

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVI FAZDAKİ BİR METALİN KATILAŞMA SÜRECİNDEKİ
SANTRİFÜJ ETKİNİN İNCELENMESİ

HARUN YALÇIN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVI FAZDAKİ BİR METALİN KATILAŞMA
SÜRECİNDEKİ SANTRİFÜJ ETKİNİN
İNCELENMESİ

HARUN YALÇIN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FEVZİ BEDİR

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INVESTIGATION OF CENTRIFUGAL
EFFECT ON THE SOLIDIZATION PROCESS
OF A METAL IN LIQUID PHASE**

HARUN YALCIN
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER
OF SCIENCE DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. FEVZİ BEDİR

GEBZE
2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 11/07/2023 tarih ve E-15299898/770-111452 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/07/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Harun YALÇIN'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : PROF. DR. FEVZİ BEDİR

ÜYE

: PROF.DR. SÜLEYMAN KARSLI

ÜYE

: DOÇ.DR. BİLAL KURŞUNCU

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada, Al-SiC kompozit yapının soğuma esnasında santrifüj yöntem ile fonksiyonel derecelendirilmiş bir kompozit yapı elde etmek amacı ile laboratuvar ortamında bir deney düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir. Isı kaynağı olarak bir adet dikdörtgen kesitte bir ısıtım fırını tasarlanmıştır. Fırının içinde numune almak ve çıkartmak amacı ile lineer kızaklar ile desteklenmiştir. Fırının merkezinde, dışardan servo motor ile tahrik edilen bir mil ve bu mile sabitlenebilen bir pota eklenmiştir. Deneyle Al anayapı ve SiC parçacık takviyeli kompozit bir yapı dikkate alınmıştır. Numune potası fırın içerisinde santrifüj dönme hareketi yaparken aynı zamanda ortam 700 °C dereceye kadar ısıtılmıştır. Pota içerisindeki toz Al sıvı faza geçmesi ile beraber SiC partiküllerin sıvı faz içerisinde santrifüj etki ile dışarı doğru kalıbın iç çeperine hareket etmesi planlanmıştır. Bunun bir sonucu olarak fonksiyonel derecelendirilmiş bir kompozit yapı üretimi sağlanabilecektir. Deney düzeneğinin en önemli farkı, anayapı içerisindeki farklı katkı fazlarının birbirlerine göre dağılımı sağlayabilecek optimum devir ve merkezkaç kuvveti parametrelerin değerleri belirlenebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum kompozit, Santrifüj yöntem, Metallerde katılma, Viskoz kuvvetler, Merkezkaç kuvvet

SUMMARY

In this study, an experimental setup was designed and produced in the laboratory in order to obtain a functionally graded composite structure by centrifugation method during cooling of the Al-SiC composite structure. A rectangular section heat treatment furnace was designed as the heat source. It is supported by linear slides for taking and removing samples inside the furnace. In the center of the furnace, a shaft driven externally by a servo motor and a crucible that can be fixed on this shaft are added. A composite structure reinforced with Al main structure and SiC particle was considered in the experiments. While the sample crucible was performing centrifugal rotation in the furnace, the environment was heated up to 700 °C. It is planned that the SiC particles in the crucible will move outwards to the inner wall of the mold with the centrifugal effect in the liquid phase, as the powder Al in the crucible passes into the liquid phase. As a result, a functional graded composite structure can be produced. The most important difference of the experimental setup is that the values of optimum speed and centrifugal force parameters that can provide the distribution of different additive phases in the main structure according to each other can be determined.

Keywords: Aluminum composite, Centrifugal method, Solidification in metals, Viscous forces, Centrifugal force

TEŞEKKÜR

Başta yüksek lisans eğitimi hayatım boyunca, ders içi veya ders dışı her konuda rahatlıkla danışabildiğim, çalışkan, samimi ve güler yüzlü davranışlarıyla öğrenci danışman ilişkisinden fazlasını sağlayan, bilgi birikimi ve deneyimlerini paylaşmayı esirgemeyen, akademik bilgisi ve hayat tecrübesinden çok faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. Fevzi BEDİR'e teşekkürü bir borç bilirim.

Akım Metal San. Ve Tic. A.Ş, Hürmak Plastik Otomotiv Makina İmalat San. Ve Tic. A.Ş. den Gökmen GÜNGÖR'e ve Gürteksan Makina Sanayi Ve Ticaret Limited Şirketi den Fatih ATEŞ'e tez çalışmamda maddi ve teknik desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ve son olarak bu hayattaki en değerlilerim olan çok sevdiğim Annem Şükran YALÇİN ve babam Mustafa YALÇİN'a, yüksek lisans ve tüm eğitim hayatım boyunca yanımda oldukları ve bana verdikleri desteklerden dolayı çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKÜRLER	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ	1
1.1.Genel	1
2.LİTERATÜR TARAMASI	2
2.1.Tezin amacı, Katkısı ve İçeriği	7
3.DENEYSEL DÜZENEĞİN HAZIRLANMASI	7
3.1.Santrifüj Yöntem	7
3.2.Laboratuvar Ölçekli Fırın Tasarımı	11
4.SANTRİFÜJ KATILAŞMA ve AYRIŞMA	13
5.SANTRİFÜJ DÖNME ESNASINDA OLUŞAN TEMEL KUVVETLER	15
6.DENEYSEL ÇALIŞMA HESAPLAMALARI ve SAYISAL SONUÇLAR	18
6.1.Kuvvet Analizleri ve Hesaplamaları	18
6.2.Kompozit yapı bileşen oranlarının hesaplanması ve proses Parametrelerinin belirlenmesi	28
6.3.Teorik çalışmaları ile literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen Deneysel verilerin desteklenmesi	32
7.SONUÇLAR ve YORUMLAR	38
KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	43

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kisaltmalar

Ag	:	Gümüş
Al	:	Alüminyum
Bi	:	Bizmut
Cr	:	Krom
Cu	:	Bakır
d	:	Yoğunluk
f	:	Frekans
R	:	Partikül ortalama yarıçapı
rpm	:	Devir sayısı
r_0	:	Partikül ilk konumu (dönme merkezine göre)
r	:	Dönme yarıçapı
r_2	:	Pota iç yarıçapı
T	:	Periyot
t	:	Süre
V	:	Çizgisel hız
V_r	:	Partikül yüzdürme hızı
$\Delta\rho$:	Ergitilmiş metal yoğunluk farkı
μ	:	Dinamik vizkozite

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Santrifüj yöntem için üretilen düzenek.	8
3.2: SM-06-D1-040-B0 Servo motor.	8
3.3: Servo sürücü.	9
3.4: Ayarlanabilir yataklar.	9
3.5: Ham malzeme potası.	10
3.6: Pota ve toz malzeme hacmi.	10
3.7: 600 °C derecede test edilmiş fırının görünümü.	11
3.8: Laboratuvar ölçekli fırın rezistans tasarımı.	11
3.9: Deney seti içerisinde yerleştirilmiş fırının görünüşü.	12
3.10: 4X4S-14S ısı kontrol cihazı.	12
3.11: SMB Motion V240 veri girişi programı.	13
3.12: Laboratuvar ölçekli fırın sıcaklık-zaman değişim eğrisi.	13
4.1: Santrifüj yöntem ile pota içerisindeki ürün üzerinde oluşan Bölgeler.	14
4.2: Santrifüj ile oluşmuş kompozitin kesit görünümü ve fazların Yarıçapları.	14
5.1: Dikey santrifüj yöntem sürecindeki bir partikül ve etkiyen Kuvvetler.	15
5.2: Yatay santrifüj yöntem sürecindeki bir partikül ve etkiyen Kuvvetler.	15
6.1: Partikül yüzdürme hızı.	18
6.2: Malzeme eritme potası kesit görünüşü.	20
6.3: Merkezkaç kuvvet ile Devir değişimi.	23
6.4: Sürüklenme kuvveti-Dönme devri değişimi.	25
6.5: Devire bağlı kuvvet değişimleri.	26
6.6: 50 dev/dak ile partikül yarıçapına bağlı merkezkaç ve Sürüklenme kuvvetlerinin değişimi.	27
6.7: 200 dev/dak ile partikül yarıçapına bağlı merkezkaç ve Sürüklenme kuvvetlerinin değişimi.	27
6.8: Al-Cu denge faz diyagramı.	29

6.9:	Pota içerisindeki partiküllerin konumu.	30
6.10:	Al-SiC partikülleri ve etil alkol.	30
6.11:	1.Deney Sıcaklık-Zaman-Devir değişimi.	31
6.12:	600°C de 16 dakika da 50 dev/dak ile yapılan 1.deney sonucu Numune.	31
6.13:	4.Deney Sıcaklık-Zaman-Devir değişimi Sonucu numune.	32 32
6.14:	(a) silindirik dökümün grafit içermeyen bölgeyi ve grafit bakımından zengin bölgeyi gösteren enine kesitinin şematik Gösterimi. (b) 800 dev/dak da dökülmüş, hacimce %7 grafit Parçacıkları içeren santrifüjlü döküm Cu alaşımının mikro yapısı, grafitsiz bölge ve grafit açısından zengin bölge.	33 36
6.15:	Grafit açısından zengin bölgede hacimce %7 grafit parçacıkları İçeren, 1900 rpm'de dökülen santrifüj döküm Cu alaşımının Mikro yapısı.	34
6.16:	(a) Dikey savurma döküm düzeni; (b) santrifüj dökümle Fonksiyonel derecelendirilmiş A6061/TiB2 döküm (dış bölge-partikül açısından zengin bölge; iç bölge-madde Tüketim bölgesi).	35
6.17:	Yatay santrifüj döküm makinesinin şeması.	36
6.18:	23 µm'lik ağırlıkça %10 SiC ile FGM'nin mikro yapısı.	37
6.19:	Kesilen numunelerin yerleri.	37

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
6.1: Santrifüj, pota ve alaşım değerleri.	19
6.2: Partikül ilerleme hızı ile pota dönme hızı arasındaki İlişki.	20
6.3: 22 µm çapındaki SiC partiküllerin, zamana ve dönme Devrine bağlı konumları.	21
6.4: 40 µm çapındaki SiC partiküllerinin, zamana ve dönme Devrine bağlı konumları.	22
6.5: Dönme devrine bağlı merkezkaç kuvvetleri değişimi.	23
6.6: Dönme devrine bağlı sürüklenme kuvvetleri değişim.	24
6.7: Devire bağlı kuvvetlerin değişimi.	25
6.8: Al-Cu-SiC Kimyasal oranları.	29
6.9: Çalışmada kullanılan Cu alaşımı (C90300) bileşimleri.	32
6.10: Alüminyum 6061 alaşımının kimyasal bileşimi (ağırlık oranı,%).	34

1. GİRİŞ

1.1. Genel

Malzemeler, insan hayatında önemli bir konumdadır. Teknoloji ve bilim, malzemelerin efektif kullanımı ile beraber gelişme göstermektedir. İçerilerindeki farklı yapıları ile insanlığın ihtiyaçlarını gidermektedir. Fakat geçen zaman ile beraber hızla gelişen endüstri, homojen yapıdaki malzemelerin yetersizliğini ortaya çıkararak, malzemelerin kimyasal ve fiziksel değişimi ile gelişimini mecbur bırakmıştır. Malzemelerin üretilme ve özelleştirme kabiliyetlerindeki gelişim ile beraber, Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) yapıları sahip malzemeler üretimi yaygınlaştırılmıştır [1]. FDM'ler iki farklı malzemenin belirli hacimsel oranlarda karıştırılarak, farklı yöntemler ile katılaştırıldıkları özel kompozit davranışlara sahip yapılardır. İlk olarak 1984 yılında uzay aracı için Japonya da üretilmişlerdir. Aşınmaya ve ısınmaya karşı dirençli olması özelliklerinden dolayı uzay-havacılık, kimya, nükleer enerji, elektronik ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [2], [3]. FDM'lerin başlıca üretim yöntemleri ise plazma püskürtme, kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme, santrifüj katılma ve toz metalürjisidir [1].

Santrifüj katılma, işlemlerin düşük maliyeti ve iyi doldurma özelliği ile yöntemin ana avantajlarından. Sadece silindirik bileşen üretmesi ise sınırlılığını göstermektedir [1]. Bu yöntem, katılma ve ayrıştırma, mekanik özelliklerin değişimi, gelişimi ve faz geçişlerinin gözlemlenebilmesi için kullanılan fiziksel bir yöntemdir. Merkezkaç kuvveti altında bileşenlerin yoğunluğa, viskozitesine, parçacık boyutlarına, eriyik matrisin sıcaklığına, pota sıcaklığına ve dönme hızına bağlı olarak taneler arası boşluğun azalmasıyla, alaşımın mikro yapısı ve kimyasal bileşimi kontrol edilebilmektedir. Santrifüj katılma ile alaşımın belirli mekanik özelliklerinde iyileştirilme, ayrıştırılırken ise faz geçişlerinin daha net gerçekleşmesi ile katmanlı yapının oluşmasını sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, daha çok alaşımın bileşenlerine net bir şekilde ayrışması için gerekli katılma parametrelerine tespitine ve santrifüj katılma ile üretilen kompozit yapıların iyileştirilmesine ve bu işlemler için üretilen düzeneğe odaklanılacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde yapılan benzer çalışmalar vardır;

Savaş ve Başer yaptıkları çalışmalarında, Fleyk şekilli sıvı alüminyum matris, Al_3Ti takviyeli katı parçacıklar ekleyip santrifüj yöntem kullanarak üretilen kompozitin mikro yapısal analizini incelemişlerdir. Kompozit yapı üzerinde güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş 2 bölgesi ortaya çıkmıştır. Güçlendirilmiş bölgede parçacık yoğunluğu fazla olduğundan sertlik değerlerinin de yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca çalışmalarına %5 oranında Cu ilave etmeleriyle, kompozitin ciddi oranda sertleştiğini de tespit etmişlerdir [4].

Maryam ve arkadaşları ise fonksiyonel olarak Cr takviyeli Al esaslı kompozit bir tüp deney numunesini, yatay santrifüj döküm yöntemi kullanarak hazırlamışlardır. Ağırlıkça %1,3 ve 6 oranlarında Al-Cr alaşımı oluşturulmuş ve bir kalıba dökülmüştür. Bu çalışmada, Al-Cr alaşımlarının santrifüj dökümü sırasında kalıp sıcaklığı ve dönme hızı dahil olmak üzere proses parametreleri araştırılmıştır. Dönme hızındaki artış, yoğun partiküllerin dışa doğru ayrılmasını sağlamıştır. Sıcaklıkta artış ise sıvı fazdaki partikülleri arttırmış, bu durumda dışa doğru ayrılmayı da arttırmıştır. Dış bölgede daha yoğun partiküller toplanmıştır. Böylelikle dış bölgenin sertliği artmıştır [5].

Williams ve arkadaşları, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemenin katılma prosesini araştırmışlardır. Sıvı metal içerisindeki partiküllerin dağılımı, partiküllerin katılma yönü ve matris içerisindeki dağılımı ön plana çıkmıştır. Daha sonra partiküller üzerinde etkili olan kuvvetlerin santrifüj döküm modeli oluşturulmuştur [6].

El Hadad ve arkadaşları ise, çalışmalarında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Alüminyum-titanyum alaşımına, yeni reaksiyonlu santrifüjlü karışık toz yöntemini uygulamışlardır. Burada, santrifüj yöntemin uygulandığı andaki sıcaklığının, alaşımın sıvılaştırma sıcaklığının üzerinde olmasının, üretilen kompozitin mekanik özelliklere etkisine odaklanılmıştır. Sonuçlara göre, kompozitteki partiküllerin uzunluğunun genel olarak arttığı aynı zamanda kompozit dış yüzeyinde belirli kalınlıkta sertliğinde arttığını tespit etmişlerdir [7].

Rajan ve arkadaşları çalışmalarında, alüminyum dökme alaşımı ve alüminyum dövme alaşımı homojen eriyiklerine silisyum-karbür partikülleri ile güçlendirip

sentezleyerek, yatay santrifüj yöntemi ile katılaştırıp, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş metal matris kompozitleri elde etmişler ve bu kompozitlerin karakterizasyonlarını incelemişlerdir. Ayrıca alaşımların donma aralığının, kompozitteki partikül dağılımı üzerine etkisini de değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Oluşan Kompozitlerin dış yüzeylerinde %45 ila %40 arasında silisyum karbür partikülleri olduğunu tespit etmişlerdir. Alaşımların donma aralığının artmasının ise, Silisyum-karbür oranının zengin olduğu bölgeden, fakir olduğu bölgeye partikül dağılımının, doğrusal olmaya yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Ürettikleri bu kompozitlerin, yaptıkları çalışmalar sonucunda, çok yüksek yüzey sertliği ve yüksek mukavemete sahip aşınma dirençleri gerektiren yerlerde kullanılabileceğini tespit etmişlerdir [8].

Sindhu ve arkadaşları, homojen eriyik alüminyum alaşımını, titanyum dibörür parçacıklarıyla sentezleyip, dikey santrifüj tekniği ile fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozit üretmişler ve kendiliğinden katılaştıran homojen kompozit ile karakterizasyonlarını ve mikro yapısal analizlerini karşılaştırmışlardır. Santrifüj teknik ile katılaştıran kompozitin, kendiliğinden katılaştıran kompozite göre, dış yüzeyinin mikro sertliği %15 iç bölgenin mikro sertliği ise %36 daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca aşınma oranı ve sürtünme katsayısı da daha düşük olmuştur [9].

Ali çalışmasında, Alüminyum-silisyum karbür alaşımını farklı oranlarda ve farklı devirlerde, yatay ve dikey santrifüj yöntemi kullanarak, yüzey kalitesine etkisini ve mikro özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Dikey santrifüj ile katılaştırılan kompozitlerin, yataya göre daha iyi yüzeylere ve boşluklara sahip olduğunu, silisyum karbür takviyesinin, kompozitin yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilediğini ve dönme hızının artmasıyla, kompozit üzerindeki gözeneklerin büyüdüğünü tespit etmiştir. ayrıca silisyum karbür takviyesi ve dikey santrifüj yönteminin yaklaşık 900 dev/dak dönme hızında uygulanmasıyla kompozitte maksimum çekme gerilmesi oluştuğunu gözlemlemiştir. Ali, Yatay ve dikey santrifüj yöntem ile üretilen kompozitleri, geleneksel yer çekimi katılma yöntemi ile katılaştıran kompozit ile de karşılaştırmış ve 3 katından fazla daha çekme mukavemetinin yüksek olduğunu görmüştür. son olarak da uygulanan yöntemlerin sünekliliğe etkisini inceleyen Ali, silisyum karbür takviyeli ve dikey santrifüj yöntemi ile ürettikleri kompozitin, geleneksel yer çekimi

metodu ile üretilen kompozite göre iki katına yakın değerde arttığını tespit etmiştir [10].

Wu ve arkadaşları, krom-Nikel esaslı dayanıklı çeliği, elektromanyetik alan içinde, farklı soğutma hızlarında santrifüj yöntem uygulayarak boru şeklinde anayapıyı katılaştırmışlardır. Burada farklı soğutma hızlarının, borunun bölgesel tane yapılarına, ötektik karbürlerin davranışlarına ve sürünme kopma mukavemetlerine etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Soğutma hızının artırılmasıyla beraber tane yapısının incelendiği ve gelişmesinin hızlandığı, ötektik karbürlerin ise çökmesi sınırlandığını tespit etmişlerdir. Santrifüj ile katılaşmanın elektromanyetik alanda yapılmasının ise, sürünme kopma mukavemetini doğrudan etkilemiş ve önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemişlerdir [11].

Luan ve arkadaşları, yüksek hız çeliğini farklı soğutma hızları, kalıp sıcaklıkları, demir ve kum olmak üzere farklı kalıplarda yatay santrifüj yöntem ile katılaştırıp, mikro yapısında oluşan ötektik karbürlerin morfolojisini ve dağılımını incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarının sonucunda vanadyum bakımından zengin ve sertlik değeri daha yüksek olan MC karbürü ile molibden bakımından zengin M₂C karbürü bulmuşlardır. Soğutma hızının artmasıyla, MC karbürlerin hacim fraksiyonu artmış, M₂C karbürlerinki ise azalmıştır. Genel olarak karbürler arasındaki mesafe de soğutma hızının artmasıyla azalmıştır. Ayrıca karbürler incelmış ve ortalama boyutları azalmıştır. Tane sınırlarında ve tanelerin içinde daha homojen dağılım göstermişlerdir. Luan ve arkadaşları yaptıkları bu çalışma ile düşük sıcaklıkta ve yüksek soğutma hızında demir kalıpta yatay santrifüj katılaşmanın, işlemin kısa sürede sonuçlanmasını, ve mikro yapısında daha fazla iyileştirmeler yapılabileceğini teşhis etmişlerdir [12].

Tattimani ve arkadaşları ise çalışmalarında, dikey santrifüj etkinin dönme hızının, ürünün yüzey kalitesine etkisini incelemişlerdir. Ana malzeme olarak ergitme sıcaklığının düşük olması sebebiyle kalay kullanılmıştır. Yaptıkları çalışmalarda, düşük devirlerde, yer çekimi kuvvetinin baskın olması sebebi ile istenilen yüzey kalitesi elde edilememiştir. Optimum devir ile merkezkaç ve yerçekimi kuvveti dengelenip, tek tip tane yapısı üretilmiştir. böylelikle iyi yüzey kalitesi için optimum parametre değerleri bulmuşlardır. Bu değerler, sertlik ve darbe dayanımlarını da arttırmıştır [13].

Bir başka çalışmada Zhang ve arkadaşları, yüksek gözenekli Cu köpükteki parafinin malzemesine, değişken merkezkaç kuvvetlerine maruz bırakarak, bunun

sonucunda faz değişimlerdeki ısı transferleri sürecine odaklanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, parafinin kendi ısısı, sistemin sıcaklığını yavaş yavaş arttırmıştır. Malzemedeki faz geçişleri, ısı taşınımı ve iletimi ile gerçekleşmiştir. Merkezkaç kuvvetinin artması ile ısı taşınımı artmıştır [14].

Wang ve arkadaşları, 40Cr/Q345B bimetalik halka boşluğunun dikey santrifüj ile üretmişlerdir. Buradaki amaçları, karışımın içindeki sıvı metal matrislerin potaya döküm süresi aralıklarının ve pota dönme hızının, oluşacak katmanlar arasındaki yapışma ara yüzeyi özelliklerine etkisini ve en iyi yapışma için gerekli optimum parametreleri incelemişlerdir. Sonuçlara göre metal matrislerin potaya döküm sürenin artması, iç dış ve katmanların yapışma özelliklerini zayıflatıp, metalürjik bağlanmayı zorlaştırmıştır. Aynı şekilde dönme devrinin artması da, bağlanmayı zayıflattığı görülmüştür. Optimum parametre değerleri olarak 170 s aralığın ve 700 dev/dak dönme hızı bulunmuştur [15].

Kim ve arkadaşları, yaptığı çalışmada ise, Cu üzerinde lotus tipindeki gözenekli yapıların, santrifüj etki ile üretilmesine dikkat çekmişlerdir. Yüksek basınçlı hidrojen gazı kullanımı ile lotus tipindeki gözenekli yapıların üretiminin tehlikeli olması, santrifüj etki ile üretilmesine ortam hazırlamıştır. Burada kim ve arkadaşları, dönme hızının, gözenek miktarına, ortalama gözenek çaplarına ve katılma yönü boyunca gözenek morfolojisine etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarının sonucunda, dönme hızının artmasıyla, gözeneklilik katılma yönü tersi boyunca doğrusal olarak azalmıştır denilebilir. Aynı şekilde ortalama gözenek çapları ise katılma yönü tersi boyunca dönme hızının artmasıyla, azaldığı gözlemlenmiştir. Gözenek sayısı yoğunluğu ise Cu'nun dış yüzeyinde ve yüksek devirde en fazla olmuştur [16].

El-Galy ve arkadaşları, saf alüminyum metal matrisi içerisine, takviye olarak SiC partikülleri ilave ederek yatay santrifüj yöntem ile üretmişlerdir. Çalışmalarında, takviye parçacıkları boyutlarının, takviye malzemesinin ağırlık yüzdesinin, kalıbın dönme hızının ve santrifüj etkinin, katılma kompozitin mikro yapısına, çekme mukavemetine, sertlik değerlerine ve aşınma oranlarına etkisini incelemişlerdir. Üretilen kompozitin dış bölgesinde maksimum partikül konsantrasyonu için gereken parametre değerlerini bulmuşlardır. Dış bölgenin %15 SiC ağırlık yüzdesiyle, 16 µm partikül boyutunda ve 1000 dev/dak kalıp dönme hızında maksimum sertlik değerini elde etmişlerdir. Sebebi olarak ise, daha küçük partiküllerin arasındaki ara mesafelerin,

metal matris ile daha yoğun olarak temas etmesini öne sürmüşlerdir. Çekme mukavemeti testlerinde ise aynı değerler ile maksimum çekme dayanımına sahip olduğunu gözlemlemiş ve partikül boyutunun artmasını, partiküller arasındaki matris malzemesinin azalmasına ve daha düşük bağlanmaya sebep olduğunu öne sürmüşlerdir.%15 lik SiC partikülleri miktarı ile dış bölgede en az aşınma gerçekleştiğini tespit etmişlerdir [17].

Castro ve arkadaşları, çalışmalarında Al A359 Alüminyum alaşımı matrisini, Silisyum karbür takviyesi ile güçlendirip, geleneksel katılaşma ile beraber, farklı devirlerde santrifüj teknik kullanarak da katılaştırıp, akma ve çekme dayanımları, elastisite modülü, sertlik değerleri ve kırılma tokluğu üzerindeki değişimleri incelemeyi amaçlamışlardır. Devrin artması, takviye partiküllerinin dış çeperde toplanmasını sağlamıştır. SiC partikülleri düşük devirde, %0.20 ile %0.30 Aralığında eklenildiğinde, çekme ve akma dayanımlarında artışa sebep olduğunu, fakat %0.3 ile %0.4 arasında eklenildiğinde ise çekme ve akma mukavemetlerinde düşüşe sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek devir, elastisite modülünün numune dış yüzeyine doğru artarak maksimum değere ulaşmasını aynı şekilde sertlik değerinin de dış yüzeyde maksimum olmasını ve santrifüj katılaşmanın geleneksel katılaşmadan daha sert olmasını sağlamıştır. Silisyum karbür takviyesinin fazla olduğu bölgelerde, düşük çatlak uzunluklarını tespit etmişlerdir. Böylelikle düşük kırılma tokluğu oluşmuştur. Takviye partiküllerinin azalmasıyla beraber daha uzun çatlaklar oluşmuş ve bu da kırılma tokluğunun arttırmıştır. Sonuç olarak yüksek devirde merkeze yaklaştıkça en uzun çatlak büyüme mesafesinin oluşmasına bağlı olarak yüksek kırılma tokluğu elde etmişlerdir [18].

Wen ve arkadaşları, Bi-Ag-Zn alaşımından, ayrı ayrı 3 bileşeni de santrifüj yöntem kullanarak 2 aşamada ayırmayı amaçlamışlardır. Daha sonra ayırışmaların verimliliği ile saflık yüzdelerini tespit etmişlerdir. Yerçekimi yöntemi ile yapılan ayırışmada, net faz ayırışmalarını göremeyen Wen ve arkadaşları, bu yöntem ile %99 saflıkta bizmut elementi fazı ile ve %83.92 verimlilikte, bileşimden ayırmışlardır. Gümüş ve çinkonun oranı ise sırasıyla %99,84 ve %91,16 olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca yöntemin çevreye az zarar vermesi ve az enerji kullanımını açısından pratik bir yöntem olduğunu düşünmektedirler [19].

2.1. Tezin amacı, katkısı ve içeriği

Bu çalışmada, tasarımı geliştirilen deney düzeneği ile malzeme yapılarında santrifüj yöntem ile minimum boşluklar sağlanarak, özel silindirik bir yapı üretmek, alaşımların bileşenlerini, bu yöntem ile birbirinden ayırmak ve takviye bileşenler ile mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapmakla ilgili çalışmalara odaklanılmıştır.

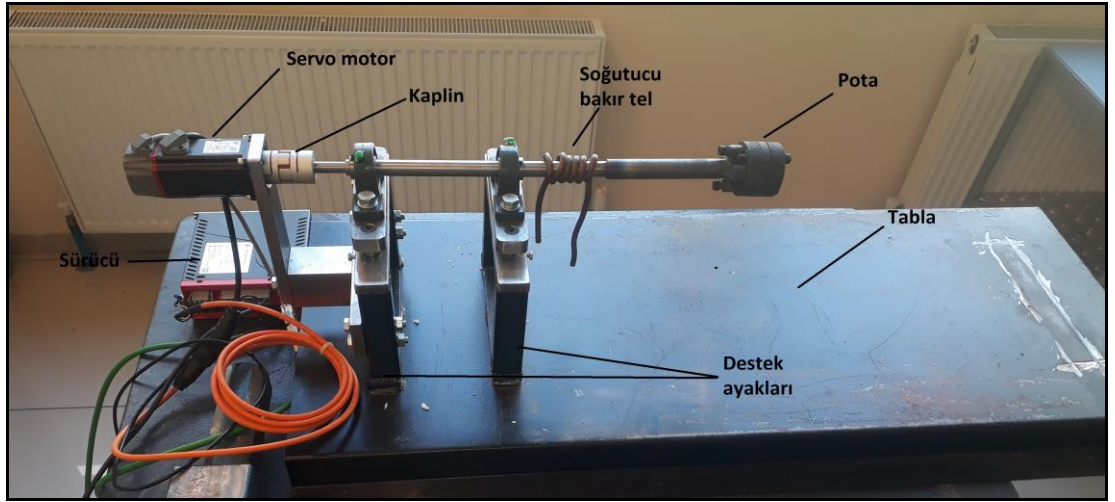
İyileşen özellikler ile farklı alanlar için kullanılabilecek malzeme yapısı ortaya çıkacaktır. Böylelikle malzeme tedariki konusunda, ihtiyaçlara alternatif olarak cevap verilebilecektir.

Çalışmanın ilk bölümünde, konunun genel olarak öneminden, tarihinden ve özelliklerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde, literatürde yapılan benzer çalışmalar gösterilmiştir. Üçüncü bölümde ise santrifüj yöntemin uygulanacağı düzeneğin üretimi ve bölümleri tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde ise santrifüj katılma ve ayrıştırma ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde, yöntemin uygulanması sürecinde, birim partikül üzerinde dönme devrine bağlı olarak oluşan kuvvetler ve bu kuvvetleri birbirleri ile ilişkileri formüller ile anlatılmıştır. Altıncı bölümde değişken dönme devirlerine bağlı olarak oluşan kuvvetlerin hesaplanması ve farklı bileşen oranları ile beraber farklı sıcaklıklarda katılan ürünlerin yapılarındaki değişimi gösterilmiştir. Son bölüm olan yedinci bölümde ise, tüm çalışmanın sonucunda elde edilen verilere göre, nihai durum değerlendirilmiştir.

3. DENEYSEL DÜZENEĞİNİN HAZIRLANMASI

3.1 Santrifüj yöntem

Çalışmada, santrifüj yöntemin uygulanabilmesi için Şekil 3.1 deki gibi düzenek hazırlanmıştır.



Şekil 3.1: Santrifüj yöntem için üretilen düzenek.

Düzenekte, santrifüj hareketini sağlayan SM-06-D1-040-B0 60 mm gövde boyu, artırılmış encoder tipli, 400W çıkış gücüne sahip frensiz servo motor Şekil 3.2 gösterildiği gibi kullanılmıştır.



Şekil 3.2: SM-06-D1-040-B0 Servo motor.

Motor, ara parça ile düzenek tablasına sabitlenmiştir. Şekil 3.3 de servo motorun kontrolü için SD-LP-04-D1-M modelli, duşuk güçlü, 400W ıkış gücüne sahip, 220V 1-Faz/3-Faz giriş gerilimli ve Modbus haberleşme protokollü servo sürücü kullanılmıştır.



Şekil 3.3: Servo sürücüsü.

Motor ile mil arasında olası eksen kaçıklığının giderilmesi ve fırın tarafında kalan ve mil üzerinden gelecek olan ısı transferini minimuma indirmek için ısıya dayanıklı kaplin kullanılmıştır. Ayrıca, kaplinin yüksek çalışma sıcaklıklarında olası yetersiz kalması durumu dikkate alarak, mil üzerine sarılmış ve içerisinden akışkan su geçen Cu boru ile soğutma sağlanmıştır.

Milin kendi ağırlığı ve potanın ağırlığıyla oluşturacağı sehim miktarını minimuma indirmek ve santrifüj hareketin eksenden kaık olmasını önlemek için iki destek ayak ve üzerinde yataklar ile mil Şekil 3.4 de gösterildiği gibi yataklanmıştır. 2.Yatak, zemine sabitlenmeyerek, milin dönmesindeki sapma minimuma indirilmıştir. Yatakların ykseklileri ayarlanabilir olması, kaplinin üzerindeki yükü ciddi oranda azaltmıştır.

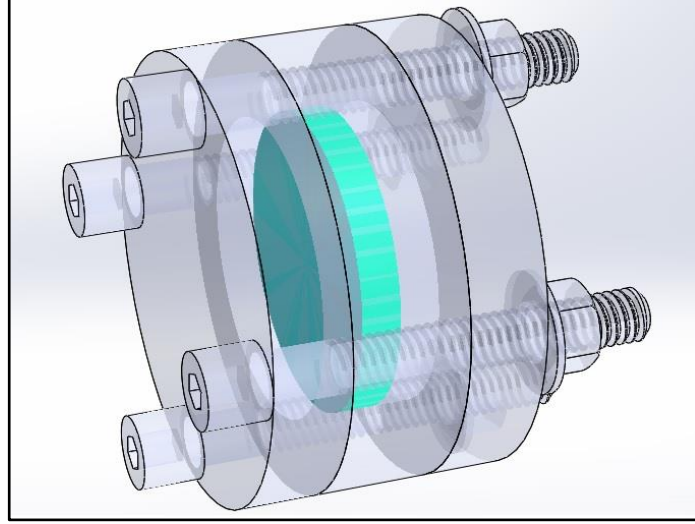


Şekil 3.4: Ayarlanabilir yataklar.

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da görüldüğü gibi pota fırın içerisinde hareket edebilecek şekilde yerleştirilmiş ve ana mile civata bağlantısı ile sökülebilecek şekilde monte edilmiştir. Böylelikle olası sıcaklıktan dolayı çarpılmanın önüne geçilmiştir. Pota malzemesi, üç parçadan üretilmiştir. 1200 °C dereceye kadar dayanıklı AISI H13 kalıp çeliği malzemesinden üretilmiş pota, eriyip daha sonra katılaştıran ham malzemenin, potadan kolay ayrılabilmesi için bilezik yapılı parçasının içerisine dökülüp diğer 2 parçası olan kapaklar ile kapatılarak işleme konulmaktadır.



Şekil 3.5: Ham malzeme potası.



Şekil 3.6: Pota ve toz ham malzeme hacmi.

3.2 Laboratuvar ölçekli fırın tasarımı

Yaklaşık 1200°C ye çıkabilen, 35x35x40cm³ iç hacmine sahip, 70 mm duvar kalınlığında yalıtım malzemesi olarak ateş tuğlası ile çevrili ve yatay ekseninde 80 mm çapa sahip ortadan mil geçebilecek şekilde bir yüzeyine delik açılmış fırın Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 da gösterildiği gibi üretilmiştir.



Şekil 3.7: 600 °C derecede test edilmiş fırının görünümünü.



Şekil 3.8: Laboratuvar ölçekli fırın rezistans tasarımı.



Şekil 3.9: Deney seti içerisinde yerleştirilmiş fırının görünüşü.

Ayrıca, işlem sonrası ürünün potadan kolay çıkarılabilmesi için fırın altından kızaklanarak kayma özelliği kazandırılıp, üretim sonrası potanın sökülmesini kolaylaştırmıştır.

Fırının iç ısısı termokulp tarafından Şekil 3.10 daki 4X4S-14S modelli ısı kontrol cihazına gönderilerek, anlık ısı bilgisi ve diğer ayarlar yapılmıştır.



Şekil 3.10: 4X4S-14S ısı kontrol cihazı.

Servo motorun dönme hızı, zaman ayarı ve diğer veri girişlerinin kontrolü Şekil 3.11 de gösterilen bir ara yüz programı ile bilgisayar üzerinden sağlanmıştır.

SMB Motion - [Parametre Editörü]

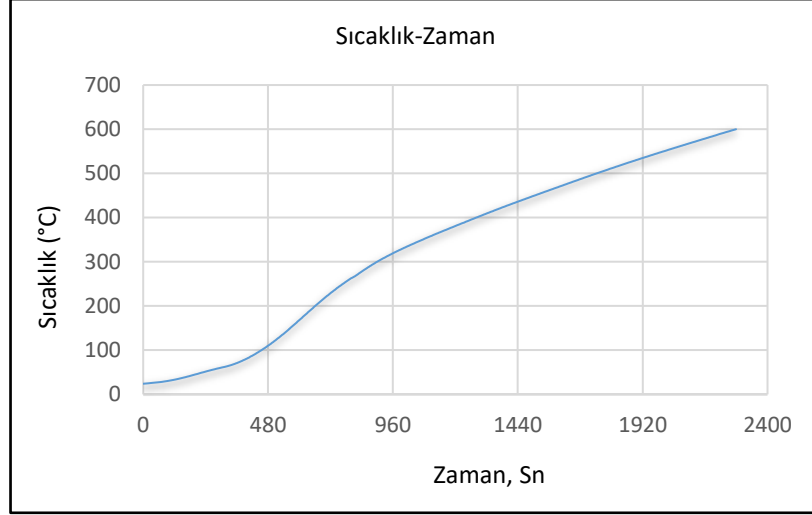
Parametreleri Sürücülerden Oku Parametreleri Sürücüye Gönder

Görünümü Sıfırla Basit Görünümü Al Tüm Sekmelerde Tablolara Sıfırla Geri Al(Ctrl+Z)

No	Kod	Parametre	Değer	Birim	Varsayılan	Min	Maks	Açıklama
0	P0-00	Aygit Yazılım Sürümü	100		100	100	500	Aygitta yüklü olan yazılım sürümünü belirtir. NOT: Bu parametre kullanıcı tarafından ayarlanamaz, sadece gözlenebilir.
1	P0-01	Servo Aktif	0		0	0	1	Sürücünün durumunu belirtir. • P0_01 parametresi 0'a ayarlandığında sürücü çalışmaz. • P0_01 parametresi 1'e ayarlandığında sürücü çalışır. Sürücünün çalışacağı kontrol modunu belirtir. • P0_02 parametresi 0'a ayarlandığında sürücü "Harici Pozisyon Kontrol" modunda çalıştırılır. • P0_02 parametresi 1'e ayarlandığında sürücü "Dahili Pozisyon Kontrol" modunda çalıştırılır. • P0_02 parametresi 2'ye ayarlandığında sürücü "Analog Hız Kontrol" modunda çalıştırılır. • P0_02 parametresi 3'e ayarlandığında sürücü "Dahili Hız Kontrol" modunda çalıştırılır. • P0_02 parametresi 4'e ayarlandığında sürücü "Analog Tork Kontrol" modunda çalıştırılır. • P0_02 parametresi 5'e ayarlandığında sürücü "Dahili Tork Kontrol" modunda çalıştırılır.
2	P0-02	Kontrol Modu	0: Harici Pozisyon Kontrol		0	0	5	
3	P0-03	Rejeneratif Direnç Değeri	40	ohm	40	5	750	Sürücüde takılı olan rejeneratif direnç değerini belirtir.
4	P0-04	Rejeneratif Direnç Gücü	100	W	100	30	3000	Sürücüde takılı olan rejeneratif direnç gücü değerini belirtir.
5	P0-05	Besleme Faz Seçimi	0: Tek Faz Giriş		0	0	1	Sürücünün beslemesinin tek-faz ya da üç-faz olacağı belirtilir. • P0_05 parametresi 0 olarak ayarlandığında sürücü beslemesi "Tek Faz Giriş" olarak ayarlanır. • P0_05 parametresi 1 olarak ayarlandığında sürücü beslemesi "Üç Faz Giriş" olarak ayarlanır.
6	P0-06	Servo Sürücü Gücü	0: SD_LP	W	0	0	4	Sürücünün hangi güç ailesine ait olduğunu belirtir. • P0_06 parametresi 0'a ayarlandığında sürücü gücü SD_LP olarak ayarlanır. • P0_06 parametresi 1'e ayarlandığında sürücü gücü 400W olarak ayarlanır. • P0_06 parametresi 2'ye ayarlandığında sürücü gücü 750W olarak ayarlanır. • P0_06 parametresi 3'e ayarlandığında sürücü gücü 1000W olarak ayarlanır. • P0_06 parametresi 4'e ayarlandığında sürücü gücü 1500W olarak ayarlanır.
								Sürücüdeki alarmları temizlemek için kullanılan parametredir.

Şekil 3.11: SMB MotionV240 veri girişi programı.

Fırının ısı kapasitesi görmek amacı ile sıcaklık-zaman değişimi eğrisi Şekil 3.12 de gösterilmiştir. Deney tasarımında Al-Cu alaşımı kullanımı önerildiğinden fırın sıcaklığı 600°C olarak tasarlanmıştır. Ancak gerektiği durumda 1000°C test edilmiştir.

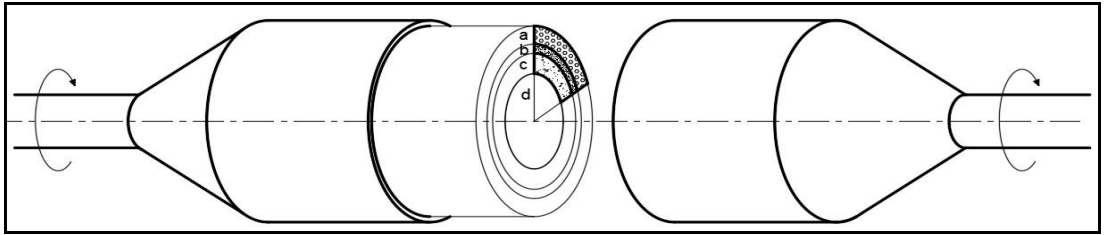


Şekil 3.12: Laboratuvar ölçekli fırın sıcaklık-zaman değişim eğrisi.

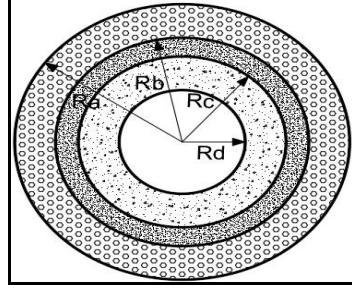
4. SANTRİFÜJ KATILAŞMA ve AYRIŞMA

Alaşımlarda fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapı oluşabilmesi için temelde iki yöntem ile sağlanmaktadır. Bunlar yerçekimi sedimantasyonu ile santrifüj yöntemidir.(merkezkaç sedimantasyonu). İki yöntemde de bileşenlerin yoğunluk farkı, fazlara ayrılmasında en büyük etkiye sahiptir. Santrifüj dönmeye de, merkezkaç kuvveti, diğer yöntemde ise yerçekimi kuvveti, itici gücü sağlar. Böylelikle yoğunluğu fazla olan bileşen, santrifüj yöntemde dönme merkezinden uzağa doğru savrulmaya çalışırken, yerçekimi sedimantasyonunda ise dibine çökmeye çalışır. Bileşenlerin arasındaki yoğunluk farkının az olduğu durumlarda, fazlara ayırma sürecini hızlandırmak için santrifüj yöntem daha uygun olmaktadır. Santrifüj yöntemdeki merkezkaç kuvvetinin şiddeti, dönme hızına ve yarıçapına bağlı olduğundan, yerçekimi kuvvetinin üstüne çıkarılır. Böylelikle sedimantasyon süreci hızlandırılmış olur [20].

Şekil 4.1 ve şekil 4.2 de pota içerisinde santrifüj yöntem ile fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir kompozit yapı gözükmemektedir. En dış bölgede, daha yoğun ve büyük partiküller merkezkaç kuvvetinin etkisiyle toplanır. (b) bölgesi geçiş bölgesidir. İri ve küçük tanelerin bulunduğu yerdir. (c) bölgesi ise dönme merkezine en yakın katı bölgedir. Burada yapı içerisindeki düşük taneler, merkez kaç kuvvetinden dolayı içeri itilir ve yumuşak bir yapı oluşur. Merkezde ise boşluk oluşacaktır. Santrifüj yöntemde dairesel hareketten dolayı boru geometrisine sahip yapılar ortaya çıkar.



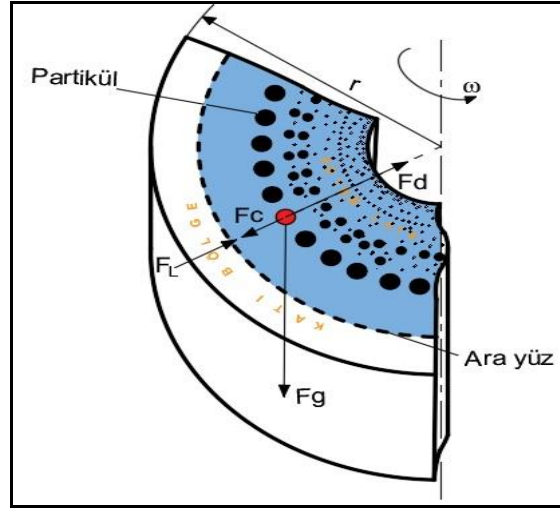
Şekil 4.1: Santrifüj yöntem ile pota içerisindeki ürün üzerinde oluşan bölgeler. (a) İri partiküllü yoğun bölge. (b) Geçiş bölgesi. (c) Artılmış sıvımsı bölge (d) Boşluk.



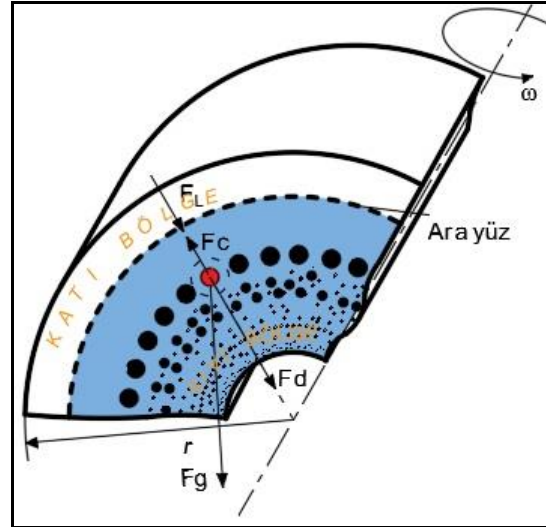
Şekil 4.2: Santrifüj ile oluşmuş kompozitin kesit görünümü ve fazların yarıçapları.

5. SANTRİFÜJ DÖNME ESNASINDA OLUŞAN TEMEL KUVVETLER

Merkezkaç kuvvetinin oluşumu ve şiddeti, potanın iç çapı ve dönme hızı ile doğrudan ilişkilidir. Bunun dışında diğer oluşan kuvvetlerde vardır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 de dönme durumundaki bir partikülün oluşturduğu kuvvetleri gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Dikey santrifüj yöntem sürecindeki bir partikül ve etkiyen kuvvetler.



Şekil 5.2: Yatay santrifüj yöntem sürecindeki bir partikül ve etkiyen kuvvetler.

Partikül üzerinde, F_c Merkezkaç kuvvetidir.

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (5.1)$$

İle hesaplanır. m partikül kütlesi, r dönme yarıçapı ve V çizgisel (çevresel) hızdır.

$$V = \omega \cdot r^2 \quad (5.2)$$

Olarak ifade edilir. Burada r_2 , potanın iç yarıçapıdır. ω ise Dönme devridir. Merkezkaç kuvvetini güncelleyecek olursak;

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (5.3)$$

Olur. Buradan, Partiküllerin kütlesinin ve potanın yarıçapının artmasının, merkezkaç kuvvetini arttırdığı gözükmemektedir. Dönme devrini hesaplayacak olursak;

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (5.4)$$

Aynı zamanda;

$$\omega = \frac{\pi \cdot N}{30} \quad (5.5)$$

Dur. Buradaki formüllerde 'f' frekans 'N' ise dev/dak olur. Denklem (5.4) e geri dönecek olursak, 'f' ile gösterilen parametre frekanstır. Birim zamanda dönme turuna denir. Aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$f = \frac{1}{T} \quad (5.6)$$

burada 'T' periyot olarak adlandırılır. 1 tam tur dönmeyi tamamlayan süredir.

Bir diğer kuvvet ise yerçekimi kuvvetidir. Burada 'Fg' Partikül üzerinde etki eden diğer bir kuvvet olan yerçekimi kuvvetidir.

$$F_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \Delta\rho \cdot g \quad (5.7)$$

İle ifade edilir. Burada R ile gösterilen, birim partikülün ortalama yarıçapı, g yerçekimi ivmesi ve $\Delta\rho$, partikül ile ergitilmiş metalin yoğunluklarının farkı olmaktadır. Partikül

üzerinde oluşan diğer kuvvet ise, 'F_d' ile gösterilen sürüklenme kuvvetidir. Bu kuvvet partikülün, savrulmasını zorlaştırıp, dönme merkezine yakın tutmaya çalışır.

$$F_d = 6. \pi. \mu. V_r. R \quad (5.8)$$

Olarak ifade edilir. Burada ' μ ' anayapının dinamik viskozitesidir. 'R' partikül yarıçapıdır. 'V_r' ile ifade edilen parametre ise partikülün yuzdürme hızı olarak tanımlanır.

$$V_r = \frac{(4.R^2.\Delta\rho.\omega^2.r)}{18.\mu} \quad (5.9)$$

Olarak ifade edilir. V_r, partikül yarıçapına(R), bileşenlerin yoğunluk farkına ($\Delta\rho$), dönme hızına(ω), sıvı bileşenin viskozitesine (μ) ve partikülün ilk pozisyonundaki merkezden uzaklığına (r) bağlı olarak değişmektedir. V_r santrifüj dönme esnasında soğuma ile beraber katılaşma sürecine giren kompozit yapı, partikül dağılımlarının yönelimini etkilemektedir. Kompozit yapı içerisinde takviye fazlarının kademeli olarak ayrışabilmesi için anayapı içinde partiküller askıda kalması gerekir. Yani partiküle gelen (etkileyen) kuvvetlerin sıfır olması gerekir (F_{net}=0). Bu durum partikül büyüklüğüne göre sıvı faz içerisinde partikülün merkezden ayrılma mesafesini belirleyecektir.

$$F_{Net} = F_c - F_L - F_d = 0 \quad (5.10)$$

Partiküller dönme merkezden ayrılma mesafeleri farklı olur ve fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit yapı ortaya çıkmış olur. F_L katılaşan bölgenin, partikülü itmesiyle oluşan kuvvettir. Katı bölgenin uzağında olan partiküller üzerinde bu kuvvet ihmal edilmektedir. Böylelikle denklem (5.10);

$$F_{Net} = F_c - F_d = 0 \quad (5.11)$$

Olarak güncellenmektedir. Buradan sürüklenme kuvvetinin merkezkaç kuvvetine eşit olduğu gözükmektedir. Bu durumda kademeli faz ayrımı için gerekli devir, bu denklemden çıkartılmaktadır.

$$F_d = F_c \quad (5.12)$$

(5.12) denklemdeki Eşitliği açacak olursak;

$$6. \pi. \mu. Vr. R = \frac{v^2.m}{r} \quad (5.13)$$

Olarak ifade edilir.

Santrifüj dönme esnasında viskoz sürtünme kuvvetleri ile merkezkaç kuvvetleri eşitlendiği anda dönme devri büyüklüğü deneylerde başlangıç hızımızı belirler. [6], [20], [25]. Partikülün zamana bağlı merkeze olan uzaklığının belirlenebilmesi için;

$$r(t) = r_0. \text{Exp}\left[\frac{(4.R^2.\Delta\rho.\omega^2.r.t)}{18.\mu}\right] \quad (5.14)$$

Kullanılmaktadır. 'r₀' partikülün dönme merkezine göre ilk konumu olarak kabul edilir. t ise, istenilen süredeki partikülün merkeze göre uzaklığının konumunu öğrenmek için girilen süredir. Bu kuvvetlerin sonucunda partikülün dönme sırasında, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş katmanlı yapının ortaya çıkması için partikül üzerindeki kuvvetlerin bileşkesi sıfır olmaktadır. Partikül, ürün üzerindeki en üst noktaya ulaştığında, merkezkaç kuvveti, yer çekimi kuvvetiyle aynı doğrultuda olur. Kararlı bir kompozit yapı elde etmek için ise ortaya merkezkaç kuvveti, yerçekimi kuvvetinden büyük olması gerekmektedir.(F_c > F_g) [6], [21], [22].

V_r nin çıkarımı ise, toplam kuvvetlerin denge denkleminde türetilmiştir. Denge denklemini tekrar yazacak olursak;

$$F_c - F_d = F_{Net} \quad (5.15)$$

İfade edilir. Daha da geniş bir ifadeyle;

$$\frac{4}{3}. \pi. R^3. \Delta\rho. \omega^2. r - 6. \pi. \mu. Vr. R = \frac{4}{3}. \pi. R^3. \Delta\rho. \frac{dVr}{dt} \quad (5.16)$$

Elde edilir. Gerekli işlemler sonucunda

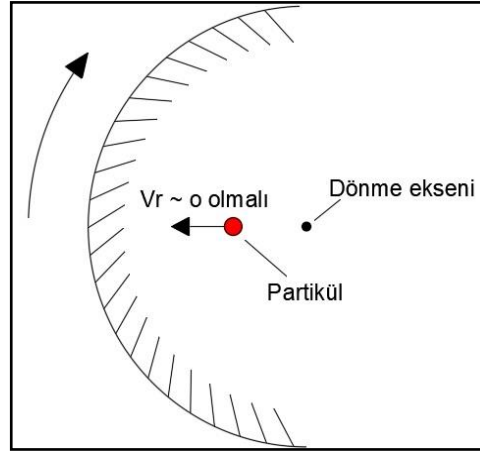
$$V_r = \frac{(4.R^2 \Delta\rho.\omega^2.r)}{18.\mu} \quad (5.17)$$

Bulunur.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA HESAPLAMALARI ve SAYISAL SONUÇLAR

6.1 Kuvvet analizleri ve hesaplamaları

Kompozit yapı soğuma esnasında katılaşma sürecinde tam olarak keskin bir şekilde partikül fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapı için partiküllerin dönme merkezinden uzaklaşma hızlarının farklı büyüklüklerde olması gerekmektedir. Yani sıvı faz anayapı içindeki partikül üzerine gelen kuvvetler farklı büyüklüklerde olmaktadır. Böylelikle partiküller belirli bölgede toplanır ve sıvı faz içerisinde belirgin olarak birbirinden ayrışır. Sıvı faz içerisinde partikülün dönme etkisi ile yarıçap boyunca yüzdürme hızı V_r , Şekil 6.1 de gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Partikül yüzdürme hızı.

V_r nin formülünü tekrar yazılırsa,

$$V_r = \frac{(4.R^2.\Delta\rho.\omega^2.r)}{18.\mu} \quad (6.1)$$

(6.1) nolu denklemin çözümünden önce, formüldeki gerekli olan bazı parametre değerleri ile ilgili bazı veriler Tablo 6.1 de gösterilmektedir.

Tablo 6.1: Santrifüj, pota ve alaşım değerleri.

Parametreler	Birimler	Değer
m (SiC Birim partikül kütlesi)	kg	$1,43 \times 10^{-10}$
V (Çizgisel hız)	m/sn	Değişken
r (ortalama dönme yarıçapı)	m	0,022
ω (Dönme devri)	1/sn	Değişken
r_2 (pota iç yarıçapı)	m	0,025
R (Partikül ortalama yarıçapı)	m	0,000022
g (yerçekimi ivmesi)	m/sn ²	9,80
dAl (katı alüminyum yoğunluğu)	kg/m ³	2710
dAl (sıvı alüminyum yoğunluğu)	kg/m ³	2375
dSiC (silisyum karbür yoğunluğu)	kg/m ³	3210
μ (alüminyum dinamik vizkozitesi)	kg/(m.sn)	0,00138
r_0 (partikül başlangıç konumu)	m	0,022

Tablo 6.1 deki verileri kullanarak V_r yi hesaplanacak olursa,

$$V_r = 1,423 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2 \frac{m}{sn} \quad (6.2)$$

Elde edilir. Bu ifadeden potanın dönme hızına bağlı olarak yüzdürme hızları hesaplanır ve en uygun olan devir seçilerek deney aşamasında tercih edilmelidir. Böylelikle en yakın takviye fazlarının birbirlerinden ayrışması gözlenebilir. Tablo 6.2 de, denklem (6.1) kullanılarak, değişken devir hızlarına bağlı, yüzdürme hızları hesaplanmıştır.

Tablo 6.2: Partikül ilerleme hızı ile pota dönme hızı arasındaki ilişki.

V_r (m/sn)	ω (1/sn)	V_r (m/sn)	ω (1/sn)
0,003558	50	0,174318	350
0,01423	100	0,22768	400
0,032018	150	0,288158	450
0,05692	200	0,35575	500
0,088938	250	0,430458	550
0,12807	300	0,51228	600

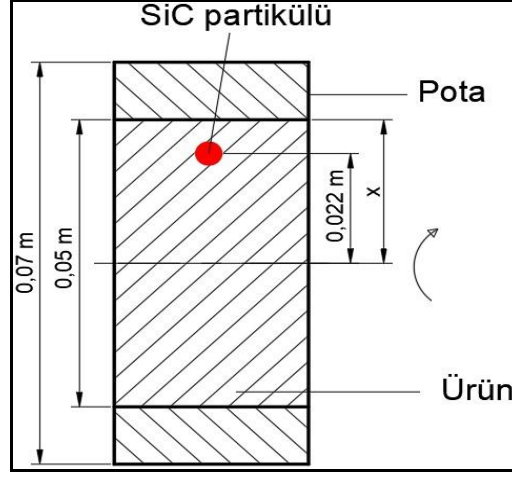
Potanın dönme devrinin artmasıyla beraber partiküllerin merkezden uzaklaşma hızı olan V_r değeri ile arttığı gözükmemektedir. İlâveten partiküllerin sabit dönme devrinde dönme merkezinden uzaklığı zamana bağlı olarak da değişmektedir. Bu şartlarda partikülün yer değiştirme konumunu bulmak için denklem (6.3) kullanılmaktadır. Burada $r_0=0,022$ mm numune kesit kalınlığının yarısı kabul edilmiştir.

$$r(t) = r_0 \cdot \text{Exp}\left[\frac{(4 \cdot R^2 \cdot \Delta\rho \cdot \omega^2 \cdot r \cdot t)}{18 \cdot \mu}\right] \quad (6.3)$$

Tablo 6.1 deneysel verileri formülde yerine koyarsak;

$$r(t) = 0,022 \cdot \text{Exp}\left[\frac{(4 \cdot 0,000022^2 \cdot 830 \cdot \omega^2 \cdot 0,022 \cdot t)}{18 \cdot 0,00138}\right] \quad (6.4)$$

Elde edilir. Burada partikülün ilk konumu olan ' r_0 ' değeri, santrifüj dönme esnasında sıvı fazın katılaşması ve partiküllerin birbirlerinden ayrıştırması potanın kesit görünüşü ve ölçüleri verilen Şekil 6.2 verilmiştir.



Şekil 6.2: Malzeme eritme potası kesit görünüşü.

Zamana bağlı partikülün konumu dönme devrine ve partikül boyutuna da bağlı olduğu gözükmektedir. Denklem (5.2) yi kullanarak 22 μm ve 40 μm çapındaki SiC partiküllerinin, farklı dönme devirleri için zamana bağlı dönme merkezinden uzaklık konumları, Tablo 6.3 de gösterilmektedir.

Tablo 6.3: 22 μm çapındaki SiC partiküllerin, zamana ve dönme devrine bağlı konumları.

50 devir için		60 devir için		70 devir için		80 devir için		100 devir için	
t (saniye)	r (metre)	t (saniye)	r (metre)	t (saniye)	r (metre)	t (saniye)	r (metre)	t (saniye)	r (metre)
1	0,0222	1	0,0223	1	0,0224	1	0,0225	1	0,0227
2	0,0224	2	0,0225	2	0,0227	2	0,0229	2	0,0235
3	0,0225	3	0,0228	3	0,0231	3	0,0234	3	0,0243
4	0,0227	4	0,0231	4	0,0235	4	0,0239	4	0,0251
5	0,0229	5	0,0233	5	0,0238	5	0,0244	5	0,0259
6	0,0231	6	0,0236	6	0,0242	6	0,0250	6	0,0268
7	0,0233	7	0,0239	7	0,0246	7	0,0255	7	0,0277
8	0,0235	8	0,0242	8	0,0250	8	0,0260	8	0,0286
9	0,0237	9	0,0245	9	0,0254	9	0,0266	9	0,0295
10	0,0239	10	0,0248	10	0,0258	10	0,0271	10	0,0305

Partikül boyutunun artması, devre bağlı partikül konumunda değişiklik göstermektedir. Tablo 6.4 de bu durum gösterilmektedir.

Tablo 6.4: 40 µm çapındaki SiC partiküllerin, zamana ve dönme devrine bağlı konumları.

50 devir için		60 devir için		70 devir için		80 devir için		100 devir için	
t saniye	r metre	t saniye	r metre	t saniye	r metre	t saniye	r metre	t saniye	r metre
1	0,0226	1	0,0229	1	0,0232	1	0,0236	1	0,0245
2	0,0232	2	0,0238	2	0,0245	2	0,0253	2	0,0273
3	0,0239	3	0,0247	3	0,0258	3	0,0271	3	0,0304
4	0,0245	4	0,0257	4	0,0272	4	0,0290	4	0,0339
5	0,0252	5	0,0267	5	0,0287	5	0,0311	5	0,0378
6	0,0259	6	0,0278	6	0,0303	6	0,0333	6	0,0421
7	0,0266	7	0,0289	7	0,0319	7	0,0357	7	0,0470
8	0,0273	8	0,0301	8	0,0336	8	0,0383	8	0,0523
9	0,0281	9	0,0313	9	0,0355	9	0,0411	9	0,0583
10	0,0288	10	0,0325	10	0,0374	10	0,0440	10	0,0650

V_r 'nin önemi kadar, bir partikül üzerine uygulanan kuvvetlerde önemli olmaktadır. Birim partikül üzerine uygulanan toplam kuvvetler ve bileşkesi aşağıdaki gibidir.

$$F_{Net} = F_L + F_d + F_C = 0 \quad (6.5)$$

Burada F_L itme kuvvetidir ve ihmal edilmektedir. Tekrar güncellenirse;

$$F_d - F_C = 0 \quad \text{Yani;} \quad F_d = F_C = 0 \quad (6.6)$$

F_D ve F_C kuvvetleri sırasıyla, Sürüklenme ve Merkezkaç kuvvetidir. formülize edersek;

$$F_d = F_C \quad (6.7)$$

Olur. Ve eşitliği detaylandırırsak;

$$6. \pi. \mu. V r. R = \frac{v^2.m}{r} \quad (6.8)$$

Gibi eşitlik ortaya çıkacaktır. (6.2) ve (6.8) denklemleri kullanılarak, partiküllerin askıda kalınması için gerekli dönme devri bulunmaktadır. (denklem (6.3)'e göre bulundu) Merkezkaç kuvveti olan F_c kuvveti, SiC partikülünün, pota iç cidarına doğru savrulmasıyla oluşur. Aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (6.9)$$

Formüldeki değerler yerine koyulursa;

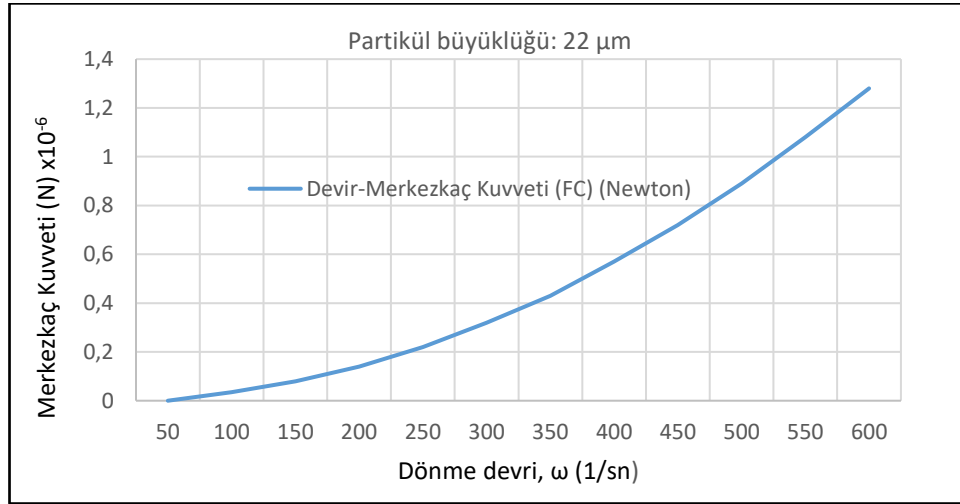
$$F_c = 1,43 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{v^2}{0,025} \quad (6.10)$$

Olur. Burada, Merkezkaç kuvveti, 'V' çizgisel hız değerine yani dönme devrine ve V_r 'ye göre değişmektedir. Tablo 6.5 de, denklem (6.10) kullanılarak farklı devirlerde merkezkaç kuvvetleri hesaplanmıştır.

Tablo 6.5: Dönme devrine bağlı merkezkaç kuvvetleri değişimi.

ω (1/sn)	V (m/sn)	F_c (N)
50	1,25	$0,0089 \cdot 10^{-6}$
100	2,50	$0,035 \cdot 10^{-6}$
150	3,75	$0,080 \cdot 10^{-6}$
200	5,00	$0,14 \cdot 10^{-6}$
250	6,25	$0,22 \cdot 10^{-6}$
300	7,50	$0,32 \cdot 10^{-6}$
350	8,75	$0,43 \cdot 10^{-6}$
400	10,00	$0,57 \cdot 10^{-6}$
450	11,25	$0,72 \cdot 10^{-6}$
500	12,50	$0,89 \cdot 10^{-6}$
550	13,75	$1,08 \cdot 10^{-6}$
600	15,00	$1,28 \cdot 10^{-6}$

Tablo 6.5 e göre potanın dönme devrinin artmasıyla beraber, merkezkaç kuvvetinde arttığı gözükmektedir. Bu durumu grafik eğrisinde Şekil 6.3 de gösterildiği gibidir.



Şekil 6.3: Merkezkaç kuvvet ile Devir değişimi.

Partikül üzerinde oluşan diğer kuvvet ise 'F_g' yer çekimi kuvvetidir. Dönme esnasında bu kuvvet oldukça düşük olur. Aşağıdaki (6.11) denklem 22 μm çapındaki partikül için kullanılarak hesaplanılır.

$$F_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \Delta\rho \cdot g \quad (6.11)$$

Değerler yerine koyulursa;

$$F_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 0,000022^3 \cdot 0,830 \cdot 1000 \cdot 9,81 \quad (6.12)$$

F_g = 3,63.10⁻¹⁰ olarak hesaplanır. Burada potanın sabit durduğu varsayılmaktadır.

F_d sürüklenme kuvveti ise denklem (5.8)'e göre hesaplanır.

$$F_d = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot V_R \cdot R \quad (6.13)$$

Değerler yerine koyulursa;

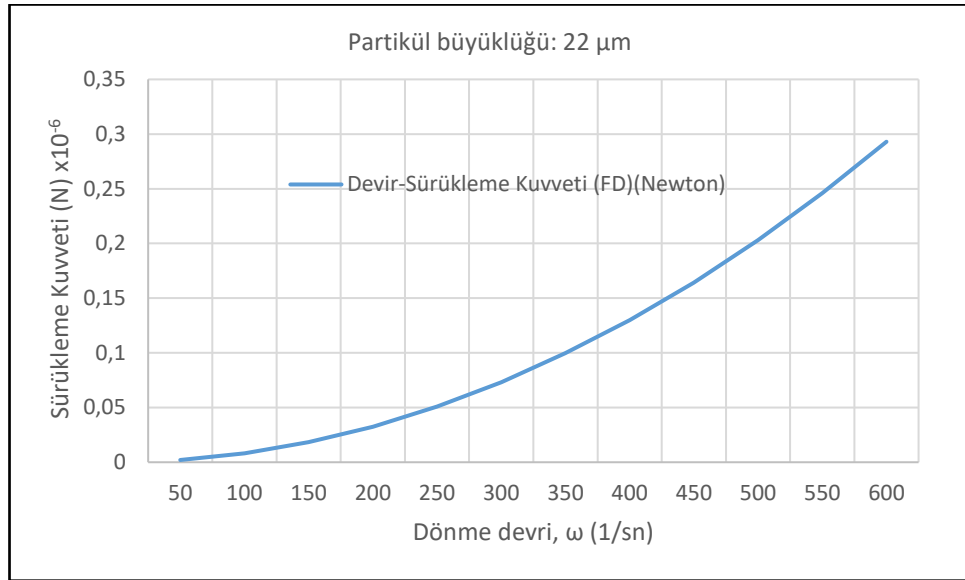
$$F_d = 6 \cdot \pi \cdot 0,00138 \cdot V_R \cdot 0,000022 \quad (6.14)$$

F_d nin V_r ye bağlı bir fonksiyon olduğu gözükmektedir. Aşağıdaki Tablo 6.6 da farklı dönme devirlerinde, sürüklenme kuvveti sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.6: Dönme devrine bağlı sürüklenme kuvvetleri değişim.

V_r (m/sn)	ω (1/sn)	F_d (N)	V_r (m/sn)	ω (1/sn)	F_d (N)
0,003558	50	$0,00203 \cdot 10^{-6}$	0,174318	350	$0,0997 \cdot 10^{-6}$
0,01423	100	$0,00814 \cdot 10^{-6}$	0,22768	400	$0,130 \cdot 10^{-6}$
0,032018	150	$0,0183 \cdot 10^{-6}$	0,288158	450	$0,164 \cdot 10^{-6}$
0,05692	200	$0,0325 \cdot 10^{-6}$	0,35575	500	$0,203 \cdot 10^{-6}$
0,088938	250	$0,0508 \cdot 10^{-6}$	0,430458	550	$0,246 \cdot 10^{-6}$
0,12807	300	$0,0732 \cdot 10^{-6}$	0,51228	600	$0,293 \cdot 10^{-6}$

Sürüklenme kuvvetinin, Dönme devrine bağlı olarak değişimi, grafik eğrisi Şekil 6.4 de verilmiştir. İnceleyecek olursak;



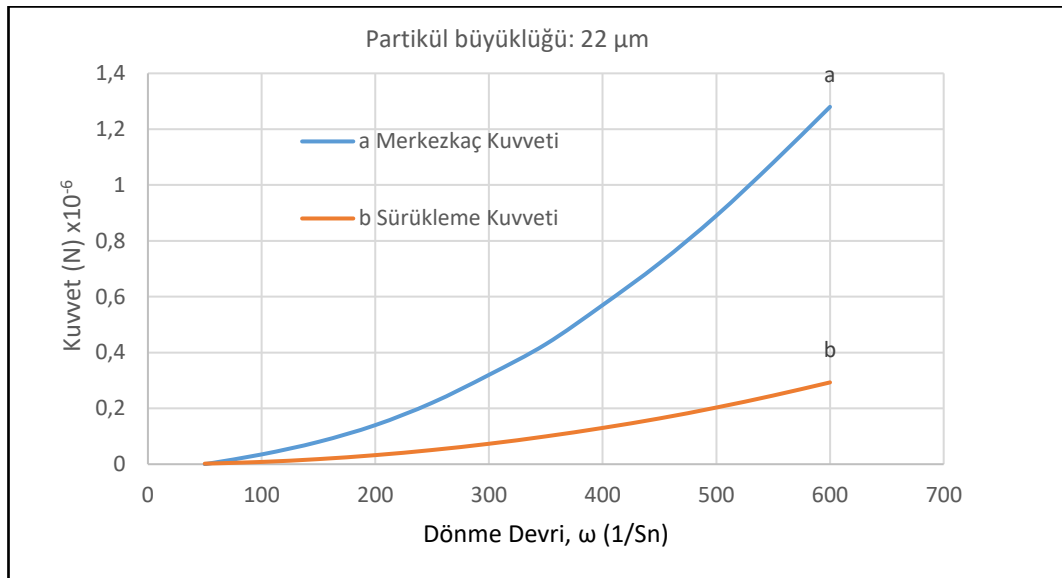
Şekil 6.4: Sürüklenme kuvveti-dönme devri değişimi.

Tablo 6.7 de ise tüm kuvvetlerin dönme devrine bağlı değerleri verilmiştir.

Tablo 6.7: Devire bağı kuvvetlerin değışimi.

ω (1/sn)	F_C (N)	F_G (N)	F_d (N)	V_r (m/sn)
50	$0,0089 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,00203 \cdot 10^{-6}$	0,003558
100	$0,035 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,00814 \cdot 10^{-6}$	0,014230
150	$0,080 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,0183 \cdot 10^{-6}$	0,032018
200	$0,14 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,0325 \cdot 10^{-6}$	0,056920
250	$0,22 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,0508 \cdot 10^{-6}$	0,088938
300	$0,32 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,0732 \cdot 10^{-6}$	0,128070
350	$0,43 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,0997 \cdot 10^{-6}$	0,174318
400	$0,57 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,130 \cdot 10^{-6}$	0,227680
450	$0,72 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,0164 \cdot 10^{-6}$	0,288158
500	$0,89 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,0203 \cdot 10^{-6}$	0,355750
550	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,0246 \cdot 10^{-6}$	0,430458
600	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$0,0293 \cdot 10^{-6}$	0,512280

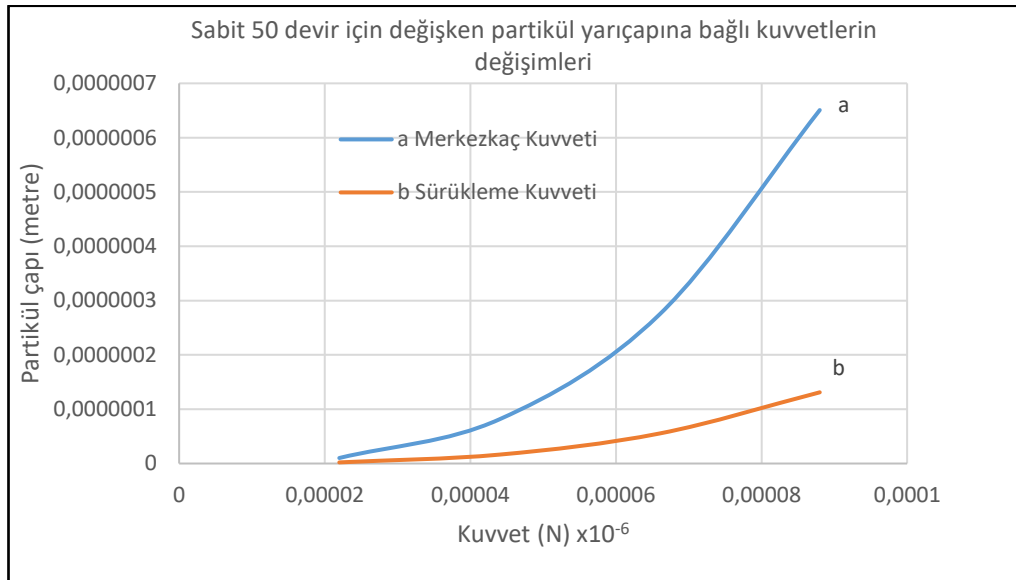
Dönme devrine, partikül yarıçapının sabit olması şartıyla, sürüklenme ve merkezkaç kuvvetlerine etkisi ve birbiri ile ilişkisini gösteren grafik eğimleri Şekil 6.5 deki gibidir.



Şekil 6.5: Devire bağı kuvvet değışimleri.

Şekil 6.5 e göre, devrin artmasıyla beraber, kuvvetler arasındaki büyüklük farkı da arttığı gözükmektedir. Daha hızlı artış sağlayan kuvvet, merkezkaç kuvveti olduğundan dolayı, toplam kuvvet sıfır olmayacaktır. Yani partiküller, büyük olan kuvvetin doğrultusunda hareket edecektir. 600 devir, partiküllerin merkezden, potanın iç cidarına doğru güçlü bir şekilde hareket etmesi için en uygun devir olduğu gözükmektedir. Fakat çalışmamızdaki amaçlardan biri olan, faz ayırımının gözlemlenmesi için partiküllerin mümkün olduğunca askıda kalması yani partikül üzerindeki toplam kuvvetin sıfır olması gerekmektedir. Bundan dolayı grafik incelenirse, düşük devir kullanmamızın gerekliliği ortaya çıkacaktır.

Partikül yarıçapının, Dönme devrine sabit olması şartıyla, sürüklenme ve merkezkaç kuvvetlerine etkisi ise Şekil 6.6 ve Şekil 6.7 deki grafikteki gibidir.



Şekil 6.6: 50 dev/dak ile partikül yarıçapına bağlı merkezkaç ve sürüklenme kuvvetlerinin değişimi.



Şekil 6.7: 200 dev/dak ile partikül yarıçapına bağlı merkezkaç ve sürüklenme kuvvetlerinin değişimi.

grafikler incelenecek olursa, partikül yarıçapının artması, merkezkaç kuvvetini, sürüklenme kuvvetine göre ciddi arttırdığı gözükmektedir. 200 devir ile savrulan partiküllerin oluşturduğu merkezkaç kuvvet ise, 50 devirle oluşan merkezkaç kuvvetlerden daha yüksek çıkmıştır.

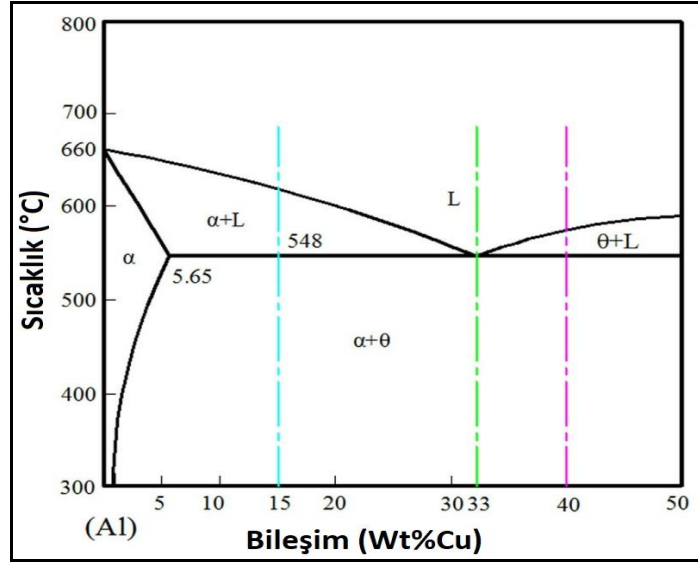
6.2 Kompozit yapı bileşen oranlarının hesaplanması ve proses parametrelerinin belirlenmesi

Çalışmada, metal anayapı olarak Al-Cu ve takviye olarak SiC partikülleri kullanılmıştır.

Alüminyum, daha çok hafif olması sebebiyle, otomotiv ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif olmasına rağmen, dayanım özellikleri oldukça iyidir. Fakat yüksek sıcaklıklarda, bu özellikleri, ciddi oranda düşmektedir. Yüksek sıcaklıklarda, dayanım özelliklerini koruyabilmek için farklı takviye fazları ilave edilmektedir. [23].

Deneylerde kullanılan Al-Cu denge faz diyagramı Şekil 6.8 de verilmiştir. Yapı, yüksek aşınma dayanımı, yüksek mukavemet, sıcakta düşük mukavemet, düşük termal genleşme ve ergitilmiş haldeki yüksek viskozite gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Cu özgül ağırlığı Al' den çok büyüktür. Bu da alaşımın yoğunluğunun

artmasına neden olmaktadır. Şekil 6.8 den anlaşılacağı üzere maksimum % 5,65 Cu noktaya kadar Al-Cu alaşımı solvus eğrisine sahiptir ve ısıl işlemle çökeltme sertleşmesi özelliği gösterir. Bu durum Al-Cu anayapı alaşımının ısıl işlem ile ilave sertlik kazanmasına ve CuAl_2 fazlarının oluşmasına sebep olur. Deneysel çalışmada bu özelliği dikkate alarak Al-Cu-SiC kompozit yapının santrifüj yöntem ile hem katmanlı üzerimi hem de ilave mukavemet artışı imkanı verir.



Şekil 6.8: Al-Cu denge faz diyagramı.

Çalışmada ise %11 civarında SiC miktarı kullanılarak, ötektik alaşım üretilmiştir. Bazı sayısal veriler Tablo 6.8 de verildiği gibidir.

Tablo 6.8: Al-Cu-SiC kimyasal oranları.

Malzeme	Bileşenlerin ağırlıkları (gr)	Bileşenlerin Hacimsel miktarları (cm^3)	Hacimsel oran (%)	Kütlesel oran (%)	Partikül Yarıçapı (μm)	Katı Haldeki Yoğunluk (gr/cm^3)	Sıvı Haldeki Yoğunluk (gr/cm^3)
Al	10,00	3,70	89,59	85,47	25,0	2,71	2,38
Cu	0,50	0,06	1,33	4,27	10,0	8,96	8,02
SiC	1,20	0,37	8,96	10,26	22,0	3,21	-
Toplam	11,7	4,13	100,0	100,00			

Saf Al ergime sıcaklığı 660°C derecedir. Deneysel çalışmada fırın sıcaklığını düşürmek için ana yapıya ağırlıkça %5 Cu ilave edilmiştir ve alaşımın ergime sıcaklığını yaklaşık

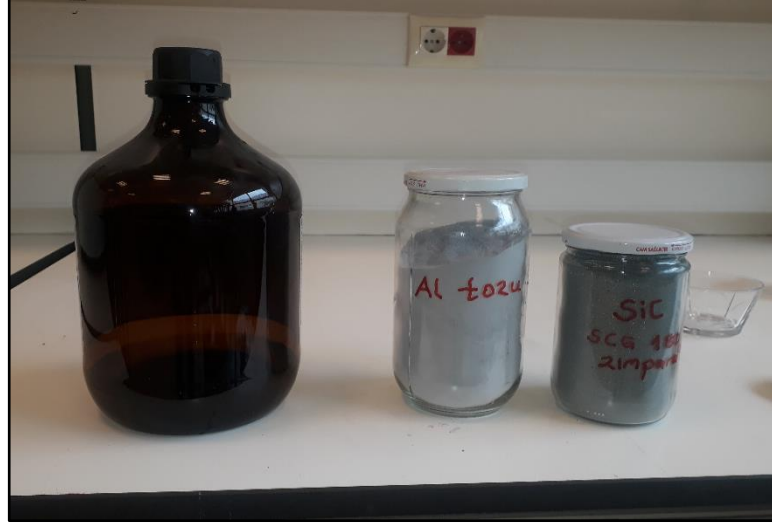
550°C dereceye indirilmiştir. Metal Alaşıma ilave olarak, ötektik sıcaklığın düşürülmesi için Cu ilave edilmiştir. Kompozit yapıdaki Cu elementinin hacimsel miktarı %1,33 ve ağırlıkça % 4,27'dir.

İlk olarak Al anayapı içerisine ağırlıkça % 4,27 Cu ilave edilmiştir. Toz karışımı seramik bir potada bir miktar etil alkol ilave edilerek homojen olarak el ile karıştırılmıştır. Pota içerisine Al-Cu toz karışı yerleştirilmiş orta kısmına ise SiC tozları yerleştirilmiştir. Pota dönme esnasında merkezden dışarı doğru hareketleneceğinden sıvı anayapı içerisindeki dağılımı daha kolay görme imkanı olacaktır. Pota içerisinde kompozit bileşenlerin görünümü Şekil 6.9 da verilmiştir.



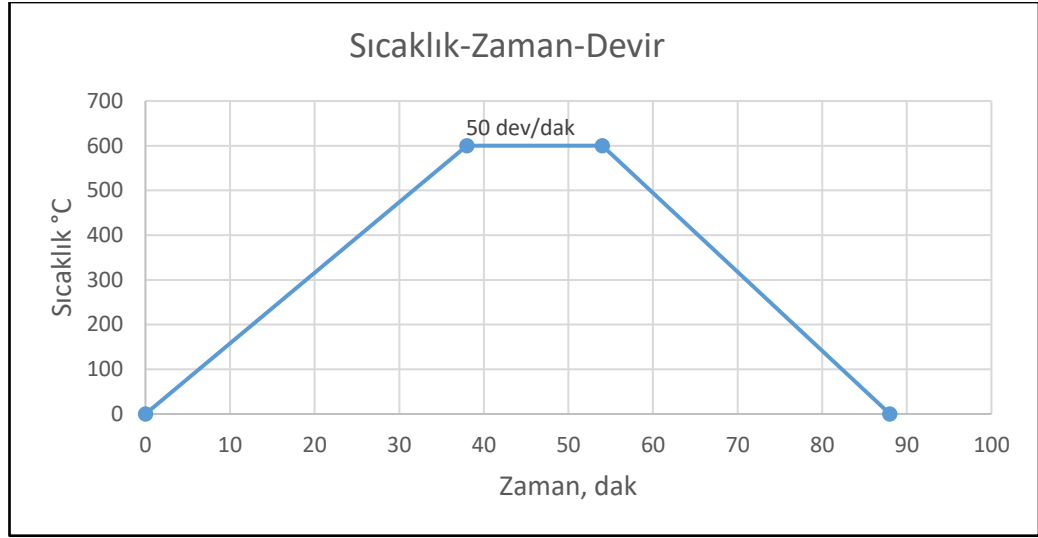
Şekil 6.9: Pota içerisindeki partiküllerin konumu.

Karışım içerisindeki tozların homojen karışımını sağlamak amacı ile seramik pota içerisine bir miktar etil alkol Şekil 6.10 da gösterildiği gibi ilave edilmiştir.



Şekil 6.10: Al-SiC partikülleri ve Etil alkol.

Al-Cu-SiC kompozit yapının ilk santrifüj deneyindeki parametre değişimleri, Şekil 6.11 de verilmiştir.



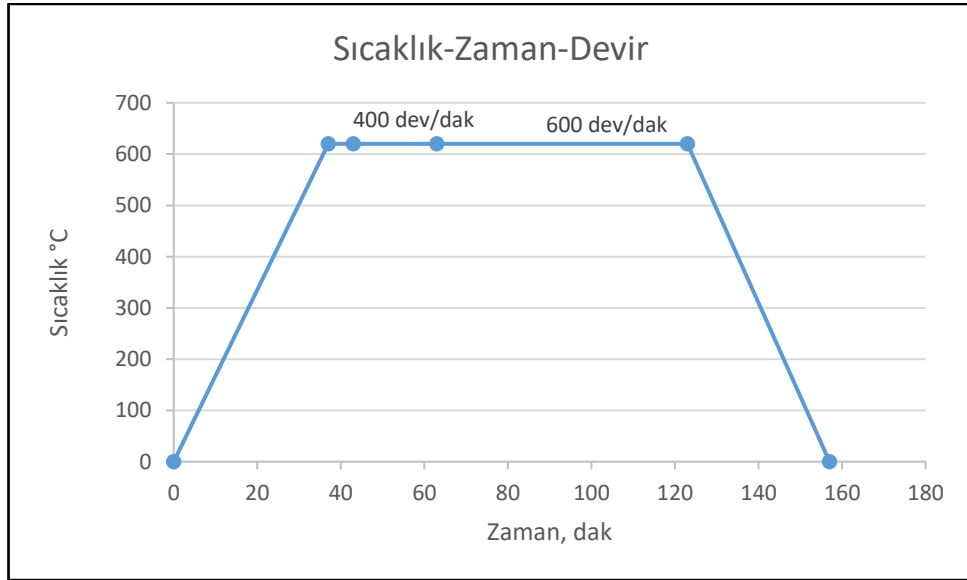
Şekil 6.11: 1. Deney Sıcaklık-Zaman-Devir değişimi

Katılaşma sonucunda oluşan numunelerin görüntüsü Şekil 6.12 deki görsellerde gösterilmiştir.



Şekil 6.12: 600°C de 16 dakika da 50 dev/dak ile yapılan 1.deney sonucu numune.

Şekil 6.12 den anlaşılacağı üzere kalıp içerisindeki kompozit anayapının 50 dev/dak ve gösterge sıcaklığı altında sıvı faza geçmesi beklenirken bu durum gerçekleşmemiştir. Bunun deney ekipmanlarından ve ölçüm aletlerinden kaynaklı olup olmadığı hususunda yeterince deney alt yapımız müsait olmamıştır. İlave yapılan deney planlarında önce 400 dev/dak hız ve daha sonra 600 dev/dak hızlarda deneysel çalışmalar tasarlanmıştır. Farklı dönme hızlarının farklı partikül çaplarındaki takviye fazının etkisini görmek amacı ile öngörülmüştür. Şekil 6.13 da ilave yapılan deneylerden 4.deneyin parametre değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 6.13: 4. Deney Sıcaklık-Zaman-Devir değişimi

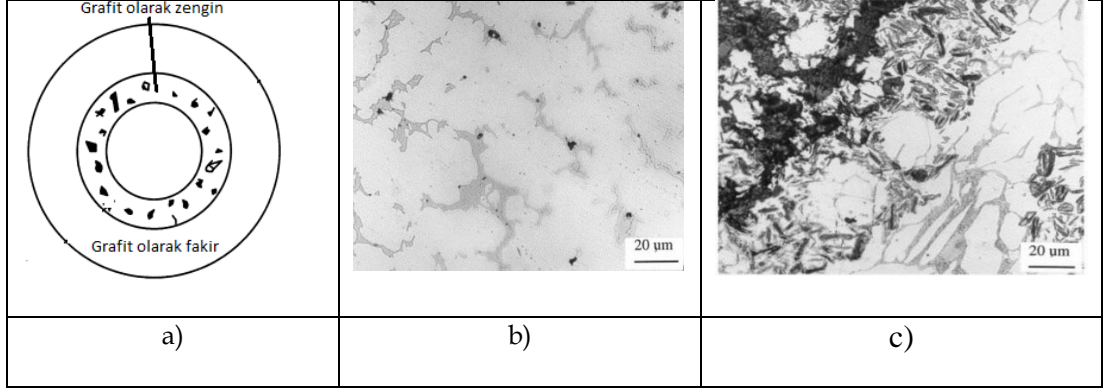
6.3 Teorik çalışmaları ile literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen deneysel verilerin desteklenmesi

Kim ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [20] Cu alaşımı (C90300) indüksiyon fırını kullanılarak bir grafit potada ergitilmiştir. Çalışmada kullanılan Cu alaşımının bileşimi Tablo 6.9 da gösterilmektedir. 1150°C'de ergitilmiş C90300 alaşıma beş mikron büyüklüğünde grafit parçacıkları eklenmiştir. Süspansiyonda hacimce %7 grafit parçacıkları içeren ergitilmiş Cu alaşımlarından oluşan bir karışım (3.5 kg), yatay bir santrifüj makinesine yerleştirilmiş grafit kalıba bir boşaltma kabı içinden dökülmüştür. Deneylede, 800 veya 1900 dev/dak iki farklı hız kullanılmıştır. Kalıbın dönüşü sırasında kalıba dökülen karışım, merkezkaç kuvvetleri nedeniyle silindirik kalıbın şeklini almıştır. Kalıp dönme esnasında dış çeperden içeri doğru kademeli olarak katılarak silindirik bir döküm haline gelmiştir. Üretilen silindirik dökümlerin boyutları 9.5 cm dış çap, 8 cm iç çap ve 13 cm uzunluğundadır. Dökümlerin farklı bölgelerinden numuneler alınarak incelenmiştir [20].

Tablo 6.9: Çalışmada kullanılan Cu alaşımı(C90300) bileşimleri

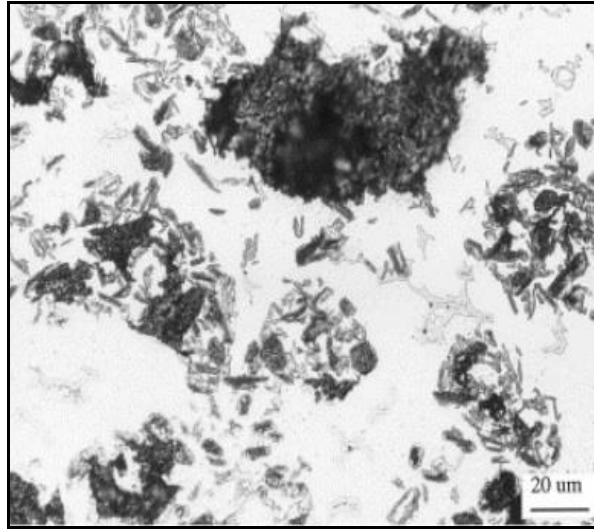
	Cu	Sn	Kurşun	Zn	Ni	P
Ağırlık%	88.05	7.85	0,16	3,51	0,30	0,05

Şekil 6.14 de, 800 dev/dak da dönen 9.5 cm dış çaplı bir kalıba dökülmüş, orijinal olarak hacimce %7 grafit parçacıkları içeren santrifüjle dökülmüş Cu alaşımının grafitsiz ve grafit açısından zengin bölgelerinin mikro yapısını göstermektedir. Bu şekil, grafit parçacıklarının, Cu eriyiğinkinden daha düşük yoğunluk nedeniyle iç çevreye yakın bir yerde ayrıldığını göstermektedir. Grafit açısından zengin bölgenin kendisinde, grafit parçacıkları son katılan interdendritik bölgelerde ayrılmıştır. Bu, merkezkaç kuvvetleri nedeniyle iç çevre yakınında yoğunlaşan parçacıkların bu bölgedeki katılan ara yüzler tarafından itildiğini ve interdendrit bölgelerinde daha fazla ayrıldığını göstermektedir.



Şekil 6.14: (a) Silindirik dökümün grafit içermeyen bölgeyi ve grafit bakımından zengin bölgeyi gösteren enine kesitin şematik gösterimi. (b) 800 dev/dak da dökülmüş, hacimce %7 grafit parçacıkları içeren santrifüjlü döküm Cu alaşımının mikro yapısı, grafitsiz bölge ve (c) grafit açısından zengin bölge.

Şekil 6.15 de ayrıca, 1900 dev/dak da dönen 9.5 cm'lik dış çaplı bir kalıba dökülmüş, hacimce %7 grafit parçacıkları içeren santrifüjle dökülmüş Cu alaşımının grafit açısından zengin bölgesinin mikro yapısını göstermektedir.



Şekil 6.15: Grafit açısından zengin bölgede hacimce %7 grafit parçacıkları içeren, 1900 dev/dak da dökülen santrifüj döküm Cu alaşımının mikro yapısı.

Bu şekil, Şekil 6.13'de gösterilene benzer bir eğilimi, yani dökümün iç çevresine yakın grafit parçacıklarının konsantrasyonunu ve arabirim tarafından parçacıkların itilmesi nedeniyle interdendritik bölgelerde grafit parçacıklarının ayrışmasını göstermiştir [20].

Sindhu ve arkadaşları[9] tarafından yapılan çalışmada Al 6061 alaşımı, mühendislik ve yapısal uygulamadaki geniş kapsam nedeniyle temel matris olarak seçilmiştir. Tablo 6.10 da takviye TiB₂, ergitilmiş alaşımda potasyum hekzaflorotitanat (K₂TiF₆) ve potasyum tetrafloroborat (KBF₄) tuzları kullanılarak sentezlenmiştir. Tuzlar, alaşımda ağırlıkça %5 TiB₂ partikülleri oluşturmak için ekzotermik reaksiyona girmek üzere matris eriyiği ile önceden tanımlanmış oranda karıştırılmıştır.

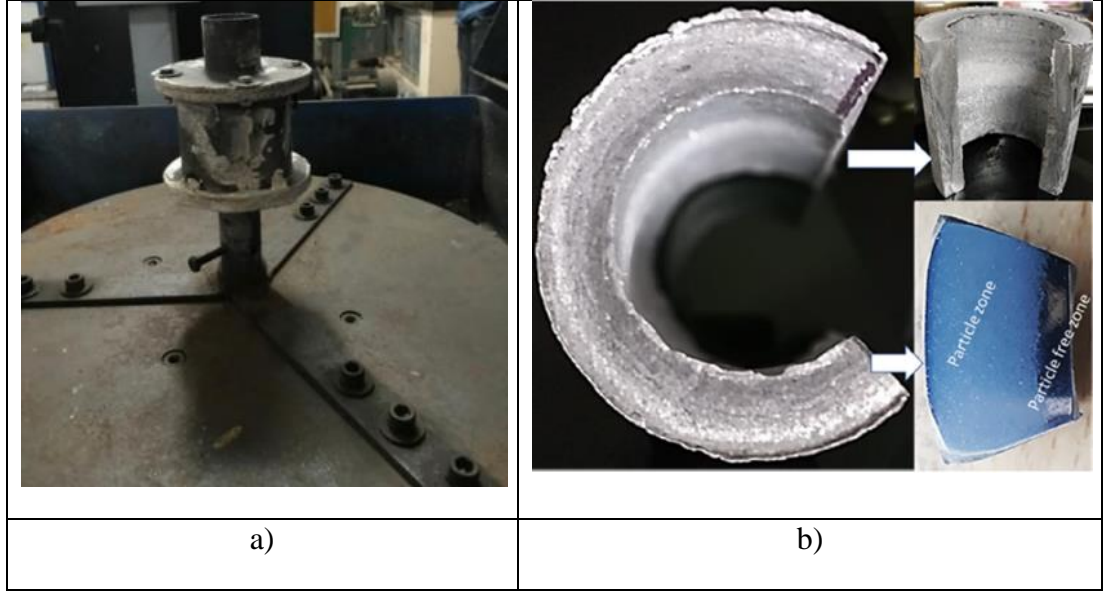
Tablo 6.10. Alüminyum 6061 alaşımının kimyasal bileşimi (ağırlık oranı, %).

Al	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Zn	Ti	Mn
96,85	0,9	0,7	0,6	0,30	0,25	0,20	0,10	0,05

1,0 kg 6061 alaşımı bir elektrik dirençli fırında ergitilmiştir. Tuz karışımı, 750°C'de aşırı ısıtılmış eriyiğe elle ilave edilmiştir. Ergimiş metal, reaksiyonun tamamlanması için bir grafit pervane ile 15-30 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, 600 gr metal dikey bir santrifüj kalıba dökülmüştür ve karşılaştırma için geri kalan yerçekimi ile metal bir kalıba dökülmüştür. Döküm parametreleri Tablo 6.11'de verilmiştir. Uzunluğu 89 mm, dış çapı 65 mm ve kalınlığı 15 mm olan içi boş bir Al/TiB₂ fonksiyonel derecelendirilmiş metaller (FDM) silindiri, Şekil 6.16 'da gösterildiği gibi dökülmüştür [9].

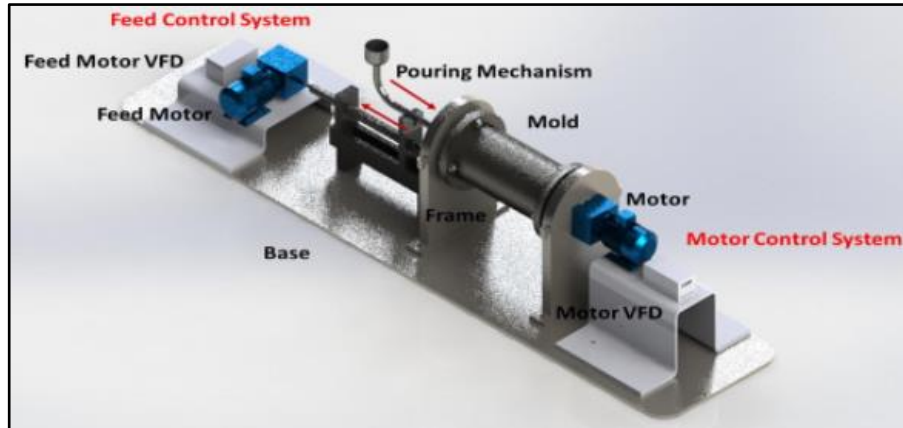
Tablo 6.11: Savurma döküm için kullanılan işlem parametreleri.

Proses parametreleri	Değerleri
Döküm sıcaklıkları	780°C
Kalıp sıcaklığı	300°C
Dönme hızı	1200 dev/dak



Şekil 6.16: (a) Dikey savurma döküm düzeni; (b) santrifüj dökümle FGMMC A6061/TiB2 döküm (dış bölge-partikül açısından zengin bölge; iç bölge-madde tüketim bölgesi).

El Galy ve arkadaşları [17] tarafından yapılan çalışmada, santrifüj döküm ile saf Al-SiC FGM'lerin imalatı yapmışlardır. Şekil 6.17 de şeması görülen savurma döküm makinesi gerekli deneyleri yapacak şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir.



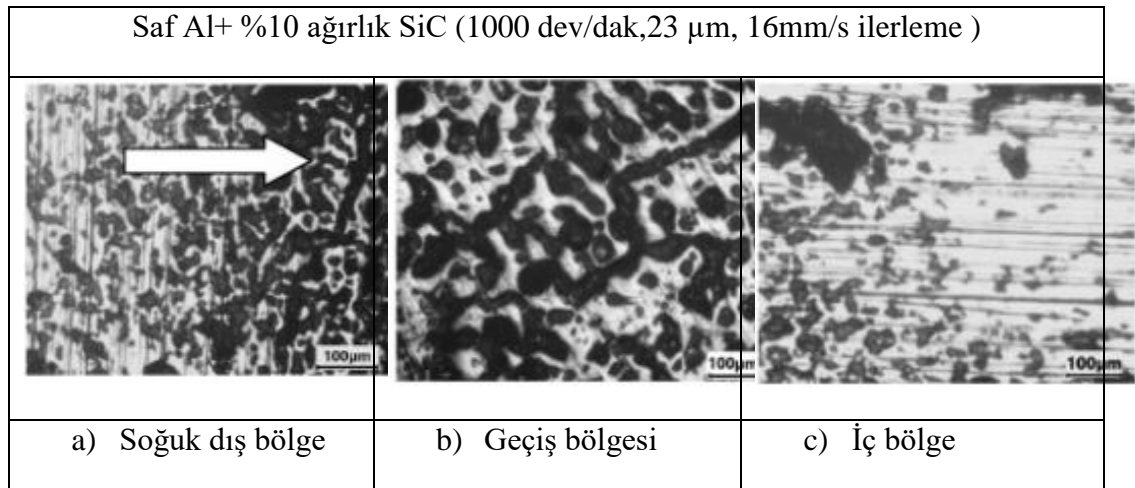
Şekil 6.17: Yatay santrifüj döküm makinesinin şeması.

Makine, kalıbın dönme hızını 500–2500 dev/dak aralığında kontrol etmek için bir değişken frekanslı sürücü ve besleme borusunun aksenal hızını 5–50 mm aralığında kontrol etmek için ikinci bir değişken frekanslı sürücü ile donatılmıştır. Matris malzemesi olarak ticari olarak saf alüminyum kullanılmıştır. SiC partikülleri eklenerek

güçlendirme yapılmıştır. Derecelendirilmiş metal anayapılı kompozitler, santrifüj döküm tekniği ile SiC parçacıklarının farklı ağırlık fraksiyonları ile üretilmiştir. Deneysel çalışmada metal bir grafit potada 670 °C'de ergitilmiş ve 725 °C' lik döküm sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. SiC tozu, ergimiş metal ağırlığına göre farklı ağırlık yüzdelerinde (ağırlıkça %0, 2,5, 5, 7,5, 10 ve 15) eklenmiştir. SiC partikülleri 100 dev/dak hızında karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Karışım, dış çapı 230 mm, et kalınlığı 12 mm ve uzunluğu 180 mm olan FGM tüpü üretmek için farklı dönüş hızlarına (800, 900 veya 1000 dev/dak) ayarlanmış santrifüj döküm makinesine dökülmüştür. Metalografik numuneler, döküm FGM tüplerinden duvar kalınlığı boyunca kesilerek mikroskopik incelemeleri yapılmıştır. SiC parçacıklarının alüminyum matris içindeki dağılımındaki farklılık belirlenmiştir.

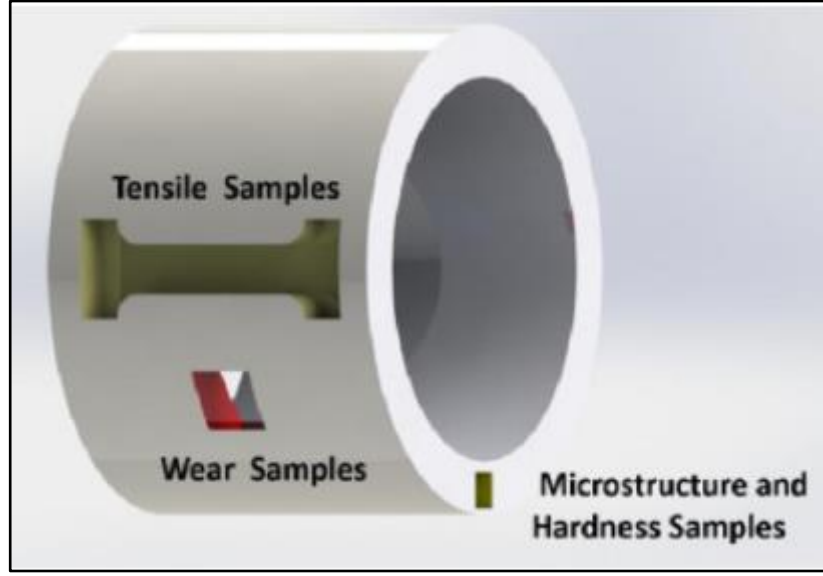
12 mm kalınlığındaki numunenin her birinde dört farklı bölge tanımlanmıştır. Numunelerin incelenmesi, dış bölgedeki en yüksek SiC konsantrasyonları ile matris içindeki SiC parçacıklarının dereceli dağılımını gösterir.

Şekil 6.18 üretilen fonksiyonel kademeli tüplerin kalınlığı boyunca alınan numunelerin mikro yapısını göstermiştir. Üç görüntünün her biri, kalınlık boyunca 4 mm'lik bir bölge içindeki tipik dağılımı temsil etmiştir. Şekil 6.18 a, soğuk ve dış bölgeleri, Şekil 6.18 b, geçiş bölgesini ve Şekil 6.18 c, geçiş bölgesinin sonuna yakın iç bölgenin başlangıcını temsil etmektedir.



Şekil 6.18: 23 µm'lik ağırlıkça %10 SiC ile FGM'nin mikro yapısı.

Ortaya çıkan FGM yapılarının mekanik testini gerçekleştirmek için farklı numuneler hazırlanmıştır. Şekil 6.19 çekme, sertlik ve aşınma testlerinde kullanılmak üzere kesilmiş numunelerin konumlarını göstermektedir. [17]



Şekil 6.19: Kesilen numunelerin yerleri.

7. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Tez çalışmasında Al-SiC kompozit yapının soğuma esnasında santrifüj yöntem ile fonksiyonel derecelendirilmiş bir kompozit yapı elde etmek amacı ile laboratuvar ortamında bir deney düzeneği tasarlanmış ve prototip modeli üretilmiştir.

Isı kaynağı olarak bir adet dikdörtgen kesitte bir ısıtım işlem fırını tasarlanmıştır.

Fırının içinde numune almak ve çıkartmak amacı ile lineer kızaklar ile desteklenmiştir. Fırının merkezinde dışardan servo motor ile tahrik edilen bir mil ve bu mile sabitlenebilen bir pota eklenmiştir.

Deneylerde Al anayapı ve SiC parçacık takviyeli kompozit bir yapı üretilmesi hedeflenmiştir. Numune potası fırın içerisinde santrifüj dönme hareketi yaparken aynı zamanda ortam 700 °C dereceye kadar ısıtılmıştır.

Merkezkaç kuvvetinin oluşumu ve şiddeti potanın iç çapı ve dönme hızı ile doğrudan ilişkilidir. Dönme esnasında sıvı faz içerisinde yüzen partiküle etkileyen F_c , F_d dikkate alınmıştır.

Kompozit yapı soğuma esnasında katılaşma sürecinde tam olarak ağırlıkça fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapılarına ayrışabilmesi için partiküllerin dönme merkezinden uzaklaşma hızlarının farklı büyüklüklerde olması gerekmektedir.

Dönme esnasında partikülün zamana bağlı yer değiştirmesi dönme devrine ve partikül boyutuna da bağlı olarak değişmektedir.

Al alaşımları genel olarak hafif olması sebebiyle, otomotiv ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif olmasına rağmen, dayanım özellikleri oldukça iyidir. Fakat yüksek sıcaklıklarda, bu özellikleri, ciddi oranda düşmektedir. Yüksek sıcaklıklarda, dayanım özelliklerini koruyabilmek için farklı takviye fazları ilave edilmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar ile tez çalışmasında yapılan deneysel tasarımda benzer yaklaşımlar elde edilmiştir. Şöyleki; 1150°C'de ergitilmiş C90300 alaşıma beş mikron büyüklüğünde grafit parçacıkları eklenmiştir. Deneylerde, 800 veya 1900 dev/dak iki farklı hız kullanılmıştır. Santrifüjle dökülmüş Cu alaşımının grafitsiz ve grafit açısından zengin bölgelerinin mikro yapısını göstermektedir. Bu şekil grafit parçacıklarının, Cu eriyiğinkinden daha düşük yoğunluk nedeniyle iç çevreye yakın bir yerde ayrıldığını göstermiştir.

Başka bir çalışmada Al 6061 alaşımı içerisine TiB_2 fazı sentezlenmiştir. TiB_2 fazlarının dönme merkezine göre dağılımlarının dış çeperde arttığı görülmüştür.

Diğer bir çalışmada Al-SiC kompozit yapının fonksiyonel derecelendirilmiş metal yapı (FGM) imalatı yapmışlardır. Saf alüminyum içerisine SiC partikülleri eklenerek yapı güçlendirilmiştir. FGM kompozitler santrifüj döküm tekniği ile SiC parçacıklarının farklı ağırlık fraksiyonları ile üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Zhang R., Jiang F., Xue L., Yu J.,(2022),’’ Review of Additive Manufacturing Techniques for Large-Scale Metal Functionally Graded Materials’’, Crystals, 12(6), 858.
- [2] Sueri s.,(2015), ‘’fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedeki (fdm) yapılmış kabukların farklı sınır koşulları altındaki dinamik davranışlarının sonlu elemanlar analizi kullanarak hesaplanması’’,Yüksek lisans Tezi, Hacettepe üniversitesi.
- [3] Öktem A.,(2014),’’ fonksiyonel derecelendirilmiş (fd) ileri kompozit plakların statik analizi’’, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,29(1),111-119.
- [4] Savaş Ö., Başer M., (2020), ‘’ Fonksiyonel Derecelendirilmiş Fleyk-Al₃Ti/Al Kompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması’’, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 36(1), 128-136.
- [5] Yousefi M., doostmohammadi h.,(2020),’’ microstructural evolution and solidification behavior of functionally graded in situ al–cr composites during centrifugal casting’’, International Journal of Metalcasting,15(12), 650-663.
- [6] Ebhota W., İnambao F., (2017), ‘’ Functionally graded metal matrix composite by centrifugal casting technique mathematical correlation’’, African Journal of Science, Technology, Innovation and Development,9(6), 739-748.
- [7] El-Hadad S., Sato H., Fujiwara E. Watanabe Y., (2010), ’’ Fabrication of Al-Al₃Ti/Ti₃Al Functionally Graded Materials under a Centrifugal Force’’, Malzemeler 2010, 3(9), 4639-4656.

- [8] Rajan T., Pillai R., Pai B., (2010), ‘‘ Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites’’, *Materials Characterization*, 61(10),923-928.
- [9] Sindhu N., Goyal K., Pullan T., Rajan T., Madam S., (2021), ‘‘ Study on Al/TiB₂ functionally graded metal matrix composites’’, *Materials today: Proceedings*, 44(2), 2945-2951.
- [10] Ali S., (2019),’’The effect of reinforced SiC on the mechanical properties of the fabricated hypoeutectic Al-Si alloy by centrifugal casting’’, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(4), 1125-1135.
- [11] Wu X., Jing H., Zheng Y., Yao Z., Ke W., Hu Z., (2000), ‘‘ The eutectic carbides and creep rupture strength of 25Cr20Ni heat-resistant steel tubes centrifugally cast with different solidification conditions’’, *Materials Science and Engineering: A*, 293(1-2), 252-260.
- [12] Luan Y., Song N., Bai Y., Kang X., Li D.,(2010), ‘‘ Effect of solidification rate on the morphology and distribution of eutectic carbides in centrifugal casting high-speed steel rolls’’, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3), 536-541.
- [13] Tattimani M.,CY M., Reddy B., Badi S., Malipatil A., (2021), ‘‘The effect of rotational speed on quality of sound vertical centrifugal castings tin’’ *Manufacturing Review*, 8(21),7.
- [14] Zhang H., Li X., Liu L., Ma T., Wang Q., Liu J., (2020), ‘‘ Experimental investigation on paraffin melting in high porosity copper foam under centrifugal accelerations’’, *Applied Thermal Engineering*, 178(2), 1-7.
- [15] Wang Y., Qin F., Qi H., Qi H., Meng Z., (2022), ‘‘ Interfacial Bonding Behavior and Mechanical Properties of a Bimetallic Ring Blank Subjected to Centrifugal

- Casting Process” Journal of Materials Engineering and Performance, 31(1), 3249-3261.
- [16] Kim S., Lee Y., Lee J., Lim S., Jung T., Hyun S., (2019), “ Pore characteristics of Lotus-Type Porous Copper Fabricated by Centrifugal Casting”, Metal and Materials International, 26, 660-667.
- [17] Galy I., Ahmed M., Bassiony B., (2017), “ Characterization of functionally graded Al-SiCp metal matrix composites manufactured by centrifugal casting”, Alexandria Engineering Journal, 56(4), 371-381.
- [18] Castro R., Wetherhold R., Kelestemur M., (2002), ” Microstructure and mechanical behavior of functionally graded Al A359/SiCp composite”, Materials Science and Engineering: A, 323(1-2), 445-456.
- [19] Wen X., Guo L., Bao Q., Guo Z., (2020), “ Separation of silver from bismuth melt in a centrifugal separator with zinc as an additive”, Minerals Engineering, 157,1-14.
- [20] Kim J., Rohatgi P., (1998), “ Interaction between moving cellular solidification front and graphite particles during centrifugal casting”, Materials Science and Engineering:A,244(2), 168-177.
- [21] Mohapatra S., Sarangi H., Mohanty U., (2020), “ Effect of processing factors on the characteristics of centrifugal casting”, Manufacturing Review, 7(26),15.
- [22] Stober K., (2019), “ An Investigation of the Centrifugal Casting of Paraffin Wax on Earth and in Microgravity, Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, 2019-October, 1-23.
- [23] Balot B., Litwin J.,(2012), “Mathematical Modeling of Particle Segregation During Centrifugal Casting of Metal Matrix Composites”, Journal of Materials Engineering and Performance, 21(4), 450-462.

- [24] Eser U., (2019), ‘‘ Alüminyum Silisyum Alaşımlarında Bor ile Tane İnceltme’’, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [25] Panda E., Mehrotra S., Mazumdar D.,(2006), ‘‘ Mathematical modeling of particle segregation during centrifugal casting of metal matrix composites’’, Metallurgical and Materials Transactions A, 37, 1675-1687.

ÖZGEÇMİŞ

Harun YALÇIN, 2011 yılında Ankara Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Talaşlı Üretim Öğretmenliği bölümünden mezun olmuştur. 2014 yılında ise, Niğde Üniversitesi, Makine Mühendisliğinden mezun olmuştur. 2015 yılında, Milli Eğitim Bakanlığında, Öğretmen olarak göreve başlamıştır. 2020 yılında ise Gebze Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine, Prof. Dr. Fevzi BEDİR ile beraber devam etmektedir. 2020 yılından itibaren, Tuzla İTOSB. MTAL de makine öğretmeni olarak görevine devam etmektedir.