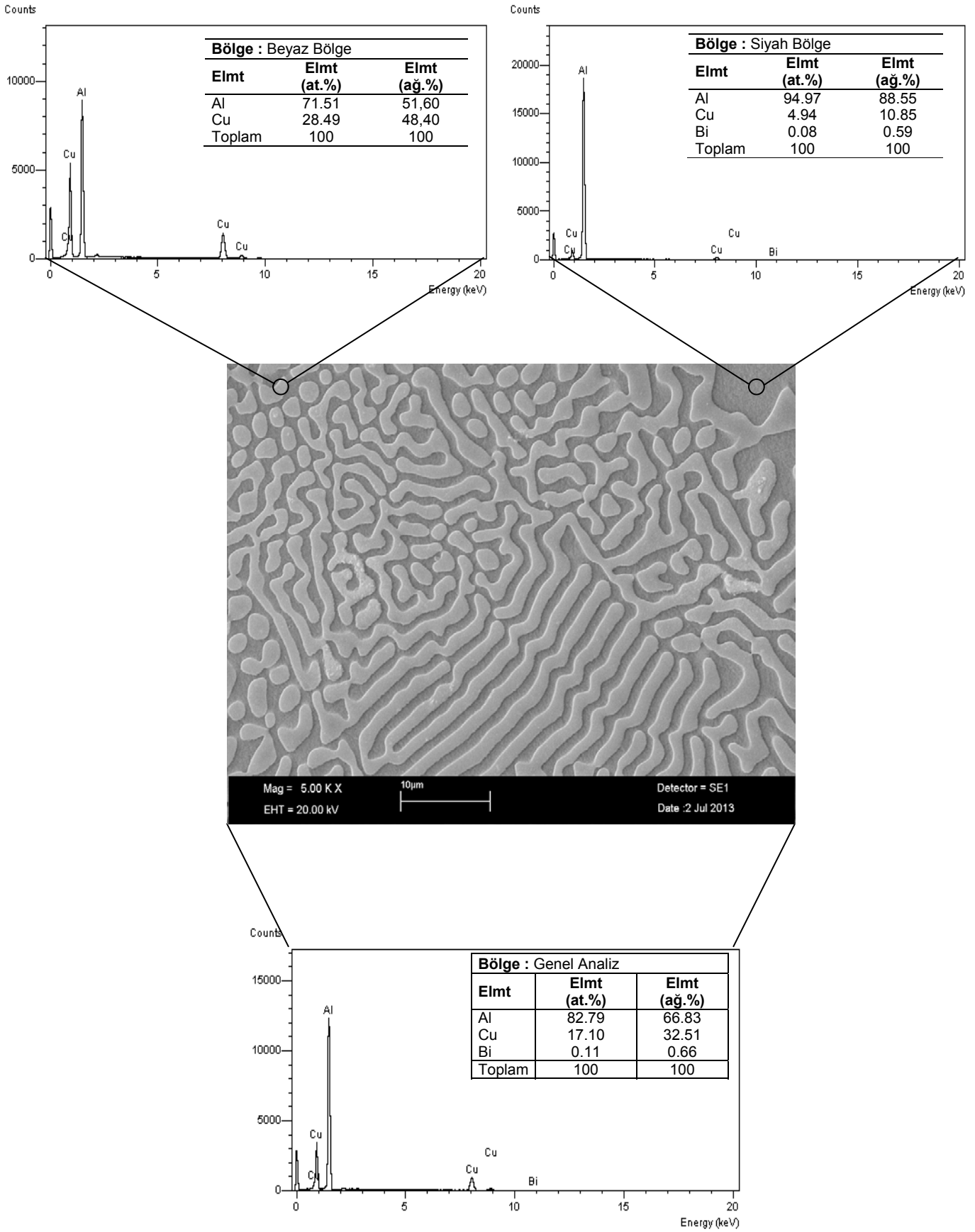
Şekil 3.7 Al-%33Cu-%2Ni alaışımının kimyasal bileşim analizi (EDX).



Şekil 3.8 Al-%33Cu-%2Sb alaışımının kimyasal bileşim analizi (EDX).



Şekil 3.9 Al-%33Cu-%2Si alaşımının kimyasal bileşim analizi (EDX).

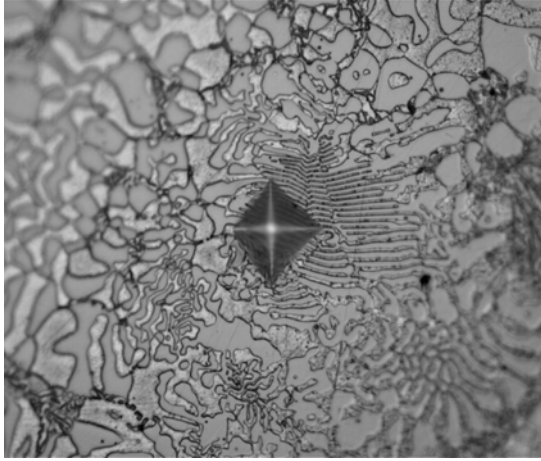


Şekil 3.10 Al-%33Cu-%2Bi alaşımlarının kimyasal bileşim analizi (EDX).

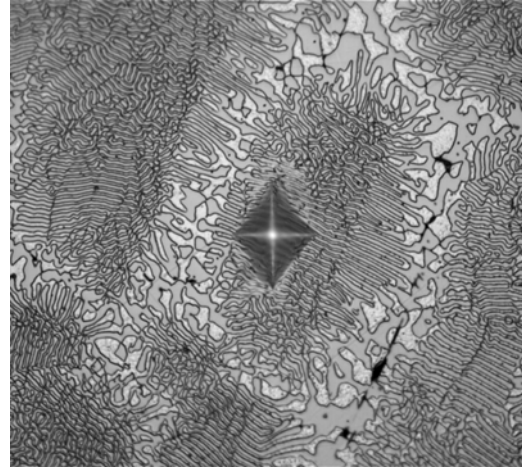
3.3 Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümlerinde, şematik yapısı *Future Tech FM-700* model dijital mikrosertlik test cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, 10 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500 g ve 1000 g'lık yük uygulayabilen %5 hassasiyette ölçüm alabilen ve elektronik olarak sertlik değerini kendisi hesaplayabilen bir cihazdır. Kendi üzerinde fotoğraf çekme ünitesi olup $\times 10$, $\times 40$ büyütme değerlerindeki objektiflerle fotoğraf çekebilme özelliklerine sahiptir.

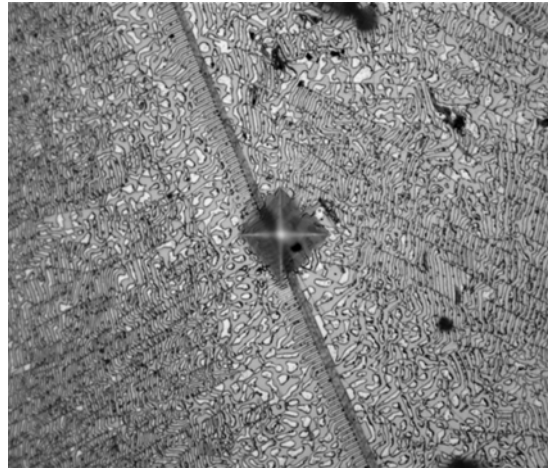
Numuneler sırasıyla test cihazına bağlanarak, her bir numunenin mikrosertlik değeri güvenilirliği artırmak için (HV) 8-12 farklı noktadan ölçülerek ortalaması alınmıştır. Şekil 3.11'de katılaştırılmış Al-33Cu-2Si, şekil 3.12'de Al-33Cu-2Sb ve şekil 3.13'de Al-33Cu-2Co alaşım sistemlerinde enine kesitten alınan mikrosertlik ölçümleri esnasında sertlik ölçüm cihazının numunelerde oluşturduğu izleri gösteren örnek *SEM* fotoğrafları verilmektedir.



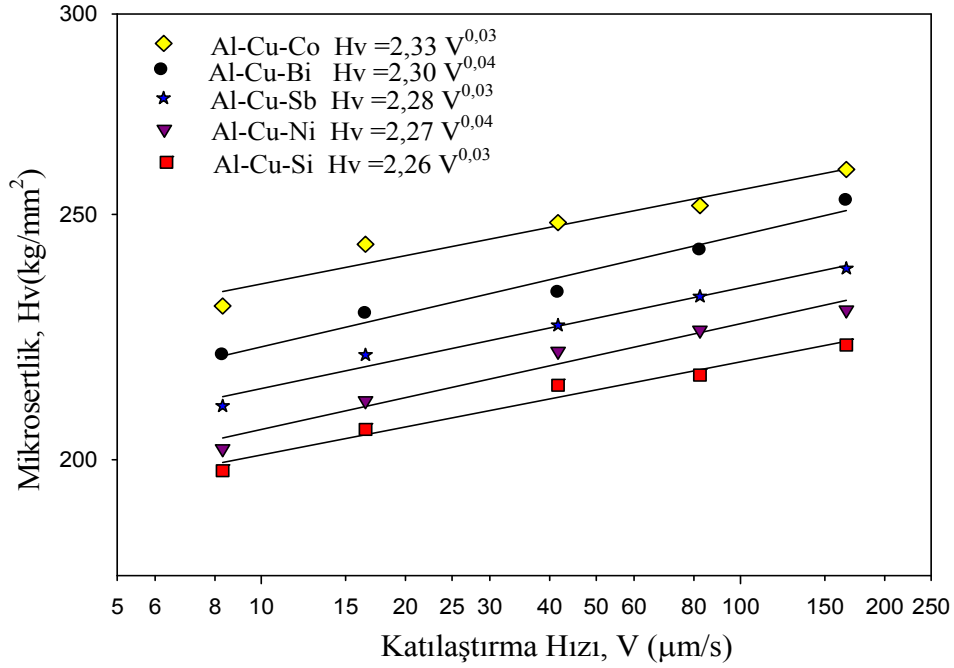
Şekil 3.11 Al-33Cu-2Si alaşımının sertlik iz fotoğrafı.



Şekil 3.12 Al-33Cu-2Sb alaşımının sertlik iz fotoğrafı,



Şekil 3.13 Al-33Cu-2Co alaşımının sertlik iz fotoğrafı.



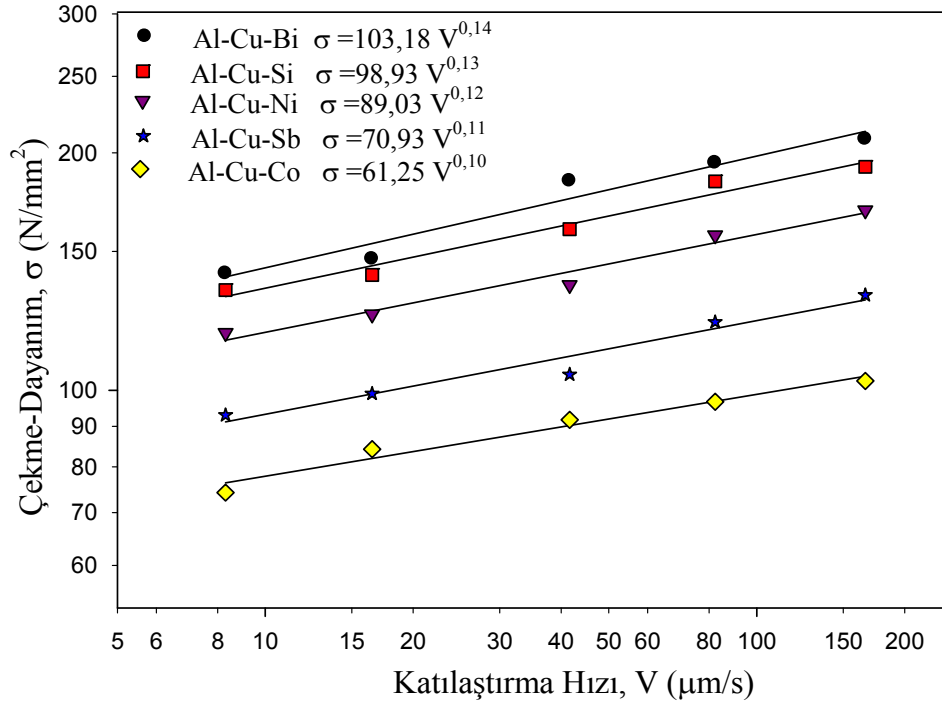
Şekil 3.14 Doğrusal katılaştırılmış Al-33Cu-2x(x=Si-Bi-Sb-Ni-Co) alaşımları için mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı.

Al-33Cu ötektik alaşımına yapılan farklı katkı malzemesinin ölçülen sertlik şekil 3.14’de görüldüğü gibi sertlik değerleri 0,04 ve 0,03 üstel değerleri ile artmaktadır. Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi en düşük sertlik değerine sahip malzeme Al-Cu-Si iken, en yüksek sertlik değerine sahip malzeme ise Al-Cu-Co olarak ölçülmüştür. Al-33Cu-2Co, Al-33Cu-2Sb ve Al-33Cu-2Si 0,03 üstel değeri ile artarken, Al-33Cu-2Ni ve Al-33Cu-2Bi 0,04 üstel değeri ile artmaktadır.

3.4 Çekme Dayanım Ölçümleri

Döküm fazındaki numunelerin mikroyapı ölçümleri ve sertlik değerlerinin belirlenmesinden sonra, 2. Bölüm’de anlatıldığı gibi çekme–dayanım testine geçilmiştir. Her bir numune en az 50 mm uzunluğunda kesilerek, çekme–dayanım test cihazına çeneleri arasında sıkıştırıldıktan sonra, 20 mm/dak’lık hızlarda çekme yapılarak kopması sağlanmış ve çekme–dayanım değerleri, MPa cinsinden ölçülmüştür. Ölçülen çekme–dayanım değerleri değişen katkı malzemelerine göre ayrı ayrı incelenmiştir.

Şekil 3.15’de Al-33Cu ötektik alaşımına yapılan katkı malzemelerine göre çekme dayanım testlerinden elde edilen ölçüm sonuçları verilmektedir.



Şekil 3.15 Doğrusal katılaştırılmış Al-33Cu-2x(x=Si-Bi-Sb-Ni-Co) alaşımları için çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı.

Şekilden de anlaşıldığı gibi elde edilen ölçümlerde en düşük çekme-dayanım değerine sahip numune Al-33Cu-2Co, en yüksek çekme-dayanım değerlerine sahip numune ise Al-33Cu-2Bi olarak ölçülmüştür. Al-33Cu-2Bi 0,14 üstel değeri ile, Al-33Cu-2Si 0,13 üstel değeri ile, Al-33Cu-2Ni 0,12 üstel değeri ile, Al-33Cu-2Sb 0,11 üstel değeri ile, Al-33Cu-2Co 0,10 üstel değeri ile artmaktadır.

3.5 Elektriksel Özdirenç Ölçümleri

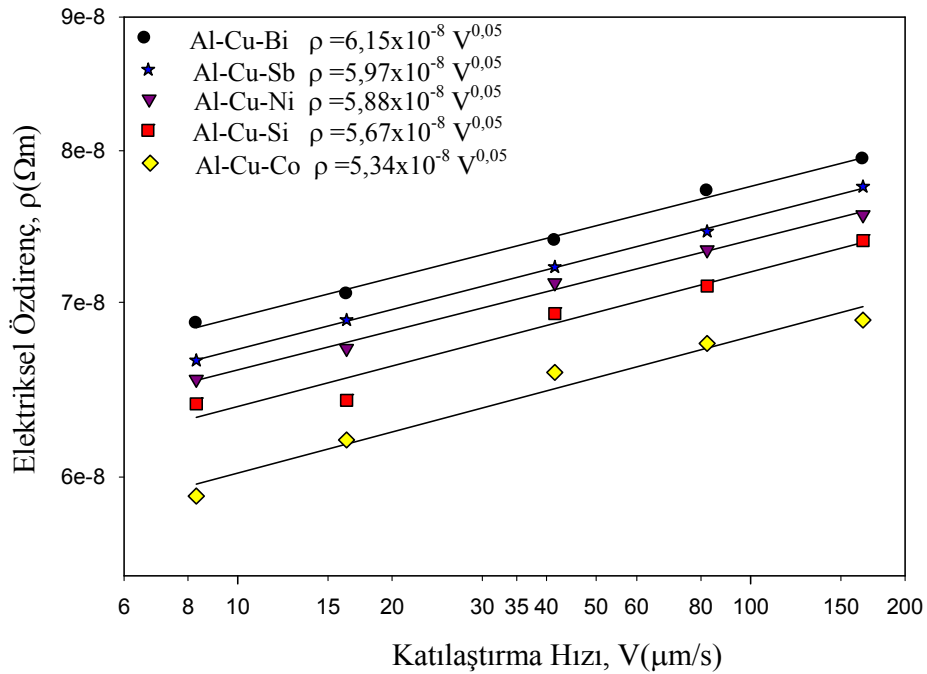
Malzemelerin elektriksel özellikleri belirlemek için dört nokta (four probe) yöntemi çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Numune yüzeyinde dört noktadan kontak yapılır. Kontaklardan ikisi akım kaynağında diğer ikisi de voltaj ölçümünde kullanılır. Dört nokta yönteminin kullanılmasıyla metal prob ve malzeme arasındaki kontak direnci ve diğer prob ve yayılma direnci gibi dirençler elimine

edilir. Voltaj düşmesi ve akım ölçülerek elektriksel özdirenç ve iletkenlik sırasıyla ($\rho=2\pi s(V/I)$) ve ($\sigma=1/\rho$) bağıntılarıyla hesaplanır. Burada ρ özdirenç, σ iletkenlik katsayısı, V voltaj düşmesi, I akım ve s içteki iki prob çifti arasındaki mesafedir.

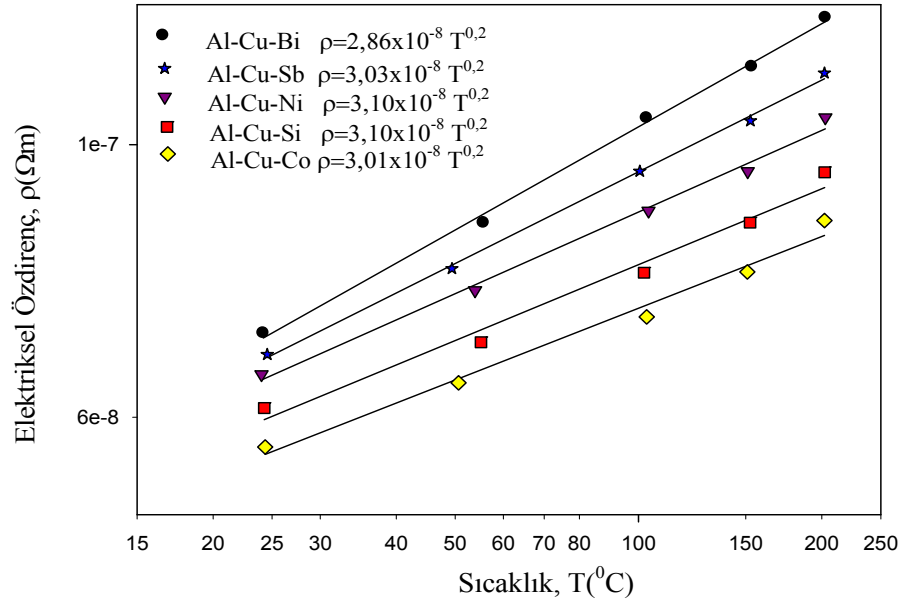
Elektriksel özdirenç ölçümleri dört nokta iletkenlik ölçüm metodu ile yapılmıştır. Ölçümler için **Keithley 2400** marka programlanabilir güç kaynağı, **Keithley 2700** marka multimetre ve **Norterm** marka kül fırınından faydalanılmıştır.

Doğrusal katılaştırılmış numunelerin farklı hızlardaki elektriksel özdirenç değerleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Tablo 3.1’de verilmiştir. Özdirençin (ρ) oda sıcaklığında katılaştırma hızına göre değişimi Şekil 3.16 ‘de verilmiştir. Şekildende görüldüğü gibi Al-Cu-x ($x=Co, Bi, Ni, Sb$ ve Si) alaşımları 0,05 üstel değeri ile artmaktadır.

Ayrıca Al-Cu-x ($x=Co, Bi, Ni, Sb$ ve Si) alaşım sistemlerinin özdirenci, aratan sıcaklığa bağlı olarak değişimi gözlenmiştir. Bu ölçüm, 25-250 °C sıcaklık aralığında belli bir sıcaklık artış hızında yapılmış, elde edilen sonuçlar Şekil 3.17’de verilmiştir. Şekil 17’den de görüldüğü gibi, artan sıcaklıkla elektriksel özdirenç değerde 0,2 üstel değeri ile artmaktadır.



Şekil 3.16. Doğrusal katılaştırılmış Al-33Cu-2x ($x=Si-Bi-Sb-Ni-Co$) alaşımları için elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntıları.



Şekil 3.17. . Doğrusal katılaştırılmış Al-33Cu-2x(x=Si-Bi-Sb-Ni-Co) alaşımları için elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklık ile değişimi ve elde edilen bağıntıları.

Tablo 3.2. Al-Cu-Si, Al-Cu-Bi, Al-Cu-Ni, Al-Cu-Sb, Al-Cu-Co alaşımlarına ait deneysel ölçüm sonuçları, elde edilen bağıntılar, kolerasyon katsayıları ve sabitler.

Kompozisyon	G(K/mm)	V (mm/s)	$\lambda \times 10^{-3}$ (mm)	HV (kg/mm ²)	σ (MPa)	$\rho \times 10^{-5}$ (Ω mm)
Al-%33Cu-%2Si	8.890	0.008	3.8310	198.0	134.0	6.10
		0.016	3.3180	205.57	140.0	6.17
		0.041	2.6380	208.0	160.0	6.43
		0.0823	2.1878	213.0	184.0	6.50
		0.1663	1.7517	217.0	192.0	6.73
Kompozisyon	G(K/mm)	V (mm/s)	$\lambda \times 10^{-3}$ (mm)	HV (kg/mm ²)	σ (MPa)	$\rho \times 10^{-5}$ (Ω mm)
Al-%33Cu-%2Bi	8.234	0.0083	2.8310	220.0	140.60	6.87
		0.0165	2.3180	228.42	146.65	7.05
		0.0416	1.4980	232.85	184.22	7.39
		0.0823	1.0978	242.0	194.10	7.72
		0.1663	0.8517	253.14	208.13	7.73
Kompozisyon	G(K/mm)	V (mm/s)	$\lambda \times 10^{-3}$ (mm)	HV (kg/mm ²)	σ (MPa)	$\rho \times 10^{-5}$ (Ω mm)
Al-%33Cu-%2Ni	8.294	0.0083	2.4846	202.00	118.20	6.54
		0.0163	1.9460	211.00	124.79	6.72
		0.0415	1.2500	220.71	135.94	7.12
		0.0823	0.9790	225.00	157.20	7.33
		0.1657	0.7010	229.14	169.11	7.56
Kompozisyon	G(K/mm)	V (mm/s)	$\lambda \times 10^{-3}$ (mm)	HV (kg/mm ²)	σ (MPa)	$\rho \times 10^{-5}$ (Ω mm)
Al-%33Cu-%2Sb	8,764	0.0083	2.6465	198.0	93.00	6.65
		0.0163	2.1000	205.57	99.00	6.89
		0.0415	1.3800	208.0	104.70	7.22
		0.0823	1.0200	213.0	122.00	7.45
		0.1655	0.7700	217.0	132.00	7.75

Alaşım (% ağ.)	G(K/m m)	V (mm/s)	$\lambda \times 10^{-3}$ (mm)	HV (kg/mm ²)	σ (MPa)	$\rho \times 10^{-5}$ (Ω mm)
Al-%33Cu-%2Co	8,036	0.0083	2.2240	220.00	74.20	5.90
		0.0163	1.7120	243.28	84.23	6.20
		0.0415	1.1300	248.14	91.74	6.58
		0.0823	0.8340	252.00	96.70	6.75
		0.1663	0.6620	260.42	102.79	6.89
Alaşım (% ağ.)	Elde edilen bağıntılar	Sabitler (k)		Kolerasyon katsayıları (r)		
Al-%33Cu-%2Si	$\lambda = k_1(V)^{-0.26}$	$k_1=0.001 \text{ (mm}^{1.26} \cdot \text{s}^{-0.26}\text{)},$		$r_1 = 0.997$		
Al-%33Cu-%2Bi	$\lambda = k_1(V)^{-0.40}$	$k_1=4.13 \text{ (mm}^{1.40} \cdot \text{s}^{-0.40}\text{)},$		$r_1 = 0.997$		
Al-%33Cu-%2Sb	$\lambda = k_1(V)^{-0.42}$	$k_1=3.61 \text{ (mm}^{1.42} \cdot \text{s}^{-0.42}\text{)},$		$r_1 = 0.999$		
Al-%33Cu-%2Ni	$\lambda = k_1(V)^{-0.42}$	$k_1=3.31 \text{ (mm}^{1.42} \cdot \text{s}^{-0.42}\text{)},$		$r_1 = 0.998$		
Al-%33Cu-%2Co	$\lambda = k_1(V)^{-0.41}$	$k_1=3.06 \text{ (mm}^{1.41} \cdot \text{s}^{-0.41}\text{)},$		$r_1 = 0.998$		
Alaşım (% ağ.)	Mikrosertlik iin Elde Edilen Bağıntılar	Sabitler (k)		Kolerasyon katsayıları (r)		
Al-%33Cu-%2Co	$Hv = k_2(V)^{0.03}$	$k_2=278.41 \text{ (kg.mm}^{-2.03} \cdot \text{s}^{-0.03}\text{)},$		$r_2 = 0.968$		
Al-%33Cu-%2Bi	$Hv = k_2(V)^{0.04}$	$k_2=271.21 \text{ (kg.mm}^{-2.04} \cdot \text{s}^{-0.04}\text{)},$		$r_2 = 0.984$		
Al-%33Cu-%2Sb	$Hv = k_2(V)^{0.03}$	$k_2=256.30 \text{ (kg.mm}^{-2.03} \cdot \text{s}^{-0.03}\text{)},$		$r_2 = 0.999$		
Al-%33Cu-%2Ni	$Hv = k_2(V)^{0.04}$	$k_2=249.21 \text{ (kg.mm}^{-2.04} \cdot \text{s}^{-0.04}\text{)},$		$r_2 = 0.983$		
Al-%33Cu-%2Si	$Hv = k_2(V)^{0.03}$	$k_2=237.21 \text{ (kg.mm}^{-2.03} \cdot \text{s}^{-0.03}\text{)},$		$r_2 = 0.985$		

Alaşım (% ağ.)	Mikrosertlik iin Elde Edilen Bağıntılar	Sabitler (k)	Kolerasyon katsayıları (r)
Al-%33Cu-%2Co	$Hv = k_3(\lambda)^{-0.08}$	$k_3 = 141.33 \text{ (kg.mm}^{-1.92}\text{)},$	$r_3 = 0.987$
Al-%33Cu-%2Bi	$Hv = k_3(\lambda)^{-0.08}$	$k_3 = 134.10 \text{ (kg.mm}^{-1.92}\text{)},$	$r_3 = 0.980$
Al-%33Cu-%2Sb	$Hv = k_3(\lambda)^{-0.08}$	$k_3 = 126.75 \text{ (kg.mm}^{-1.92}\text{)},$	$r_3 = 0.990$
Al-%33Cu-%2Si	$Hv = k_3(\lambda)^{-0.1}$	$k_3 = 109.3 \text{ (kg.mm}^{-1.90}\text{)},$	$r_3 = 0.973$
Al-%33Cu-%2Ni	$Hv = k_3(\lambda)^{-0.09}$	$k_3 = 237.21 \text{ (kg.mm}^{-1.91}\text{)},$	$r_3 = 0.980$
Alaşım (% ağ.)	ekme Dayanmı iin Elde Edilen Bağıntılar	Sabitler (k)	Kolerasyon katsayıları (r)
Al-%33Cu-%2Bi	$\sigma = k_4(V)^{0.14}$	$k_4 = 274.52 \text{ (MPa.mm}^{-0.14} \cdot \text{s}^{0.14}\text{)},$	$r_4 = 0.977$
Al-%33Cu-%2Si	$\sigma = k_4(V)^{0.13}$	$k_4 = 246.18 \text{ (MPa.mm}^{-0.13} \cdot \text{s}^{0.13}\text{)},$	$r_4 = 0.986$
Al-%33Cu-%2Ni	$\sigma = k_4(V)^{0.12}$	$k_4 = 209.88 \text{ (MPa.mm}^{-0.12} \cdot \text{s}^{0.12}\text{)},$	$r_4 = 0.986$
Al-%33Cu-%2Sb	$\sigma = k_4(V)^{0.11}$	$k_4 = 161.11 \text{ (MPa.mm}^{-0.11} \cdot \text{s}^{0.11}\text{)},$	$r_4 = 0.978$
Al-%33Cu-%2Co	$\sigma = k_4(V)^{0.10}$	$k_4 = 125.58 \text{ (MPa.mm}^{-0.10} \cdot \text{s}^{0.10}\text{)},$	$r_4 = 0.984$

Alaşım (% ağ.)	Çekme Dayanımı için Elde Edilen Bağıntılar	Sabitler (k)	Kolerasyon katsayıları (r)
Al-%33Cu-%2Si	$\sigma = k_5(\lambda)^{-0.50}$	$k_5=8.194 \text{ (MPa.mm}^{0.50}\text{)},$	$r_5 = 0.985$
Al-%33Cu-%2Bi	$\sigma = k_5(\lambda)^{-0.30}$	$k_5=18.83 \text{ (MPa.mm}^{0.30}\text{)},$	$r_5 = 0.984$
Al-%33Cu-%2Ni	$\sigma = k_5(\lambda)^{-0.29}$	$k_5=20.25 \text{ (MPa.mm}^{0.29}\text{)},$	$r_5 = 0.982$
Al-%33Cu-%2Sb	$\sigma = k_5(\lambda)^{-0.28}$	$k_5=17.14 \text{ (MPa.mm}^{0.28}\text{)},$	$r_5 = 0.979$
Al-%33Cu-%2Co	$\sigma = k_5(\lambda)^{-0.25}$	$k_5=16.56 \text{ (MPa.mm}^{0.25}\text{)},$	$r_5 = 0.982$
Alaşım (% ağ.)	Elektriksel Özdirenç için Elde Edilen Bağıntılar	Sabitler (k)	Kolerasyon katsayıları (r)
Al-%33Cu-%2Bi	$\rho = k_6(V)^{0.05}$	$k_6=8.69 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{0.95} \cdot \text{s}^{0.05}\text{)},$	$r_6 = 0.997$
Al-%33Cu-%2Sb	$\rho = k_6(V)^{0.05}$	$k_6=8.47 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{0.95} \cdot \text{s}^{0.05}\text{)},$	$r_6 = 0.999$
Al-%33Cu-%2Ni	$\rho = k_6(V)^{0.05}$	$k_6=8.29 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{0.95} \cdot \text{s}^{0.05}\text{)},$	$r_6 = 0.997$
Al-%33Cu-%2Si	$\rho = k_6(V)^{0.05}$	$k_6=8.09 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{0.95} \cdot \text{s}^{0.05}\text{)},$	$r_6 = 0.980$
Al-%33Cu-%2Co	$\rho = k_6(V)^{0.05}$	$k_6=7.65 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{0.95} \cdot \text{s}^{0.05}\text{)},$	$r_6 = 0.984$
Alaşım (% ağ.)	Elektriksel Özdirenç için Elde Edilen Bağıntılar	Sabitler (k)	Kolerasyon katsayıları (r)
Al-%33Cu-%2Bi	$\rho = k_7(\lambda)^{-0.12}$	$k_7=3.38 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{1.12}\text{)},$	$r_7 = 0.999$
Al-%33Cu-%2Sb	$\rho = k_7(\lambda)^{-0.11}$	$k_7=3.48 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{1.11}\text{)},$	$r_7 = 0.997$
Al-%33Cu-%2Ni	$\rho = k_7(\lambda)^{-0.11}$	$k_7=3.23 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{1.11}\text{)},$	$r_7 = 0.998$
Al-%33Cu-%2Si	$\rho = k_7(\lambda)^{-0.12}$	$k_7=3.02 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{1.12}\text{)},$	$r_7 = 0.991$
Al-%33Cu-%2Co	$\rho = k_7(\lambda)^{-0.12}$	$k_7=3.01 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{..mm}^{1.12}\text{)},$	$r_7 = 0.996$

KAYNAKLAR

- 1-PORTER D.A., Easterling K.E., *Phase Transformation in Metals and Alloys*, Van Nostrand and Reinhold, New York (1984) 217-223.
- 2-GÜNDÜZ M., *The Measurement of The Solid-Liquid Energy*, Ph. D Thesis, Oxford University, Oxford, (1984).
- 3-DAVIES G.J., *Solidification And Casting*, John Wiley and Sons, New York., (1973).
- 4-BECKER R., Döring W., Kinetics Behandlung der Keimbildung in Übersättigte Dämpfen, *Annual Physics*, 24, 719, (1953).
- 5-TURNBULL D., Fisher J.C., Rate of Nucleation in Condensed System, *Journal of Chemical Physics*, 17, 71-73, (1949).
- 6-TURNBULL D., Kinetics of Heterogeneous Nucleation, *Journal of Chemical Physics*, 18, 198-203, (1950).
- 7-MIYAZAWA Y., Pound G.M., Homogeneous Nucleation of Crystalline Gallium from Liquid Gallium, *Journal of Crystal Growth*, 23, 45, (1974).
- 8-ROBERT M.B., Robert, B.G., Arthur, P., *Structure and Properties of Alloys*, Mc Graw- Hill, New York, (1965), 68-73.
- 10-BILLIA, B., Trivedi R., *Pattern Formation in Crystal Growth*, Ed.D.T.J. Hurle, Handbook of Crystal Growth, Elsevier Science Publishers B.V.,Amsterdam, Netherlands, (1993) 901-1026.
- 11-EDWARDS L., Endean M., *Manufacturing with Materials* , The Open University Press, (1990) 86-87.
- 12-MASON J.T., Verhoeven J.D., Trivedi R., Primary Dendrite Spacing: I Experimental Studies, *Journal of Crystal Growth*, 59, 516-524, (1982).
- 13-COLLING D.A., *Industrial materials, Metals and Alloys*, Prentice - Hall Inc., Ohio, (1995).
- 14-P.F.Kane, G.B.Larrabee, , “Characterization of Semiconductor Materials”,McGraw Hilll Book Co., U.S.A., 4, 1970.
- 15-Kenneth Barbalace <http://klbprouctions.com/>. Periodic Table of Elements - Sorted by Electrical Conductivity. EnvironmentalChemistry.com. 1995-2009. Accessed on line: 8/3/2009
- 16-Caignan A.G., Holt E.M.;New 1,4-dihydropyridine Derivates with Hetero, Saturated B Rings, *Journal of Chemical Crystallography* 32 (2002) 315-323
- 17-Yamashita, M., “Resistivity Correction Factor for the Four-Probe Method”, *J.Phys. E: Sci. Instrum.*, 20 (1987) 1454-1456.
- 18-S. Dutta, V. Shubha, T.G. Ramesh, Florita D’Sa, Thermal and electronic properties of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloys ,*Journal of Alloys and Compounds* 467 (2009) 305–309
- 19-J. Liang, S. Downes, N. Dariavach, D. Shangguan, and S.M. Heinrich: *J. Electron. Mater.*, 2004, vol. 33, pp. 1507–15.
- 20-JORDAN R. M. and Hunt J. D., The Growth of Lamellar Eutectic Structure in the Pb-Sn and Al-CuAl System, *Metallurgical and Materials Transactions*, 2, 3401-3410, (1971).
- 21-KAYA H., *İkili Ötektik Alaşımların Doğrusal Katılaştırılması ve Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2001).
- 22- S. Farahany, A. Ourdjini, M.H. Idrisi, S.G. Shabestari, Evaluation of the Effect of Bi, Sb, Sr and Cooling Condition on Eutectic Phases in an Al-Si-Cu Alloy (ADC12) by in Situ Thermal Analysis, *Thermochimica Acta* 559, 59-68, (2013)
- 23- Duško Minic, Milena Premovic, Vladan Cosovic, Dragan Manasijevic, Dragana Zivkovic, Ana

- Kostov, Nadezda Talijan, Experimental investigation and thermodynamic calculations of the Al–Cu Sb phase diagram, *Journal of Alloys and Compounds*, 555 347-356 (2013)
- 24- CHAO-HONG WANG, SINN-WEN CHEN, CHIA-HUA CHANG, JEN-CHIN WU, Phase Equilibria of the Ternary Al-Cu-Ni System and Interfacial Reactions of Related Systems at 800 8C, *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, 34A, 2003—209
- 25- I. Yamauchi , M. Ohmori , I. Ohnaka, Rapid solidification and mechanical alloying of Al–Co–Cu ternary alloys for chemical leaching, *Journal of Alloys and Compounds* 299 276–282 (2000)

