

## Yüksek Hızlarda Doğrusal Katılaştırma Sonucu Zn-Al Ötektik Alaşımının Mikroyapı ve Mikrosertlik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi

Ümit BAYRAM\*, 1, 2

\*1 Abdullah Gül Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı (AGU-CRF), Kayseri, Türkiye

\*2 Erciyes Üniversitesi, Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (ERNAM), Kayseri, Türkiye

(Alınış / Received: 08.07.2024, Kabul / Accepted: 01.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

### Anahtar Kelimeler

Doğrusal Katılaştırma,  
Zn-Al Alaşımı,  
Mikroyapı,  
Mekanik Özellikler.

**Öz:** İnşaat sektöründeki çelik sacların kaplaması ve işlenebilir fabrikasyon parçalarının üretimi gibi çok geniş bir uygulama alanında aktif olarak kullanılan Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımının faz diyagramı üzerinde bileşenin belirlenmesi sonrasında doğrusal olarak katılaştırma deneyleri, sabit sıcaklık gradyanında ( $G=4.25$  K/mm) ve geniş bir katılaştırma hızı aralığında ( $V=8.25-2032.19$   $\mu\text{m/s}$ ) Bridgman tipi katılaştırma fırını ile gerçekleştirildi. Karakterizasyon çalışmaları için SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) ve SEM-EDX (Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi) kullanıldı ve mikrosertlik (HV) değerleri Future-Tech FM-700 model mikrosertlik cihazı kullanılarak elde edildi. Düşük ( $V=8.25-165.68$   $\mu\text{m/s}$ ), yüksek ( $V=516.23-2032.19$   $\mu\text{m/s}$ ) ve tüm ( $V=8.25-2032.19$   $\mu\text{m/s}$ ) katılaştırma hızı değerlerinin ( $V$ ) hem ötektik mesafe ( $\lambda$ ) ve hem de mikrosertlik (HV) üzerine olan etkisi lineer regresyon analizi ile ayrı ayrı hesaplanarak araştırılmıştır. Artan katılaştırma hızı ( $V$ ) değerlerine bağlı olarak ötektik mesafe ( $\lambda$ ) değerleri azalma ve mikrosertlik (HV) değerleri ise artma eğilimi göstermektedir. Çalışmanın tüm sonuçları literatürdeki benzer hız aralıklarına sahip deneysel çalışmalar ve Jackson-Hunt ötektik teorisi ile karşılaştırıldı. Sonuç olarak, Jackson-Hunt ötektik teorisinin, standart katılaştırma hızı aralığını ( $\sim V=7.5-300.0$   $\mu\text{m/s}$ ) aşan yüksek katılaştırma hızlarına uygulanmadığı, ayrıca alaşımın 350.0  $\mu\text{m/s}$  civarında ötektik teoriden uzaklaşmaya başladığı kritik katılaştırma hızına sahip olabileceği ifade edildi.

## Investigation of Changes in Microstructure and Microhardness Properties of Zn-Al Eutectic Alloy as a Result of Directionally Solidification at High Velocities

### Keywords

Directional Solidification,  
Zn-Al Alloy,  
Microstructure,  
Mechanical Properties.

**Abstract:** After determining its component on the phase diagram of the Zn-5.0% Al (wt.%) eutectic alloy, which is actively used in a wide range of application areas such as coating of steel sheets in the construction industry and the production of machinable fabricated parts, directional solidification experiments were carried out at a constant temperature gradient ( $G=4.25$  K/mm) and an extensive growth rate range ( $V=8.25-2032.19$   $\mu\text{m/s}$ ), using a Bridgman type solidification furnace. SEM (Scanning Electron Microscope) and SEM-EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) were used for characterization studies, and microhardness (HV) values were obtained using the Future-Tech FM-700 model microhardness device. The effect of low ( $V=8.25-165.68$   $\mu\text{m/s}$ ), high ( $V=516.23-2032.19$   $\mu\text{m/s}$ ) and all ( $V=8.25-2032.19$   $\mu\text{m/s}$ ) growth rate values ( $V$ ) on both eutectic distance ( $\lambda$ ) and microhardness (HV) was investigated by calculating them separately with linear regression analysis. Depending on the increasing growth rate ( $V$ ) values, eutectic distance ( $\lambda$ ) values tend to decrease and microhardness (HV) values tend to increase. All results of the study were compared with experimental studies with similar rate ranges in the literature and the Jackson-Hunt eutectic theory. In conclusion, it was stated that the Jackson-Hunt eutectic theory could not be applied to high growth rates exceeding the standard solidification rate range ( $\sim V = 7.5-300.0$   $\mu\text{m/s}$ ) and that the alloy may have a critical solidification rate around 350.0  $\mu\text{m/s}$ , where it begins to move away from the eutectic theory.

\*İlgili Yazar, email: umit.bayram@agu.edu.tr

## 1. Giriş

Çinko-Alüminyum (Zn-Al) alaşımları farklı mikroyapısal davranışlarının yanı sıra yüksek ısı direnci, aşınma direnci ve mukavemeti özellikleri ile birçok inşaat, havacılık ve otomotiv endüstrisi gibi çok geniş yapısal uygulama alanlarında döküm alaşımları olarak kullanılmaktadır [1-4]. Zn-Al alaşımlarının teknolojik olarak ilgi çekici mikro yapıya sahip olmalarının bir sonucu olarak, bu alaşımların yüksek mukavemet, sertlik, preslenebilirlik ve fabrikasyon parçalara ideal bir alternatif olması gibi çeşitli özellik ve işleme avantajları nedeniyle dökme demir, bronz ve alüminyumla rekabet edebilir duruma getirmektedir [5-6]. Bu alaşımlar çeşitli mühendislik uygulamalarında maliyet etkisi, çevre dostu olması ve enerji verimliliğine katkı sağlamaları nedeniyle son yıllarda demirli ve demirsiz alaşımların yerine geçebilecek alaşımlar olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir [7-9]. Yaygın olarak kullanılan alüminyum, bakır ve demir bazlı diğer döküm alaşımlarına göre birçok avantajının olduğu bilinmektedir. Alüminyumdan daha sert ve güçlü olmaları, bakırdan çok daha ucuz olmaları ve işlenebilirliklerinin dökme demirden daha iyi olmaları bahsedilen avantajlara örnek olarak verilebilir [10]. Ayrıca, bütün Zn-Al alaşımları, standart çinko alaşımlarına kıyasla yüksek sıcaklıklarda üstün bir korozyon direnci ve performans sunar, bu sayede rulman özelliklerinin önemli olduğu yerlerde uygulanabilir [11-14].

Doğrusal (tek yönlü) katılaştırma üzerine ilk çalışmanın 1960'lı yıllarda türbin kanatlarının üretilmesi için yapılmasından sonra [15], bu metot yalnızca belirli teknolojik alaşımların üretim ve geliştirilmesinde değil, son yıllarda araştırmacıların ikili ve çoklu alaşımların [16-28] üretimi için teorik ve deneysel çalışmaların da merkezinde yer almaktadır. Bu yöntem, alaşımların mikro yapıları, geometrik yapıları ve üretim koşulları arasındaki ilişkiyi anlamak ve ortaya çıkarmak için önemli bir araçtır. Katılaşıma sırasında çekirdeklenme ve büyüme hızlarının kontrolü, katı malzemenin tane boyutu ve şekliyle homojenliğini sağlar. Aynı şekilde, katılaştırma hızının kontrolü, saflaştırma sürecine katkı sağlar. Ayrıca, katılaşıma mekanizmasının bilinmesi, malzemelerin termal, elektriksel ve mekanik özelliklerinin doğrudan kontrol edilmesine katkıda bulunur [16,17,29].

Ötektik alaşımlar, araştırmacılar ve döküm endüstrisi tarafından tercih edilen temel alaşımlardır, çünkü üstün döküm yetenekleri ve mekanik özelliklerinin yanı sıra düşük erime noktalarına sahiptirler [30-32]. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma tekniği, ötektik alaşımların yönlü katılaştırması (kristal büyümesi) için kullanılan ana tekniklerden biridir. Çinko ve alüminyum esaslı alaşımların hacim küçültme sırasında oluşturduğu gerilmeler nedeniyle oluşan distorsiyon ve çatlaklar gibi istenmeyen döküm kusurları, literatürdeki çalışmalarda [33-34] ayrıntıları verilen Bridgman tipi kontrollü katılaştırma tekniği kullanılarak minimum seviyelere indirilebilmektedir.

Literatürde ikili ötektik alaşımlar üzerine yapılan çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre [35-42], doğrusal katılaştırma ile ilgili çalışmalar çoğunlukla  $\sim 7.5\text{--}300.0 \mu\text{m/s}$  katılaştırma hızı aralığına sahip Bridgman tipi kontrollü katılaştırma ekipmanı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, deney sonuçlarından katılaştırma parametrelerinin (Co, G, V) belirlenmesi sonrasında, katılaştırma hızının mikroyapı, elektriksel ve mekaniksel özellikler üzerine olan etkisi incelenmiştir. Buradan yola çıkarak doğrusal katılaştırma çalışmalarında  $450.0 \mu\text{m/s}$ 'den daha yüksek bir katılaştırma hızı ile kontrollü katılaştırmanın sağlanmasının daha zor olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, mevcut çalışmanın amacı, Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için, sabit sıcaklık gradyanında ( $G=4.25 \text{ K/mm}$ ), hem yüksek ( $V=516.23\text{--}2032.19 \mu\text{m/s}$ ) hem de literatürdeki standart katılaştırma hızı aralığında ( $V=8.25\text{--}165.68 \mu\text{m/s}$ ) deneysel çalışmaları gerçekleştirmek ve her bir katılaştırma hızı aralığına bağlı olarak ötektik mesafe ( $\lambda$ ) ve mikrosertlik (HV) değerlerindeki değişimin ilişkisini lineer regrasyon analizi kullanarak ortaya çıkarmaktır. Ötektik yapının tercih edilmesi ile öncelikle alaşımda ortaya çıkan mikroyapı düzenindeki değişim gözlenecek, sonrasında ise mikroyapıdaki mevcut değişimin alaşımların mikrosertliğine olan etkisi incelenecektir.

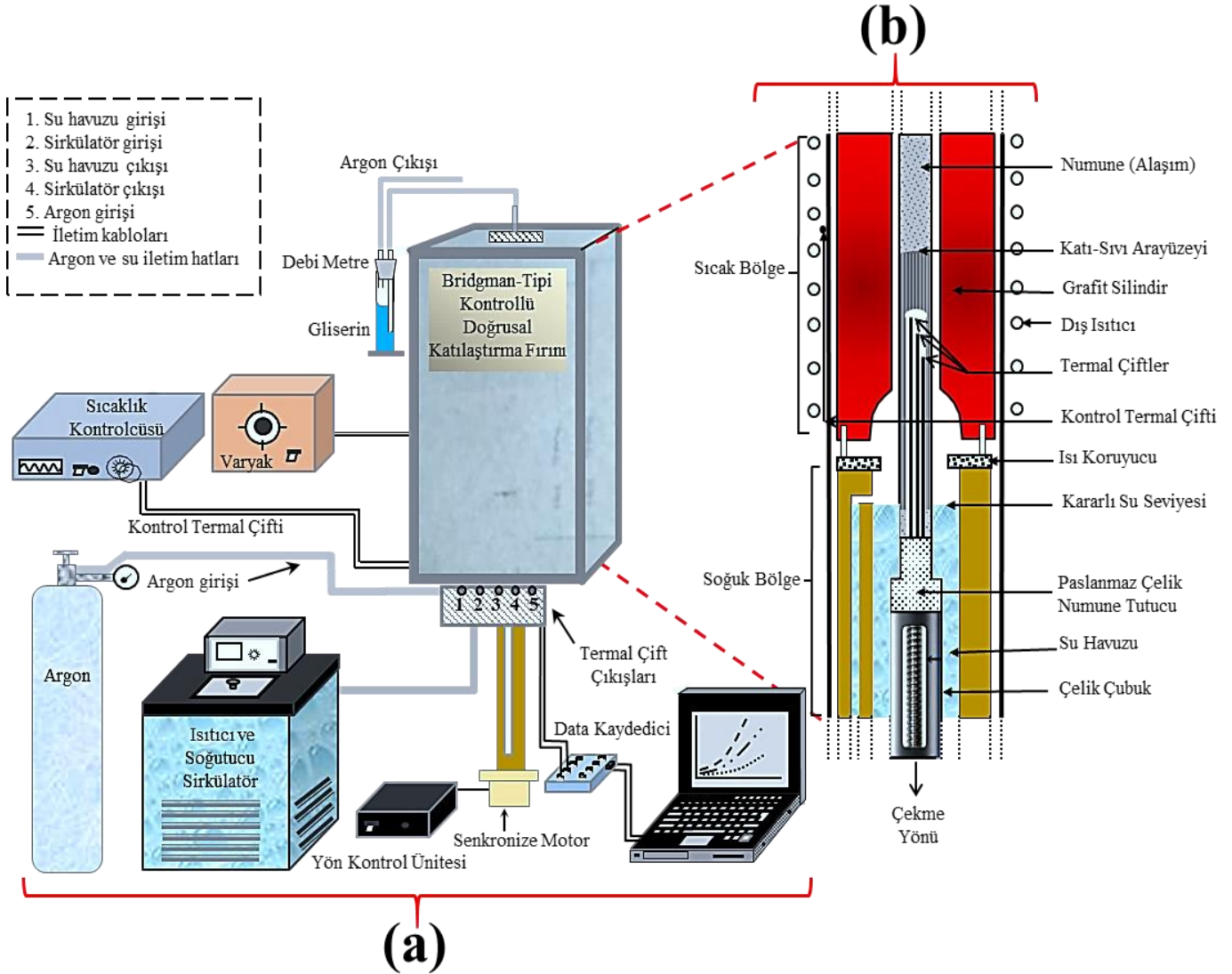
## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmadaki deneysel süreçlerin büyük bir kısmı alaşım hazırlama, doğrusal katılaştırma deneylerinin yapımı, mikroyapıyı gözlemleme, ötektik lamelsel mesafeler ( $\lambda$ ) ve katılaştırma parametrelerinin (G ve V) ölçümü aşamalarını kapsamaktadır. Diğer önemli bir kısım ise alaşımların mekanik özelliklerinden biri olan mikrosertlik (HV) ölçümlerinin yapılmasıdır.

### 2.1. Homojen alaşım üretimi ve doğrusal katılaştırma deneyleri

Deneysel sürecinin ilk aşamasında, arayüzey yapısının bozulmaması ve safsızlıkların arayüzeyde birikmemesi için ötektik alaşımların üretilmesinde yüksek saflığa sahip malzemeler (Alfa Aesar marka - %99.99 saf alüminyum ve %99.95 saf çinko), Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için hesaplanan miktarlarda  $\pm 0.1 \text{ mg}$  duyarlılık ile ölçüm

yapan hassas terazi ile tartıldı. Erime boyunca metallerin oksitlenmesini engellemek ve homojen alaşım oluşumunu sağlamak amacıyla malzemeler vakumlu eritme fırını içerisinde eritildi. Yüksek erime sıcaklığı, metalik malzemelerle tepkiye girmemesi ve en önemlisi de kolay işlenebilir olması gibi özellikleri nedeniyle bu çalışmadaki tüm deneysel çalışmalarda (karıştırıcı çubuk, numune kalıbı, döküm potası) Morgan marka grafit kullanıldı. Daha sonra alaşımın erime sıcaklığının ( $\sim 385^{\circ}\text{C}$ ) yaklaşık  $100^{\circ}\text{C}$  üzerinde olan başka bir özel tasarım döküm fırınında önceden hazırlanmış grafit numune potalarına (dış çap: 6.35 mm, iç çap: 4 mm, uzunluk: 200 mm) döküldü. Eriyik alaşım, döküm boşluğunun oluşmaması için potaların içerisini tamamen doldurulacak şekilde yönlendirilerek 15 dakikalık periyotlar ile grafit çubuk kullanılarak katılaştırıldı. Böylelikle eş zamanlı olarak aynı alaşım ile bütün numune potalarının dolması sağlandı ve numuneler kontrollü katılaştırma deneylerine hazır hale getirildi.



**Şekil 1.**(a) Deney düzeneğinin blok diyagramı, (b) Bridgman-tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınının detayları, (c) Farklı senkron motorlar, (d) Yüksek katılaştırma hızları için tasarlanan motor-çekme sistemi.

Deneylelerin ikinci aşamasında, elde edilen her numune üst kısmında koruyucu bir grafit silindir (dış çap: 40 mm, iç çap: 10 mm, uzunluk: 300 mm) bulunan Bridgman tipi katılaştırma fırınına konuldu, blok diyagram ve ayrıntılar Şekil 1.a ve 1.b'de verilmiştir. Numunelerin doğrusal olarak katılaştırma deneyleri, farklı çekme hızlarına sahip senkron motorlar (Şekil 1.c) ve yüksek katılaştırma hızlarına ulaşmak için özel olarak tasarlanan bir çekme motoru (Şekil 1.d) kullanılarak (Şekil G=4.25 K/mm sabit sıcaklık gradyanında ve 8.25  $\mu\text{m/s}$ 'den 2032.19  $\mu\text{m/s}$ 'e kadar geniş bir katılaştırma hızı aralığında gerçekleştirildi.

Genel olarak deneylerde kullanılan senkron motorların çekme hızları 1 ( $\sim 8 \mu\text{m/s}$ ), 2 ( $\sim 16 \mu\text{m/s}$ ), 5 ( $\sim 40 \mu\text{m/s}$ ), 10 ( $\sim 80 \mu\text{m/s}$ ), 20 ( $\sim 160 \mu\text{m/s}$ ) ve 60 rpm ( $\sim 480 \mu\text{m/s}$ )'dir ve en yüksek çekme hızındaki senkron motor ile (60 rpm) elde edilebilecek maksimum katılaştırma hızı yaklaşık değeri 450.0–500.0  $\mu\text{m/s}$ 'dir. Bu doğrultuda amaçlanan yüksek katılaştırma hızlarına ulaşmak için, bir el matkabı motoru modifiye edilerek farklı bir motor-çekme sistemi tasarlandı (Şekil 1.d). Tablo 1'de, tasarlanan motor-çekme sistemi ile yapılan katılaştırma deneyleri sonucunda hesaplanmış, uygulanan gerilimlere karşı çekme hızları ve aynı zamanda çekme hızlarına karşılık gelen katılaştırma hızı değerleri gösterilmiştir. Alaşım numunelerinin üretilmesinden, Şekil 1'de verilen deneysel prosedürler ve hesaplamalar ile Bridgman tipi katılaştırma fırınına ait bilgilere kadar pek çok teknik bilgi önceki çalışmalarda detaylı olarak verilmiştir [16,17].

**Tablo 1.** Yüksek katılaştırma hızları elde etmek için dizayn edilen sürücü sistemiyle uygulanan gerilimlere karşı motor çekme hızları ve alaşım üzerinde ölçülen katılaştırma hızı değerleri.

Uygulanan Gerilim ( DC Volts )	Motor Çekme Hızı ( $\mu\text{m/s}$ )	Katılaştırma Hızı ( $\mu\text{m/s}$ )
1.0	987.48	516.23
2.1	2059.23	992.75
3.0	3127.65	1544.51
3.8	4074.12	2032.19

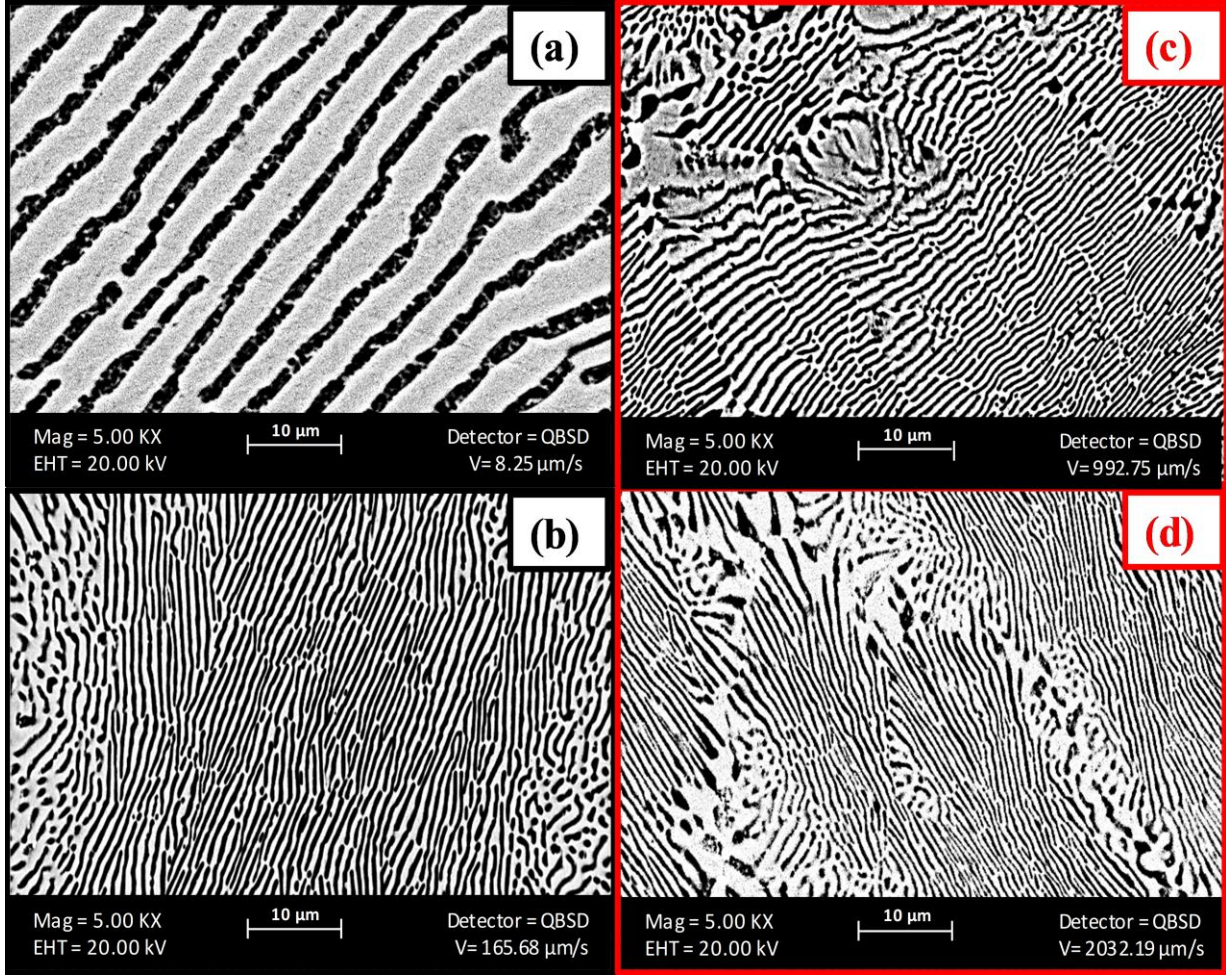
Katılaştırma fırını içerisinde  $\sim 10$  cm kadar katılaştırılan örnek, sıcaklık gradyanını oluşturmak için tasarlanan iç su havuzunun bulunduğu soğuk bölgeye çekilerek quench denilen ani soğutma işlemi ile katılaştırılmıştır. Dikkatli bir şekilde grafit potalardan çıkarılan tüm örneklerin arayüzeyini tespit etmek amacıyla, SiC kağıdı (120, 320, 500, 1000, 2000 grit) ile bir yüzeyi boyunca önce zımparalandı ve daha sonra parlatıldı. Arayüzeyin bulunduğu boyuna kesitler ve arayüzeye yakın olabilecek yerdeki enine kesitler uygun mesafelerde kesildi. Sonrasında metalografik işlemler için bu kesitler 7/1 oranı ile hazırlanan epoksi ve sertleştirici kimyasalları kullanılarak kalıplanması yapıldı. Otomatik parlatma robotu (Struers TegraPol-15) ile parlatma ve zımparalama işlemlerinin tamamlanması sonrasında mikroyapıya ait özellikleri gözlemlemek için kimyasal dağlama işlemi uygulandı. Son olarak, Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı, 90 ml su ve 10 ml hidroflorik asit (%10 HF) ile karıştırılarak elde edilmiş çözeltiye 35–40 saniye boyunca daldırılarak dağlandı ve mikroyapıların ortaya çıkması sağlandı.

## 2.2. Mikroyapının gözlemlenmesi ile ötektik lamelsel mesafeler ( $\lambda$ ) ve katılaştırma parametrelerinin ölçümleri (G ve V)

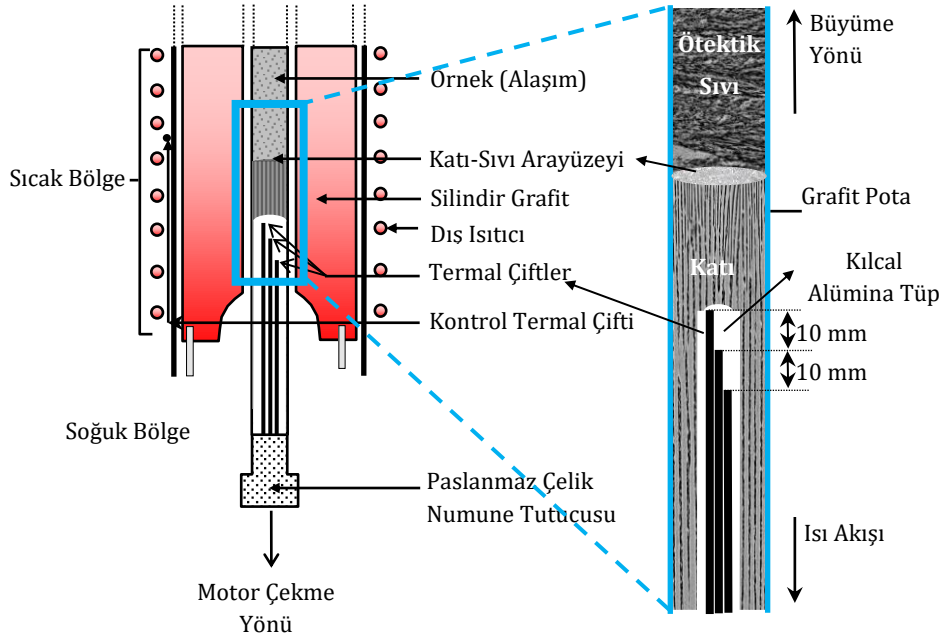
Bu çalışmadaki numunelerin karakterizasyon çalışmaları aşamasında, oluşan mikro yapı görüntüleri, hem faz tanımlamasını hem de bileşimi belirlemek amacıyla SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu-Zeiss GeminiSEM 300) ve SEM-EDX (Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi) ile çekildi. Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için doğrusal katılaştırılmış örneklerde hem düşük hem de yüksek katılaştırma hızlarına ait bazı mikroyapı resimleri Şekil 2'de verilmiştir. SEM cihazı ile görüntüleme yapmadan önce, örnekler Quorum-Q150R Plus marka kaplama cihazı içerisine konularak 10 nm tabaka kalınlığına sahip altın (Au) tabaka ile kaplanmıştır. Bu işlemin amacı, elektron demetinin yüzeyden daha verimli şekilde saçılmasını sağlamak ve görüntü çözünürlüğünü artırmaktır.

Alaşım içindeki sıcaklıkları ölçmek için grafit pota içerisine önceden yerleştirilen ve kılcal seramik alümina tüp ile yalıtılmış olan üç adet K-tipi termal çiftin Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını ve numune içerisindeki konumu Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu termal çiftler 10 mm aralıklarla sabitlenmiş ve 0,25 mm çapına sahiptir. Bilgisayara bağlı data kaydedici ile katı-sıvı arayüzeyi ikinci termal çiftte olduğunda, birinci ve ikinci termal çift arasındaki sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) ve katı-sıvı arayüzeyinin Şekil 3'te görseli verilen mesafelerle ( $\Delta X$ ) ayrılmış termal çiftlerden geçmesi için geçen süre ( $\Delta t$ ) okundu. Her numune için ayrı ayrı kaydedilen  $\Delta T$ ,  $\Delta X$  ve  $\Delta t$  değerleri kullanılarak, katılaştırma hızı ( $V = \Delta X / \Delta t$ ) ve sıcaklık gradyanı ( $G = \Delta T / \Delta X$ ) değerleri belirlendi. Fırının sıcak bölgesi

ile soğuk olan bölgesi ve aralarındaki mesafe sabit tutulduğu için katı-sıvı ara yüzeyindeki sıcaklık gradyan değeri (G) katılaştırma deneyleri boyunca sabit tutulabildi. G ve V'nin hesaplanması ile  $\Delta t$ ,  $\Delta X$  ve  $\Delta T$  değerlerinin elde edilmesinin detayları ilgili kaynaklardaki çalışmalarda verilmektedir [16,17].



Şekil 2. Doğrusal olarak katılaştırılan Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için enine kesitlerden alınan bazı SEM görüntüleri.

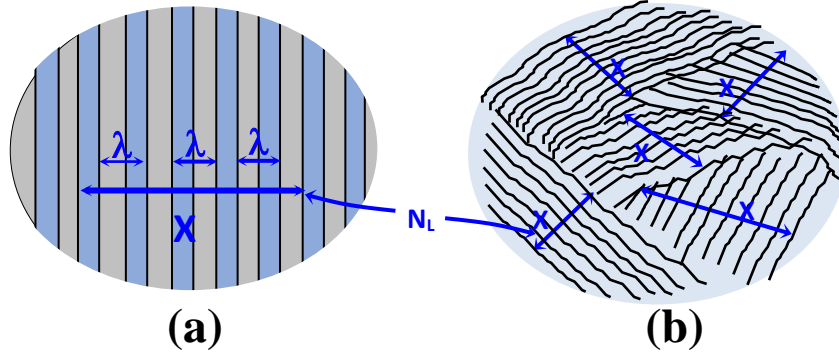


Şekil 3. Kontrollü katılaştırma fırını içerisinde konulan numune yapısı ve ayrıntıları.

Düşük katılaştırma hızları ( $\lambda_D$ ), yüksek katılaştırma hızları ( $\lambda_Y$ ) ve tüm katılaştırma hızları için ( $\lambda_T$ ) lamelsel yapıdaki ötektik mesafe değerleri en az 5 farklı bölgeden 50 ölçüm yapılarak enine kesite (çekme yönüne dik) ait SEM görüntülerinden elde edilmiştir. Bu görüntülerin kullanılmasındaki odaklanılan önemli nokta; katılan örnek yüzeyi üzerinde mevcut lamelsel yapıların tamamının gözlenebilmesi sebebiyle enine kesitlerden alınan ölçümler boyuna kesitlerde yapılan ölçümlerden daha güvenilir olmasıdır. Enine kesitleri alınan örneklerin Şekil 4'te şematik gösterimi verilen linear kesişim (linear intercept) metodu [43] yardımıyla, SEM görüntüleri üzerinden Image ProPlus programı kullanılarak birbirini tekrar eden düzenli yapılardaki lamelsel yapıların toplam genişliği ölçüldü. Ötektik lamelsel mesafeler ( $\lambda$ ), aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplandı:

$$\lambda = \frac{X}{N_L - 1} \quad [1]$$

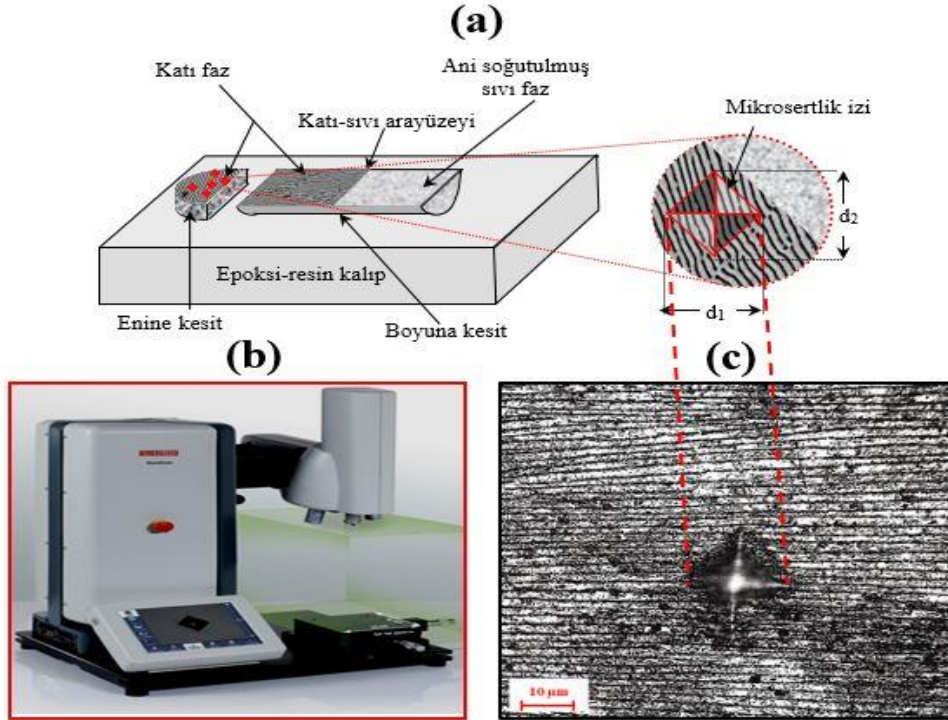
Burada,  $N_L$ ; ölçüme dahil edilen lamel sayısı,  $X$ ; toplam lamel genişliğidir.



Şekil 4. Ötektik alaşımın enine kesiti üzerinde dar (a) ve geniş (b) bölgeler için lamelsel mesafelerin ölçümü şematik gösterimi.

### 2.3. Mikrosertlik sonuçlarının elde edilmesi

Bu çalışmada katılaştırma hızına bağlı olarak mikroyapıdaki değişimin aynı zamanda Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımın mikrosertliğine olan etkisini de ortaya çıkarmak amacıyla, mikrosertlik değerleri Vickers-sertlik ölçüm cihazı (Future Tech FM-700) kullanılarak elde edildi.



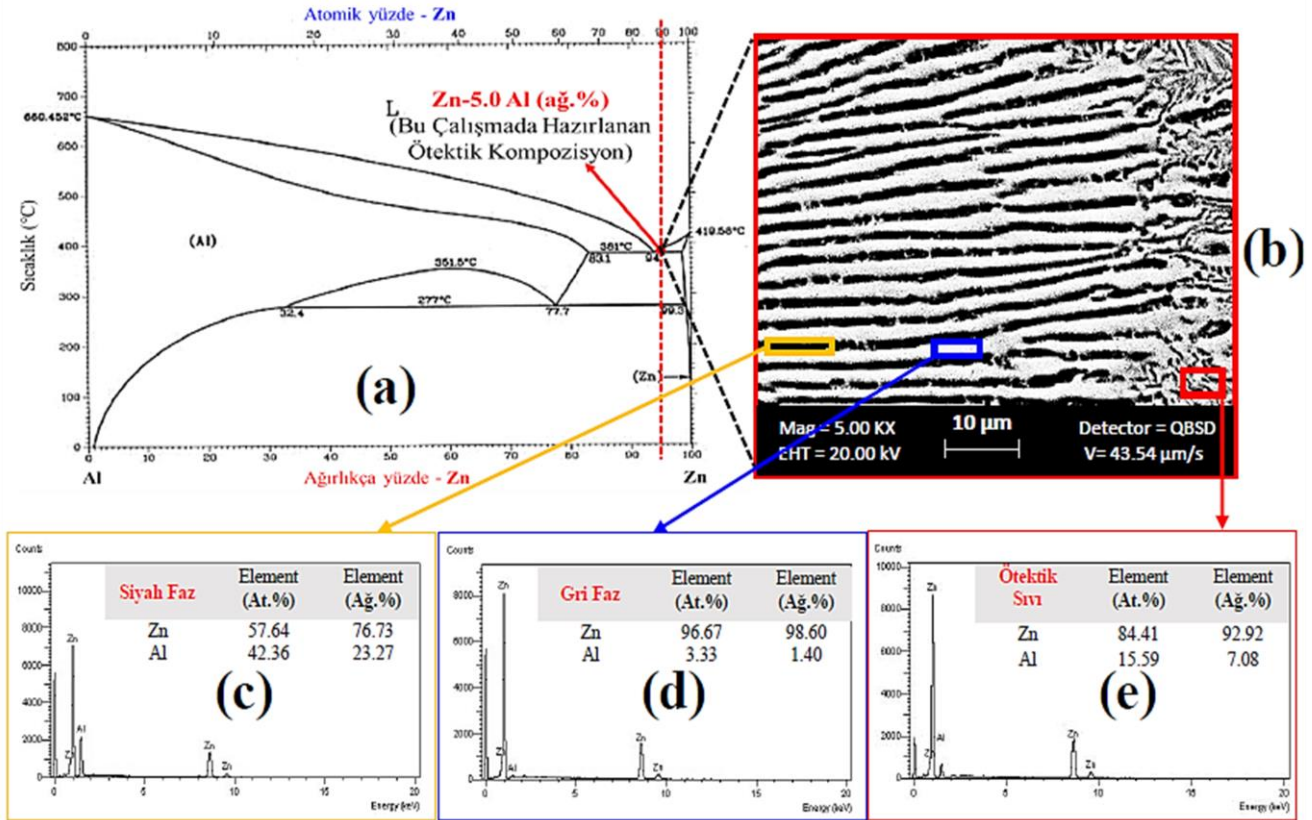
Şekil 5. (a) Cihazın numune üzerinde bıraktığı izin detayları, (b) Mikrosertlik ölçüm cihazı fotoğrafı, (c) Doğrusal katılaşmış ötektik Zn-5.0 Al (ağ.%) alaşımına ait optik mikroskop ile çekilen örnek sertlik iz görüntüsü.

Şekil 5.a'dan örneğin enine kesiti üzerinde alınan sertlik ölçümünün bıraktığı izin detayları ve Şekil 5.b'de ise kullanılan cihazın fotoğrafı verilmiştir. Ölçümü kolay ve basit olan bu yöntemde, sekiz farklı katılaştırma hızında katılaştırılmış örnekler üzerine 10 sn süresince 500 g yük uygulanmış ve ortaya çıkan 20-50  $\mu\text{m}$ 'lik iz görüntülerinden mikrosertlik değerleri cihaz aracılığıyla tespit edilmiştir. Şekil 5.c'de optik mikroskop ile çekilen örnek sertlik iz görüntüsü verilmiştir. Ölçüm güvenilirliği göz önünde bulundurularak, bu işlem farklı bölgelerden 25 kez tekrar edilmek suretiyle ortalama değerler alınarak gerçekleştirildi.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Mikroyapının değerlendirilmesi ve fazların karakterizasyonu

Bu çalışmanın temel amacı, Zn-Al ötektik alaşımında, düşük ( $V_{DKH}=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$ ), yüksek ( $V_{YKH}=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$ ) ve tüm ( $V_{TKH}=8.25-2032.19 \mu\text{m/s}$ ) katılaştırma hızı değerlerinin ( $V$ ) hem ötektik mesafe ( $\lambda_{DKH}$ ,  $\lambda_{YKH}$ ,  $\lambda_{TKH}$ ) ve hem de mikrosertlik ( $HV_{DKH}$ ,  $HV_{YKH}$ ,  $HV_{TKH}$ ) üzerine olan etkisini lineer regrasyon analizi ile ortaya koymaktır. Bu doğrultuda alaşımın çalışılması hedeflenen ötektik noktadaki doğru kompozisyonunu belirlemek amacıyla, Massalski [44] tarafından belirlenen Zn-Al alaşımına ait faz diyagramı (Şekil 6.a) dikkate alındı ve bu faz diyagramında alaşım sisteminin tek bir ötektik nokta içerdiği görülmektedir. Çalışılmak için seçilen ötektik nokta ve reaksiyon denklemi şu şekildedir: Zn-%5.0 Al (ağ.%), E:  $L \leftrightarrow (\mu\text{-Zn}) + (\alpha\text{-Al})$ . Katı-sıvı arayüzeyi de içeren Şekil 6. b'de görüldüğü gibi, ötektik alaşım ile yapılan doğrusal katılaştırma çalışmaları sonucunda faz diyagramından tanımlanan her bir faz birbirinden ayrılmış ve bu fazların kantitatif kimyasal bileşim analizleri SEM-EDX ile kullanılarak yapılmıştır. Şekil 6.c ve 6.d'deki sonuçlarda: Siyah renkli lamelsel fazın; Zn ( $\eta\text{-Zn} + \alpha\text{-Al}$ ) çözelti fazı (Zn-%23.27 Al (ağ.%)) ve gri renkli fazın;  $\eta\text{-Zn}$  çözelti fazı, Ana (matrix) faz (Zn-%1.40 Al (ağ.%)) olduğu görülmektedir. Şekil 6.d'de verilen EDX sonucu (genel) alaşımın ötektik sıvı bölgesinden alınmış ve çalışılan Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik kompozisyonu ile uyumlu olarak elde edilmiştir (Zn-%7.08 Al (ağ.%)).



Şekil 6. Zn-Al ikili alaşıma ait faz diyagramı [44] (a). Ötektik alaşımda 43.54  $\mu\text{m/s}$  katılaştırma hızı ile elde edilmiş boyuna SEM görüntüsü (b). Zn-5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımındaki fazlara ait SEM-EDX sonuçları (c-d-e).

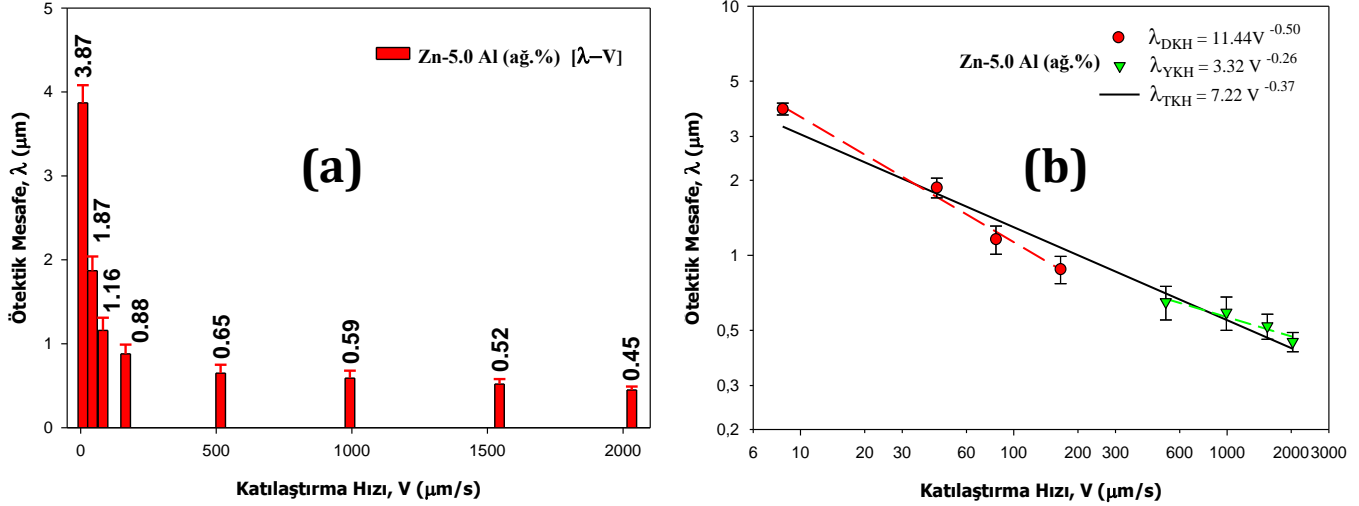
#### 3.2. Düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızlarına bağlı olarak ötektik lamelsel mesafelerdeki ( $\lambda_{DKH}$ , $\lambda_{YKH}$ , $\lambda_{TKH}$ ) ve mikrosertlik değerlerindeki ( $HV_{DKH}$ , $HV_{YKH}$ , $HV_{TKH}$ ) değişimin incelenmesi

Şekil 2'de verilen SEM görüntülerinden anlaşılacağı gibi, katılaştırma hızındaki değişiklikler ötektik lamelsel mesafeleri önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışma, sabit bir sıcaklık gradyanında ( $G=4.25 \text{ K/mm}$ ) katılaştırma

hızlarının artmasıyla ötektik lamelsel mesafelerin azaldığı sonucuna varmıştır. En yüksek lamelsel mesafe ( $3.87 \pm 0.21 \mu\text{m}$ ), en düşük katılaşma hızında ( $8.25 \mu\text{m/s}$ ) elde edilirken, en düşük lamelsel mesafe ( $0.45 \pm 0.04 \mu\text{m}$ ), en yüksek katılaşma hızında ( $2032.19 \mu\text{m/s}$ ) ölçülmüştür. Ötektik lamelsel mesafelerin ve mikrosertlik değerlerinin logaritmik ölçekte büyüme hızı ile değişimi belirli bir katılaşma hızı değerine ( $\sim 300 \mu\text{m/s}$ ) kadar doğrusaldır ve orantı denklemi lineer regresyon analizi ile şu şekilde elde edilebilir:

$$\lambda = K_1 \cdot V^{-n} \text{ ve } HV = K_2 \cdot V^m \text{ (sabit } G \text{ için)} \quad [2]$$

burada,  $K_1$  ve  $K_2$  orantı sabitleri ve  $n$  ve  $m$  ise, katılaşma hızının üstel değeridir.



Şekil 7. Doğrusal olarak katılaşırılan Zn-5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımının ötektik mesafe ( $\lambda$ ) değerlerinin katılaşma hızları ( $V$ ) ile değişimi (a), düşük (DKH), yüksek (YKH) ve tüm katılaşma hızları (TKH) için elde edilen bağıntular (b).

Düşük ( $V=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$ ), yüksek ( $V=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$ ) ve tüm ( $V=8.25-2032.19 \mu\text{m/s}$ ) katılaşma hızları ile enine kesitten elde edilen ötektik lamelsel mesafeler arasındaki ilişkilerin sonuçları, doğrusal olarak katılaşırılmış Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için sırasıyla aşağıdaki denklemler ile belirlendi (Şekil 7):

$$\lambda_{DKH} = 11.44 V^{-0.50} \text{ (düşük katılaşma hızları)} \quad [3a]$$

$$\lambda_{YKH} = 3.32 V^{-0.26} \text{ (yüksek katılaşma hızları)} \quad [3b]$$

$$\lambda_{TKH} = 7.22 V^{-0.37} \text{ (tüm katılaşma hızları)} \quad [3c]$$

Bu çalışmada ayrıca alaşımın mekanik özelliklerinden biri olan mikrosertlik değerleri ve katılaşma hızları arasındaki ilişkiler de lineer regresyon analizi ile sırasıyla aşağıdaki denklemler ile tespit edildi (Şekil 8):

$$HV_{DKH} = 48.15 V^{0.10} \text{ (düşük katılaşma hızları)} \quad [4a]$$

$$HV_{YKH} = 60.03 V^{0.07} \text{ (yüksek katılaşma hızları)} \quad [4b]$$

$$HV_{TKH} = 50.98 V^{0.09} \text{ (tüm katılaşma hızları)} \quad [4c]$$

#### 4. Tartışma ve Sonuç

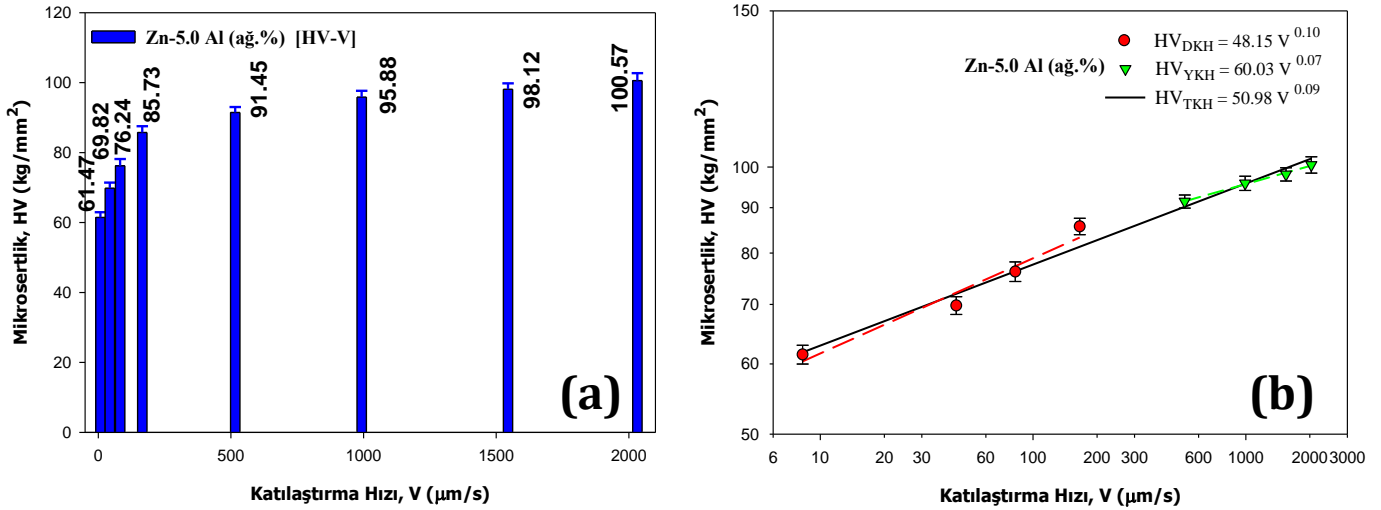
Önceki çalışmalarda ötektik noktaları içeren bileşimlere sahip alaşımların standart katılaşma hızı aralığında katılaşırılmasıyla üretilen çeşitli mikroyapıları ortaya çıkarmaya yönelik birçok sonuç bulunmaktadır [35-42]. 1966 yılında Jackson ve Hunt ( $\lambda^2 \cdot V = \text{Sabit}$  veya  $\lambda = k \cdot V^{-0.50}$ ) [45] tarafından yapılan çalışma, ikili alaşım sistemlerindeki ötektik yapıyı ve bireysel fazların büyüme kinetiğini anlamamıza yardımcı olan yararlı deneysel ve teorik bulgular içermektedir.

Şekil 7'den görüldüğü gibi, bu çalışmada Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için düşük ( $V=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$ ) katılaşma hızları ile elde edilen 0.50 üstel değer ( $\lambda_{DKH}$ ), sırasıyla Gündüz vd. [36] Al-%12.6 Si (ağ.%) ( $V=8.3-498.7 \mu\text{m/s}$ ), Kaya vd. [37] Al-%5.7 Ni (ağ.%) ( $V=8.32-483.25 \mu\text{m/s}$ ), Koçak vd. [39] Bi-%44.8 Pb (ağ.%) ( $V=7.05-113.09 \mu\text{m/s}$ ), Kaya vd. [41] Sn-%8.9 Zn (ağ.%) ( $V=8.30-165.13 \mu\text{m/s}$ ), Engin ve Büyük [42] Al-%33.0



Cu (ağ.%) ( $V=8.3-498.7 \mu\text{m/s}$ ) ötektik alaşımları için hesaplanan 0.46, 0.50, 0.49, 0.50 ve 0.54 üstel değerleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Jackson-Hunt teorik modeli [45] tarafından öngörülen 0.50 değeri ile uyumlu olması, ötektik alaşımlar için beklendiği gibi ötektik  $\alpha$ -Al fazlarının da artan katılaştırma hızlarıyla orantılı olarak birbirine yaklaşma eğiliminde olduğunu, diğer bir deyişle ötektik lamelsel mesafelerin giderek azaldığını göstermektedir.

Yüksek ( $V=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$ ) katılaştırma hızları ile yapılan deneyler sonucunda hesaplanan 0.26 üstel değeri ( $\lambda_{YKH}$ ), hem literatürde ikili ötektik alaşımlar için benzer çalışmalar ( $\sim V=7.5-300.0 \mu\text{m/s}$ ) [35-42] ve hem de Jackson-Hunt [45] tarafından belirlenen 0.50 değeri ile uyumlu olmadığı ve sonuç olarak da bu değer yaklaşık yarısı kadar daha az olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu önemli farkın oluşmasını oluşturan Zn ve Al elementlerinden ziyade yüksek katılaştırma hızlarından kaynaklandığı sonucu çıkmaktadır. Yaklaşık olarak  $300.0 \mu\text{m/s}$  katılaştırma hızı değerine kadar katılaştırma hızının artmasıyla ötektik lamelsel mesafenin orantılı olarak azaldığı fakat bu değeri aşan katılaştırma hızlarında tane sınırlarının görüldüğü ve bu sınırlar civarında lamelsel yapıların kalınlaştığı hatta giderek daha düzensiz bir forma girme eğiliminde oldukları görülmektedir (Şekil 2). Düşük katılaştırma hızları için ( $V=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$ ); senkronize motorların çekme hızlarının katılaştırma hızlarına benzer olduğu bulundu; bunun nedeni metal numune tutucunun ve grafit potanın iyi bir termal iletkenliğe sahip olması olabilir. Fakat Tablo 1'den  $300 \mu\text{m/s}$  katılaştırma hızından sonraki değerlerin ( $V=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$ ) çekme hızı değerlerinin yaklaşık yarısı kadar olduğu görülmektedir. Literatürde yer alan standart büyüme hızı değerleri aşıldığında karşılaşılan bu durum, çekme hızlarındaki artışa sıvı haldeki alaşım tarafından yeterince hızlı tepki verilmemesi nedeniyle mikro yapıdaki düzensizliğin de arttığını ortaya çıkarmaktadır. Deneysel sonuçlardan Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımının  $350.0 \mu\text{m/s}$  civarında Jackson-Hunt ötektik teorisinden [45] uzaklaşmaya başladığı kritik katılaştırma hızı olması mümkün olabilir.



Şekil 8. Doğrusal olarak katılaştırılan Zn-5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımının mikrosertlik (HV) değerlerinin katılaştırma hızları (V) ile değişimi (a), düşük (DKH), yüksek (YKH) ve tüm katılma hızları (TKH) için elde edilen bağıntılar (b).

Tüm katılaştırma hızları için ötektik lamelsel mesafelerin ölçümlerinden elde edilen 0.37 değeri ( $\lambda_{TKH}$ ), standart katılaştırma hızı aralığında deneyleri gerçekleştirilen bazı üçlü ötektik alaşımların üstel değerleri ile uyumlu olduğu görüldü. Bahsedilen çalışmalarda araştırmacılar, sırasıyla Al-Cu-Mn [46], Al-Si-Co [47] ve Al-Si-Mg [48] ötektik alaşımları için sırasıyla 0.36, 0.40 ve 0.42 üstel değerlerini elde etmişlerdir. Bu uyum göz önüne alındığında şu sonuca varılabilir: Jackson-Hunt ötektik teori modeli [45], ikili ötektik alaşımlar haricindeki çoklu alaşımlar da hem yüksek katılaştırma hızlarının bir sonucu olarak üstel değerlerin 0.50 değerinden uzaklaşması ve hem de ikiden fazla materyal içeren alaşımın daha fazla düzensiz mikroyapıya sahip olması sebebiyle uygulanmadığı anlaşılmaktadır. Buradaki uyum: "İkili ötektik alaşımlar haricindeki çoklu alaşımlar da yüksek katılaştırma hızlarının bir sonucu olarak üstel değerlerin 0.50 değerinden uzaklaşması, ayrıca ikiden fazla materyal içeren bazı alaşımların düzensiz mikroyapıya sahip olmaları sebebiyle ötektik teori modelinin [45] geçerliliğini kaybetmesi" şeklinde yorumlanabilir.

Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için elde edilen mikrosertlik değerleri, artan katılaştırma hızlarına bağlı olarak, mikroyapıdaki fazlar arasındaki mesafenin azalmasıyla birlikte beklendiği gibi artma eğilimindedir. Düşük katılaştırma hızları ( $V=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$ ) aralığında doğru orantılı olarak elde edilen sonuçlara göre ( $HV_{DKH}$ ); en yüksek katılaştırma hızında ( $165.68 \mu\text{m/s}$ ) en yüksek mikrosertlik değeri ( $85.73 \pm 1.82 \text{ kg/mm}^2$ ) ve en düşük katılaştırma hızında ( $8.25 \mu\text{m/s}$ ) en düşük mikrosertlik değeri ( $61.47 \pm 1.49 \text{ kg/mm}^2$ ) ölçüldü. Belirlenen katılaştırma hızı aralığındaki mikrosertlik değerlerinin % 40 civarında hatırı sayılır derecede artış gösterdiği Şekil

8.a'da verilmektedir. Elde edilen 0.10 üstel değeri, literatürde daha önce benzer katılaştırma hızı aralığında yapılan çalışmalarda verilen 0.13 [38], 0.09 [49] ve 0.08 [42] üstel değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Yüksek ( $V=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$ ) katılaştırma hızlarının mikrosertlik değerleri ( $HV_{YKH}$ ) üzerine etkisi incelendiğinde; düşük katılaştırma hızlarında olduğu gibi nispeten daha az doğru orantılı olarak artış gösterdi.  $91.45 \pm 1.56 \text{ kg/mm}^2$  ( $V=516.23 \mu\text{m/s}$ ) değerinden yaklaşık %10'luk bir artış ile  $100.57 \pm 2.13 \text{ kg/mm}^2$  ( $V=2032.19 \mu\text{m/s}$ ) değerine çıktığı ve matematiksel olarak da üstel değer 0.07 olduğu sonucuna ulaşıldı. Tüm katılaştırma hızları ( $V=8.25-2032.19 \mu\text{m/s}$ ) göz önüne alındığında, mikrosertlik değerleri ( $HV_{TKH}$ ) için elde edilen toplam artış 0.09 üstel değeri ile yaklaşık olarak %64 civarında olduğu hesaplandı. Lamelsel mesafelerdeki değişim de olduğu gibi, katılaştırma hızları çok yüksek değerlere ulaşmasına rağmen mikrosertlik değerleri aynı oranda artış göstermedi ve giderek azalan bir artış eğilimine sahip olduğu görüldü. Diğer taraftan, literatürde yapılan deneysel çalışmalarda aynı aralıktaki katılaştırma hızları kullanılsa da mikroyapının alaşımın sahip olduğu bileşim türüne göre (ötektik üstü, ötektik altı ve ötektik gibi) ve sonuç olarak ortaya çıkan mikroyapı oluşumuna göre (flake, hücresel, lamelsel ve çubuksal gibi) değiştiği için elde edilen mikrosertlik değerleri birbirlerinden oldukça farklılık gösterebilmektedir.

### Teşekkür

Araştırmacı, verdiği desteklerden dolayı çalışmanın deneysel süreçlerinin yürütüldüğü Katı Hal Fiziği-I laboratuvar sorumlusu Prof. Dr. Necmettin Maraşlı'ya teşekkür etmektedir.

### Kaynakça

- [1] Gueijman, S. F., Schvezov, C. E., Ares, A. E. 2010. "Vertical and Horizontal Directional Solidification of Zn-Al and Zn-Ag Diluted Alloys." *Materials Transactions*, 51(10), 1861–1870.
- [2] Hosking, F.M., Portillo, F.F., Wunderlin, R., Mehrabian, R. 1982. "Composites of Aluminium Alloys: Fabrication and Wear Behaviour." *Journal of Material Science*, 17, 477–498.
- [3] Lee, C.S., Kim, Y.H., Han, K.S., Lim, T. 1992. "Wear Behaviour of Aluminium Matrix Composite Materials." *Journal of Material Science*, 27, 793–800.
- [4] Rhême, M., Gonzales, F., Rappaz, M. 2008. "Growth Directions in Directionally Solidified Al-Zn and Zn-Al Alloys Near Eutectic Composition." *Scripta Materialia*, 59(4) 440-443.
- [5] Osório, W.R., Freire, C.M.A., Garcia, A. 2005. "Dendritic Solidification Microstructure Affecting Mechanical and Corrosion Properties of a Zn4Al Alloy." *Journal of Material Science*, 40, 4493-4499.
- [6] Zhang, C., Wu, Y., Fang, M., Wu, S., Wei, X., Cheng, Y., Sun, Y. 1997. "Formation Mechanism of the Zn-5% Al Hot-Dip Coating Amorphous Alloys (I)." *Chinese Science Bulletin*, 42, 2067-2072.
- [7] Savaşkan, T., Turhal, M. S., Murphy, S. 2003. "Effect of Cooling Rate On Structure and Mechanical Properties of Monotectoid Zinc-Aluminium Alloys." *Materials Science and Technology*, 19 (1), 67–74.
- [8] Purcek, G., Altan, B. S., Miskioglu, I., Ooi, P. H. 2004. "Processing of Eutectic Zn–5%Al Alloy by Equal-Channel Angular Pressing." *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 279–287.
- [9] Prasad, B. K. 2003. "Microstructural Alterations Through Heat Treatment and Its Influence On Wear Response of a Silicon Containing Zinc Based Alloy Under Different Test Conditions." *Materials Science and Technology*, 19, 327–335.
- [10] Al-Maharbi, M., Karaman, İ., Purcek, G. 2010. "Flow Response of a Severe Plastically Deformed Two-Phase Zinc-Aluminum Alloy." *Materials Science and Engineering A*, 527, 518–525.
- [11] Delneville, Ph. 1985. "Tribological Behaviour of ZnAl Alloys (ZA27) Compared with Bronze When Used as A Bearing Material with High Load and at Very Low Speed." *Wear*, 105 (4), 283-292.
- [12] Auras, R., Schvezov, C. 2004. "Wear Behavior, Microstructure, and Dimensional Stability of As-Cast Zinc-Aluminum/SiC (Metal Matrix Composites) Alloys." *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35, 1579–1590.
- [13] Saíd, R.C. 2004. *Caracterización Mecánica Del Eutectoide Zn-Al Modificado Con Plata*, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de doctorado, pp. 12–36, México.
- [14] Boyer, H.E., Gall, T.L. 1990. *Metals Handbook*. Desk edition, American Society for Metals, USA, pp. 18–19.
- [15] VerSnyder, F.L., Guard, R.W. 1960. "Directional Grain Structure for High Temperature Strength." *Transactions of the American Society for Metals*, 52, 485-493.

- [16] Çadırılı, E., Yılmaz, İ., Şahin, M., Kaya, H. 2015. "Investigation of the Some Physical Properties of the Directionally Solidified Al-Cu-Co Ternary Eutectic Alloy." *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68, 817-827.
- [17] Bayram, Ü. 2017. *Kontrollü Doğrusal Katılaştırılmış Alüminyum İçerikli Çoklu Ötektik Alaşımın Yapı Parametreleri ile Mekanik, Elektrik ve Termal Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, ss. 75-187, Kayseri.
- [18] Bertelli, F., Freitas, E.S., Cheung, N., Arenas, M.A., Conde, A., Damborenea, J. de, Garcia, A. 2017. "Microstructure, Tensile Properties and Wear Resistance Correlations On Directionally Solidified Al-Sn-(Cu; Si) Alloys." *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 3621-3631.
- [19] Kakitani, R., Reyes, R.V., Garcia, A., Spinelli, J.E., Cheung, N. 2018. "Relationship Between Spacing of Eutectic Colonies and Tensile Properties of Transient Directionally Solidified Al-Ni Eutectic Alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 733, 59-68.
- [20] Maraşlı, N., Bayram, Ü. 2018. "Thermal Conductivity and Electrical Resistivity Dependences On Growth Rate in The Directionally Solidified Al-Cu-Ni Eutectic Alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 753, 695-702.
- [21] Song, Y., Tournet, D., Mota, F.L., Pereda, J., Billia, B., Bergeon, N., Trivedi, R., Karma, A. 2018. "Thermal-Field Effects On Interface Dynamics and Microstructure Selection During Alloy Directional Solidification." *Acta Materialia*, 150, 139-152.
- [22] Zhao, Y., Zhang, B., Hou, H., Chen, W., Wang, M. 2019. "Phase-Field Simulation for The Evolution of Solid/Liquid Interface Front in Directional Solidification Process." *Journal of Materials Science and Technology*, 35 (6), 1044-1052.
- [23] Büyük, U., Engin, S., Kaya, H., Çadırılı, E., Maraşlı, N. 2020. "Directionally Solidified Al-Cu-Si-Fe Quaternary Eutectic Alloys." *Physics of Metals and Metallography*, 121, 78-83.
- [24] Zheng, H., Chen, R., Qin, G., Li, X., Su, Y., Ding, H., Guo, J., Fu, H. 2020. "Microstructure Evolution, Cu Segregation and Tensile Properties of Cocrfencu High Entropy Alloy During Directional Solidification." *Journal of Materials Science and Technology*, 38, 19-27.
- [25] Maraşlı, N., Bayram, Ü. 2021. "Investigations of Electrical Resistivity and Thermal Conductivity Dependences on Growth Rate in the Al-Cu-Ti Eutectic Alloy." *International Journal of Thermophysics* 42, 94.
- [26] Zhu, X., Xiao, Z., An, J., Jiang, H., Jiang, Y., Li, Z. 2021. "Microstructure and Properties of Cu-Ag Alloy Prepared by Continuously Directional Solidification." *Journal of Alloys and Compounds*, 883, 160769.
- [27] Kaygısız, Y., Palta, Ç., Kaymaz, T.Ç., Engin, S. 2023. "The Effect of Mn Addition and Heat Treatment on the Microstructure, Mechanical, and Thermophysical Properties of Al-Si-Mg Eutectic Alloy." *International Journal of Metalcasting (Technical Paper)*.
- [28] Kaygısız, Y., Palta, Ç., Engin, S. 2024. "Determination of Microstructure and Mechanical and Thermophysical Properties of Al-Si-Mg-Xcr Alloy." *Materials Chemistry and Physics*, 311, 128559.
- [29] Porter, D.A., Easterling, K.E. 1992. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. 2nd edition. CRC Press, Boca Raton.
- [30] Kurz, W., Fisher, D.J. 1998. *Fundamentals of Solidification*, Chapter 5. 4th revised edition, Trans. Tech. Publications Ltd., Bâch, Switzerland.
- [31] Zhang, Y., Song, C., Zhu, L., Zheng, H., Zhong, H., Han, Q., Zhai, Q. 2011. "Influence of Electric-Current Pulse Treatment on the Formation of Regular Eutectic Morphology in an Al-Si Eutectic Alloy." *Metallurgical and Materials Transactions B*, 42, 604-611.
- [32] Kakitani, R., de Gouveia, G.L., Garcia, A., Cheung, N., Spinelli, J. E. 2019. "Thermal Analysis During Solidification of an Al-Cu Eutectic Alloy: Interrelation of Thermal Parameters, Microstructure and Hardness." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, 983-996.
- [33] Duffar, T., Sylla, L. 2010. *Crystal Growth Processes Based on Capillarity*. Chapter 6—Vertical Bridgman Technique and Dewetting, Wiley, New York, 355-411.
- [34] Venkataraman, R. 2020. *Handbook of Radioactivity Analysis (4th edition)*. Chapter 4—Semiconductor detectors, Elsevier Inc., 458-459.
- [35] Çadırılı, E., Ülgen, A., Gündüz, M. 1999. "Directional Solidification of the Aluminium-Copper Eutectic Alloy." *Materials Transactions JIM*, 40(9), 989-996.

- [36] Gündüz, M., Kaya, H., Çadırılı, E., Özmen, A. 2004. "Interflake Spacings and Undercoolings in Al-Si Irregular Eutectic Alloy." *Materials Science and Engineering A*, 369 (1-2), 215-229.
- [37] Kaya, H., Büyük, U., Çadırılı, E., Maraşlı, N. 2010. "Unidirectional Solidification of Aluminium-Nickel Eutectic Alloy." *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 48(5), 291-300.
- [38] Engin, S., Büyük, U., Kaya, H., Maraşlı, N. 2011. "Directional Solidification and Physical Properties Measurements of the Zinc-Aluminum Eutectic Alloy." *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 18, 659-664.
- [39] Koçak, Y., Engin, S., Büyük, U., Maraşlı, N. 2013. "The Influence of the Growth Rate On the Eutectic Spacings, Undercoolings and Microhardness of Directional Solidified Bismuth-Lead Eutectic Alloy." *Current Applied Physics*, 13 (3), 587-593.
- [40] Çadırılı, E., Kaya, H., Gündüz, M. 2007. "Directional Solidification and Characterization of the Cd-Sn Eutectic Alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 431 (1-2), 171-179.
- [41] Kaya, H., Çadırılı, E., Gündüz, M. 2003. "Effect of Growth Rates and Temperature Gradients On the Spacing and Undercooling in The Broken-Lamellar Eutectic Growth (Sn-Zn Eutectic System)." *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12, 456-469.
- [42] Engin, S., Büyük, U. 2018. "Kontrollü Doğrusal Katılaşdırılan Al-Cu Alaşımının Mikroyapısı, Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaşdırma Hızına Bağlı Değişimi." *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (2) 209-221.
- [43] Ourdjini, A., Liu, J., Elliot, R., 1994. "Eutectic Spacing Selection in The Al-Cu System." *Materials Science and Technology*, 10, 312-318.
- [44] Massalski T.B. 1993. *Alloy Phase Diagrams*, Materials Park, OH, ASM International, p 239.
- [45] Jackson, K.A., Hunt J.D. 1966. "Lamellar and Rod Eutectic Growth," *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 236, 1129- 1142.
- [46] Kaygısız, Y. 2018. "Microstructure Characterization and Hardness of Al-Cu-Mn Eutectic Alloy." *China Foundry* 15, 390-396.
- [47] Kaya, H., Aker, A. 2017. "Effect of Alloying Elements and Growth Rates On Microstructure and Mechanical Properties in The Directionally Solidified Al-Si-X Alloys." *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 145-154.
- [48] Steinbach, S., Ratke, L. 2007. "The Influence of Fluid Flow on the Microstructure of Directionally Solidified AlSi-Base Alloys." *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38, 1388-1394.
- [49] Büyük, U., Maraşlı N. 2009. "The Microstructure Parameters and Microhardness of Directionally Solidified Sn-Ag-Cu Eutectic Alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 485, 264-269.