

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYBOLAN KÖPÜK YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM DÖKÜMLERİ İÇİN
HIZLI SOĞUTMA İŞLEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

İbrahim TÜTÜK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Programı

Danışman
Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Temmuz, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYBOLAN KÖPÜK YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM DÖKÜMLERİ İÇİN
HIZLI SOĞUTMA İŞLEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

İbrahim TÜTÜK tarafından hazırlanan tez çalışması 05.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan GECÜ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN, Üye
Gedik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kaybolan Köpük Yöntemiyle Alüminyum Dökümleri İçin Hızlı Soğutma İşleminin Geliştirilmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İbrahim TÜTÜK

İmza

Bu alışma 120M819 numaralı, “Kaybolan Köpük Döküm Yöntemi İçin Direkt Su Soğutma İşleminin Geliştirilmesi” adlı TÜBİTAK-1002 programı kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamdaengin bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen ve bilgimin sınırlarını zorlamam için bana ilham kaynağı olan değerli hocam Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER'e; deneysel çalışmalarımda ve bütün öğrencilik hayatımda benden hiçbir zaman desteğini ve tecrübelerini esirgemeyen Arş. Gör. Serhat ACAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatımın her anında yanımda olan, aldığım her kararda arkamda duran aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim TÜTÜK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	5
2 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	6
2.1 Alüminyum	6
2.2 Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	6
2.3 Alüminyum Alaşımları	7
2.3.1 Dövme Alüminyum Alaşımları	7
2.3.2 Döküm Alüminyum Alaşımları	8
3 DÖKÜM İŞLEMİ VE YÖNTEMLERİ	10
3.1 Döküm İşlemi	10
3.2 Alüminyum Döküm İşlemlerinde Mekanik Özellikleri Etkileyen Faktörler	11
3.2.1 Mikroyapıya Bağlı Etkenler	11
3.2.1 Boşluk Hataları	13
3.3 Kum Kalıba Döküm	17
3.3.1 Kalıp Kumu ve Bağlayıcılar	22
3.4 Ablasyon Döküm	28
3.4.1 Ablasyon Dökümde Katılaşma	33
3.4.2 Ablasyon Dökümde Mikroyapı	35
3.5 Kaybolan Köpük Döküm Yöntemi (KKD)	38
3.5.1 Köpük Üretimi (Ön Şişirme)	39
3.5.2 Model Yapımı	40
3.5.3 Model Birleştirme	41
3.5.4 Model Kaplama	41

3.5.5	Kalıp Yapımı	42
3.5.6	Döküm ve Metal Akışı	44
3.6	Direkt Su Soğutma İşleminin KKD Yöntemine Uygulanması	45
4	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
4.1	Model Hazırlama	47
4.2	Kalıp Hazırlama.....	47
4.3	Ergitme ve Döküm İşlemleri	48
4.4	Döküm Sonrası İşlemler	49
4.4.1	Numune Hazırlama ve Mikroyapı İncelemeleri.....	50
4.4.2	Mekanik Deneyler	51
4.5	Ana Parametreler Dışında Yapılan Deneysel Çalışmalar	51
5	DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	53
5.1	Mikroyapı İncelemeleri	53
5.2	Isıl Analiz Verileri	62
5.3	Mekanik Deneyler ve Sonuçları.....	65
5.4	İlave Deneyler ve Analizler	68
6	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
	KAYNAKÇA	75
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	80

SİMGE LİSTESİ

T_{α}	α -Al fazının çekirdeklenmeye başladığı sıcaklık
T_{α}	α -Al fazının çekirdeklenmeye başladığı süre
R_e	Akma Dayanımı
σ_a	Akma gerilimi
Al_2O_3	Alümina
$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$	Alçı taşı
As	Arsenik
Al	Aşınma iz genişliği
Cu	Bakır
Ba	Baryum
R_m	Çekme Dayanımı
Zn	Çinko
Fe	Demir
σ_0	Dislokasyon hareketinin başlaması için gerekli malzeme sabiti
$FeSiO_4$	Fayalit
Mg_2SiO_4	Forsterit
P	Fosfor
$FeSiO_3$	Grunerit
K	Güçlendirme Katsayısı
HF	Hidroflorik asit
$FeO-TiO_2$	İlmenit
Ca	Kalsiyum
Tk	Katılaşmanın bittiği sıcaklık
Tk	Katılaşmanın bittiği süre
$FeCr_2O_4$	Kromit
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan

Fe_3O_4	Manyetit
μm	Mikrometre
$[(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_4]$	Olivin
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
SiO_2	Silika
Si	Silisyum
SiC	Silisyum Karbür
Na	Sodyum
Sr	Stronsiyum
$\%\epsilon$	Yüzde Uzama
Zr	Zirkonyum
ZrSiO_4	Zirkon Silikat

KISALTMA LİSTESİ

AFS	Amerikan Dökümcüler Derneği (American Foundrmen's Society)
ANSI	Amerikan UlusalStandartlar Enstitüsü (American National Standards Instute)
CWS	Su Püskürtme Döküm (Cast Water Spray)
DAS	Dendrit Kolları Arası Mesafe (Dendrit arm spacing)
DD	Düşük Debi
DSS	Direkt Su Soğutma
EDS	Enerji dağılımlı spektroskopi analizi
EPS	Genleşebilen polistiren
EPMMA	Genleşebilen polimetil metakrilat
FA	Fulfuril alkol
HB	Brinell Sertlik
KKD	Kaybolan Köpük Döküm
MÖ	Milattan Önce
PF	Fenol formaldehit
SDAS	İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafe (Secondary Dendrite Arm Spacing)
UF	Üre formaldehit
YD	Yüksek Debi
XRD	X-Işını Difraktometresi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3. 1	Alüminyum içerisinde Hidrojen çözünebilirliğine ait grafik [22]	14
Şekil 3. 2	Hidrojen boşluğu ve en yüksek çekme dayanımı arasındaki ilişki [22]	15
Şekil 3. 3	Örnek kum kalıp kesiti [28]	17
Şekil 3. 4	Kum kalıba döküm yönteminin işlem basamakları [12]	22
Şekil 3. 5	Ablasyon döküm örneği	30
Şekil 3. 6	Kum döküm ve ablasyon döküm koşulları altında bir A356 alaşımı için T-f _s eğrisinin ve soğuma eğrilerinin şematik gösterimi [35]	34
Şekil 3. 7	A356 alüminyum alaşımına ait mikroyapı a) ablasyon uygulanmamış b) ablasyon uygulanmış	37
Şekil 3. 8	Kaybolan köpük döküm yönteminin işlem basamakları	39
Şekil 3. 9	KKD yönteminde örnek bir kalıp kesiti [46]	43
Şekil 3. 10	KKD yönteminde sıvı metal hareketliliğinin şematik gösterimi	45
Şekil 4. 1	EPS köpük model a) Refrakter boya ile kaplanmadan önce b) Refrakter boya ile kaplandıktan sonra	47
Şekil 4. 2	Kalıp kesitinin şematik gösterimi	48
Şekil 4. 3	Döküm sistemine entegre ısı analiz sistemi	50
Şekil 4. 4	Numune inceleme için kesilen bölge	50
Şekil 4. 5	Çekme testi numunelerinin ölçeklendirilmiş iki boyutlu görüntüsü	51
Şekil 5. 1	Kaybolan köpük döküm referans numunesinin mikroyapı görüntüleri	53
Şekil 5. 2	Yüksek debiyle direkt su soğutma işlemine tabi tutulan 710 ve 750°C dökümlerin mikroyapı görüntüleri	55
Şekil 5. 3	Düşük debiyle DSS işlemine tabi tutulan 710 ve 750°C dökümlerin mikroyapı görüntüleri	56
Şekil 5. 4	SEM görüntüleri a) 710 °C 60 s YD b) 750 °C 60s YD	57
Şekil 5. 5	EDS analizi sonuçları a) 710°C referans b) 750°C referans c) 750°C 60	58
Şekil 5. 6	Yüksek debiyle (YD) DSS işlemi uygulanmış numunelerin ortalama SDAS değerleri	59
Şekil 5. 7	Düşük debiyle (DD) DSS işlemi uygulanmış numunelerin ortalama SDAS değerleri	59
Şekil 5. 8	Soğuma eğrileri ve soğuma hızı arasındaki ilişki a) Referans numune b) DSS işlemi uygulanmış numune (710 °C 60 s YD)	63

Şekil 5. 9	Yüksek debi ile DSS işlemi uygulanmış numunelerin ısı analiz verileri a) 710°C b) 750°C	64
Şekil 5. 10	Düşük debi ile DSS işlemi uygulanmış numunelerin ısı analiz verileri a) 710°C b) 750°C.....	64
Şekil 5. 11	Yüksek debi ile DSS işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri.....	66
Şekil 5. 12	Düşük debi ile DSS işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri	66
Şekil 5. 13	XRD analizi sonuçları	69
Şekil 5. 14	Döküm parçaların mikroyapıları a) 710°C referans b) 750°C referans.....	71
Şekil 5. 15	DSS işlemi uygulanan farklı sıcaklıktaki numunelerden ölçülen SDAS ve sertlik değerleri	72

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1 Dövmeye alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [13]	8
Tablo 2. 2 Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [13]	9
Tablo 4. 1 A356 alaşımının kimyasal bileşimi	49
Tablo 4. 2 Temel deneysel parametreler.....	49
Tablo 5. 1 Referans numunelerinin SDAS, sertlik, çekme dayanımı ve yüzde uzama değerleri	54
Tablo 5. 2 Ötektik Si partikülleri arası mesafeler (μm).....	61
Tablo 5. 3 Tüm parametrelere ait toplam soğuma hızı değerleri ($^{\circ}\text{C/s}$).....	65
Tablo 5. 4 Referans ve DSS işlemi uygulanan numunelerin çekme testi sonuçları	67
Tablo 5. 5 Matris fazına ait kafes sabitleri.....	69
Tablo 5. 6 T5 ısıtma işlemine tabi tutulmuş numunelerin mekanik özellikleri	70

Kaybolan Köpük Döküm Yöntemi İçin Direkt Su Soğutma İşleminin Geliştirilmesi

İbrahim TÜTÜK

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Direkt su soğutma (DSS) yönteminin kaybolan köpük döküm (KKD) yöntemi için uygulanmasına ablastyon döküm çalışmalarından ilham alınarak başlanmıştır. DSS işleminde, soğutma işlemi ablastyon döküm yönteminin tersine kalıp bozumu yerine doğrudan parçaya uygulanarak KKD yönteminde kullanılan serbest kum sayesinde parçanın doğrudan soğuması sağlanmaktadır. Bu çalışmada KKD yöntemiyle birleştirilen DSS işleminin uygulanabilirliği değişen çeşitli parametreler çerçevesinde incelenmiştir. A356 alüminyum alaşımı kullanılarak 710 ve 750 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta dökümler yapılmıştır. Döküm işlemlerinde DSS işlemine kalıp dolumundan 60, 90, 120, 150 ve 180 saniye sonra başlanmıştır. Bunlara ek olarak her iki sıcaklık için referans numuneler dökülmüş ve tamamen kalıpta soğuma sağlanmıştır. Su soğutma işleminde tüm sıcaklık ve süreler için 225 ve 450 ml/s olmak üzere iki farklı su debisi ile uygulanmıştır. Bütün parametreler için döküm sırasında ısı analiz işlemi yapılmış olup elde edilen soğuma eğrileri incelenmiştir. Elde edilen döküm parçalardan çıkarılan numuneler de gerçekleştirilen mikroyapı incelemelerinin ardından ikincil dendrit kolları arası mesafe (SDAS) ölçümleri gerçekleştirilmiş ve her numune için sertlik ve çekme testi verileri ölçülmüştür. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

710°C ve 750°C de dökümü yapılan referans numunelerde SDAS değerleri sırasıyla 64 ve 81µm ölçülmüştür. Uygulanan DSS işlemi ile her iki sıcaklık için SDAS değerleri 41 ve 35 µm mertebesine düşmektedir. Referans numunelerde 50 HB civarı ölçülen sertlik değerleri, DSS işlemi sayesinde döküm sıcaklığı, uygulanan debi ve bekleme süresinden bağımsız olarak 60 HB civarı ölçülmüştür. Bu artışın ana nedeni DSS işleminin SDAS değerlerini düşürmesi ve ötektik Si yapısını inceltmesidir. DSS işlemi uygulanan numunelerin hepsinde referans numuneye göre mekanik özelliklerde artma eğilimi göze çarpmaktadır. Uygulanan çekme deneyleri sonucu referans 710°C ve 750°C numunelerinde sırasıyla 138 ve 119 MPa çekme dayanımını ölçülmüşken bu değerler DSS işlemi uygulanan numunelerde ortalama 150 MPa seviyesinde ölçülmüştür. Yüksek debi ile 90s bekleme süresinden sonra DSS işlemi uygulanan 750°C numunesinde sertlik değeri 59 HB olarak hesaplanırken hızlı soğutulduktan sonra yaşlandırma işlemine tabii tutulan aynı numunede sertlik değeri 82 HB olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ablasyon döküm, Kaybolan köpük döküm, Direkt su soğutma, A356

Development Of Direct Water Cooling For Lost Foam Casting Method

İbrahim TÜTÜK

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

The application of the direct water cooling method (DWC) with the lost foam casting (LFC) technique started with inspiration from ablation casting studies. In the direct water cooling process, water is directly applied to the partially solidified part instead of mold breaking, and the part is cooled instantaneously. In this study, the applicability of the direct water cooling process combined with the lost foam casting method was investigated with various parameters. In this study, castings were made at two different temperatures, 710 and 750°C, using A356 aluminum alloy. Following the casting procedures, the DWC processes were started 60, 90, 120, 150 and 180 seconds after the mold filling. In addition to these, reference samples for both temperatures were poured and completely cooled in the mold. The water cooling processes were applied with 225 and 450 mm/s water flow rates for all temperatures and times. For all parameters, thermal analyses were performed and cooling curves were obtained for all related parameters. Characterization processes were carried out on the samples taken from the cast parts obtained following the castings. Secondary dendrite arm spacing (SDAS) and eutectic layer distance measurements were made on the microstructures. Hardness and tensile test values were calculated for each sample and the results were analyzed comparatively.

SDAS values of 64 and 81 μ m were measured in reference samples cast at 710°C and 750°C, respectively. With the applied DSS process, SDAS values for both temperatures decrease to the order of 41 and 35 μ m. The hardness values measured around 50 HB in the reference samples were measured around 60 HB, independent of the casting temperature, applied flow and waiting time, thanks to the DSS process. The main reason for this increase is that the DSS process reduces the SDAS values and thins the eutectic Si structure. In all of the samples applied DSS treatment, there is a tendency to increase in mechanical properties compared to the reference sample. As a result of the applied tensile tests, the tensile strengths of 138 and 119 Mpa were measured in the reference samples at 710°C and 750°C, respectively, while these values were measured at an average of 150Mpa in the samples to which the DSS process was applied. While the hardness value was calculated as 59 HB in the 750°C sample, which was treated with DSS after 90s waiting time with high flow rate, the hardness value was calculated as 82 HB in the same sample, which was subjected to the aging process after rapid cooling.

Keywords: Ablation casting, Lost foam casting, Direct water cooling, A356

1.1 Literatür Özeti

Ablasyon döküm yöntemini ortaya çıkaran J. Grassi ve J. Campbell arkadaşlarıyla beraber A356 alaşımıyla bazı otomotiv parçalarının üretimini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında sodyum silikat bazlı bir bağlayıcı kullanılmış, AFS 60 inceliğinde silis kumundan yapılmış kalıplara dökümler gerçekleştirilmiştir. Ergiyik metale azot ile gaz giderme işlemi yapıldıktan sonra 730°C de döküm gerçekleştirilmiştir. Ablasyon işlemi ise 65°C su sıcaklığında su spreyleri yardımıyla parçanın en uzak ucundan başlayarak döküm ağzına doğru ilerlemiştir. Çalışma sonucunda ötektik yapının incelendiği ve mekanik özelliklerin geleneksel yöntemlere göre arttığı gözlemlenmiştir [1].

D Weiss ve J. Grassi ile arkadaşları hibrit metal matris kompozitlerin ablasyon döküm yöntemiyle üretimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Al-SiC-Grafit kompoziti ürettikleri çalışmada ablasyon döküm yöntemiyle, geleneksel kum kalıba döküme göre kompozitin akma dayanımı %20 artarken uzama değerlerinin benzer kaldığı belirtilmiştir. Ayrıca dendrit kol açıklığının (dendrite arm spacing, DAS) kum kalıba döküm numunelerinde 62,5 µm ölçülürken ablasyon döküm numunelerinde 50,3 µm ölçüldüğü rapor edilmiştir [2].

V. Bohlooli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise ablasyon döküm işleminin, A356 döküm alaşımında katılaşma davranışına, beslenebilirliğe, porozite içeriğine, mikro yapıya ve ikincil dendrit kolları arası mesafe parametrelerine etkisi incelenmiştir. Deneylerde dört farklı kum kalıp kullanılmıştır. Besleyicili ve besleyicisiz olmak üzere ikişer adet ablasyonlu ve ablasyonsuz döküm yapılmıştır. Kalıp L şeklinde olup bağlayıcı olarak silis kumuna ağırlıkça oranı %2 olacak şekilde bentonit ve %15 kil ilavesi yapılmıştır. Ergiyik 750°C de hazırlanmış ve 710°C 'de döküm gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, ablasyon döküm işleminin besleme kabiliyetini geliştirdiği, gözenek içeriğini azalttığı ve ikincil dendrit kolları arası mesafeyi kısalttığı gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak, ablasyona tabi tutulmuş örneklerde ablasyonsuz olanlara kıyasla daha ince ve daha homojen bir mikroyapıya rastlanmıştır [3].

P. Dudek ve arkadaşları daha önceki çalışmalardan farklı bir deney düzeneği kullanarak A356 alaşımı üzerinde çalışmalar yapmışlardır. İşlemin özü (dökümün eş zamanlı soğutulması ve kalıbın su jetleri yardımıyla bozunumu) değişmeden kalırken genel olarak kullanılan düzenek modifiye edilmiştir. Ekipmanın tasarımı, eş zamanlı olarak dairesel ve dikey harekete izin vererek, nozullardan su jetleri ile kalıbın ortadan kaldırılmasını ve dökümün kontrollü yönlü soğutulmasını kolaylaştırmıştır. Deney parametreleri ise 700°C döküm sıcaklığı, 20 devir/dk. tabla dönüş hızı ve 12 MPa su basıncı olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda tanelerde ve ötektikte bir iyileşme ve geleneksel döküm yöntemine göre ikincil dendrit kolları arası mesafeyi (Secondary Dendrite Arm Spacing, SDAS) kısalttığı gözlemlenmiştir [4].

M. Taghipourian ve arkadaşları bu çalışmada, ablasyon işlemi ile elde edilen bekleme süresinin (döküm ile su jeti başlangıcı arasındaki zaman aralığı) A356 alüminyum alaşımının mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Ablasyon işleminin A356 alüminyum alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için modifikasyon, aşılama ve gaz giderme gibi ergitme işlemleri uygulanmamıştır. Dökümler L şeklinde silis kumundan kalıplara yapılmıştır. Gecikme süresi için 0,5 dk, 1 dk ve 2dk olmak üzere üç farklı süre belirlenmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda ergiyik döküldükten 0,5 dakika sonra ablasyon soğutma işleminin uygulanmasıyla ötektik Si ve demir intermetaliklerinin boyutları son derece küçülmüş ve dendrit kolu aralığı önemli ölçüde kısalmıştır. 0,5 dakika ve 1 dakika geciktirme süreleri için, dendritler arası faz boyut küçültmesinin yanı sıra, ötektik silisyumun morfolojisi, kaba iğne benzeri parçacıklardan ince ve lifli morfolojiye dönüşmüştür. Ayrıca gaz ve büzülme gözenekleri, herhangi bir sıvı metal işlemi olmaksızın önemli ölçüde düşürülmüştür. 0,5 dakika kesilmiş numunelerin mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirilirken kum kalıbındaki geleneksel döküm numuneleri ile karşılaştırıldığında, çekme mukavemeti ve uzama sırasıyla 161 MPa'dan 264.5 MPa'ya ve %3'ten %12'ye yükseltilmiştir [5].

Ali Kheirabi ve arkadaşları, modifiye edilmiş bir ablasyon döküm işlemi olan CWS (Cast Water Spray) yöntemi üzerine çalışmışlardır. Bu teknikte su püskürtülerek kalıp bozumu yerine kalıbın üst parçası dökümden kısa bir süre sonra çıkarılmış ve su spreyi doğrudan yeni katılaşmaya başlayan parçanın yüzeyine uygulanmıştır. Kalıp suyla

uzaklaştırılmadığı için suda çözünebilir özel bağlayıcı kullanmaya gerek yoktur ve çalışmada geleneksel CO₂ ile sertleşen sodyum silikat kum bağlayıcısı kullanılmıştır. A356 alaşımı ile dökümler gaz giderici ilavesi yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Geleneksel kum kalıp döküm sonuçları ile kıyaslandığında SDAS değerleri ortalama %45 oranında azalmış, porozite oranı %13'ten %1'e düşmüş ve demir içeren intermetalik bileşikleri iğnesel formdan Çin yazısı formuna dönüşmüştür [6].

S.Boutorabi ve P. Torkaman ile arkadaşları çalışmalarında geleneksel döküm ve ablastyon döküm teknikleri ile üretilen yalın karbonlu çelik parçaların mikroyapı ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Deneyde kullanılan kalıpta 60 AFS silis kumu ve sodyum silikat bağlayıcı kullanılmış olup, kalıp CO₂ ile sertleştirilmiştir. Kalıbın pişirilmesini takiben, R tipi termokupllar kalıp boşluğunun ortasına konumlandırılmıştır. 1690°C'de gerçekleştirilen dökümlerde 15 saniyelik bir bekleme süresinin ardından ablastyon işlemi su jeti yardımıyla 2 L/s'lik bir su debisiyle uygulanmıştır. Deneyler sonucunda ablastyon işlemi uygulanan çeliklerde kopma dayanımının 638 MPa'dan 1094 MPa'ya ve kopma uzamasının yaklaşık %13'ten %16'ya kadar yükseldiği ve merkezdeki sertliğinin 182 HB'den 467 HB'ye ve yüzey sertliğinin ise 205'ten 508 HB'ye yükseldiği raporlanmıştır [7].

M. Tiryakioğlu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise, geleneksel olarak dövme ile şekillendirilen 6061-T6 alaşımının yorulma ömrü, yeni ablastyon döküm prosesi ile üretilen döküm parçalarda incelenmiştir. Çalışma kapsamında dönen konsol kiriş tekniği ile beş maksimum gerilim seviyesinde toplam 39 yorulma numunesi test edilmiştir. Ayrıca dövme parçadan kesilen dokuz örnek de karşılaştırma için aynı teste tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarıyla ablastyon döküm 6061-T6'nın yorulma ömrünün üç parametrelili bir Weibull dağılımını takip ettiği, 6061 dövme numunelerden elde edilen verilerle karşılaştırılabilir olduğu ve geleneksel döküm Al-%7 Si-Mg alaşımından üstün olduğunu ortaya konmuştur [8].

E. Heidari ve arkadaşları çalışmalarında karbon eşdeğeri %4,39 olan alaşımsız sfero dökme demir ile hem geleneksel hem de ablastyon döküm yöntemleriyle kalınlıkları 1, 2, 4, 8 mm olan parçalar üretmişler ve çeşitli aşıl原因ıcıların (Zr, Sr ve Ba bazlı) numunelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda 1 mm kalınlığındaki döküm kesitin mikro yapısına herhangi bir etki yapacak

kadar hızlı ablasif soğutma uygulanamamıştır. 2 mm kalınlığındaki numunede ise ablastyon işlemi nodül sayısını 497'den 1484'e ve grafit küreselliğini %76'dan %93'e yükseltmiştir. Dikkat çeken bir diğer sonuç ise 8 mm'lik kesitte akma dayanımı 539'dan 624 MPa'ya, uzama ise %4,9'dan %10,2'ye yükselmiştir [9].

Ali Kheirabi ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları çalışmada ablastyon döküm işleminin yeni bir versiyonu olan doğrudan su püskürtme adını verdikleri işlem ile neredeyse tam ötektik bileşimli A413.0 alüminyum alaşımı ile basit bir geometriye sahip parçalar dökerek katılaşmayı incelemişlerdir. Toplam soğuma hızı olarak adlandırılan yeni katılaşma teriminin mekanik özelliklerdeki iyileşmenin başlıca sebebi olduğunu saptamışlardır. Geleneksel kum kalıba döküm ile doğrudan su püskürtme işlemiyle dökülen parçalar arasında bir kıyaslama yapılan bu çalışmada SDAS değerlerinin doğrudan su püskürtme işlemi ile 68 μm 'den 32 μm 'ye düştüğü ortaya konmuştur. Ötektik mikro bileşenler, demir içeren fazlar ve büzülme poroziteleri gibi diğer mikroyapısal özelliklerin boyutlarında, doğrudan su püskürtme işleminin neden olduğu önemli bir düşüş yaşanmıştır. Geleneksel kum kalıba dökümde elde edilen ortalama çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri sırasıyla 146 MPa ve %2,2 iken doğrudan su püskürtme işlemi ile bu değerler sırasıyla 160 MPa ve %5,2'ye yükselmiştir [10].

S. Acar ve K.A Güler'in 2020 yılında yaptıkları çalışmada, A356 alaşımının, kaybolan köpük döküm yöntemine entegre olarak, iki farklı soğutma tekniği ile dökümünü gerçekleştirmişlerdir. Bu iki teknikten birincisinde, döküm işleminden sonra kalıp, içerisinde yeterli miktarda su bulunan bir kaba aktarılarak soğutma sağlanmıştır. İkinci teknik ise, döküm işleminin ardından kalıba yeterli miktarda su dökülerek gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerin ikisi de kalıp dolumunu takiben belli bir süre beklendikten sonra uygulanmıştır. Bekleme süreleri 60, 90, 120, 150 ve 180 s olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda her iki yöntemin de geleneksel döküm mikroyapısını ve özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür. Referans numunelerde sertlik ve SDAS değerleri sırasıyla 64 HB ve 90 μm olarak ölçülmüştür. Birinci yöntemde suyun içine aktarılan kalıptan elde edilen numunede sertlik ve SDAS değerleri 79 HB ve 42 μm olarak ölçülürken, ikinci yöntem olan kalıba su püskürtme işleminde ise 82HB sertlik değeri ve 34 μm SDAS ölçülmüştür. Çalışmada uygulanan iki soğutma tekniği karşılaştırıldığında ikinci yöntem olan kalıba su püskürtülmesi tekniği,

birinci yönteme göre daha iyi özellikler vermiştir. Birinci yöntem olan kalıbı suya aktarma tekniği kalıbın hareketinden dolayı döküm parçanın zarar görme olasılığının da içinde bulunduğu bazı olumsuzluklar barındırmaktadır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelendiğinde ikinci yöntem uygulamaya daha yatkın bir yöntem olarak bildirilmiştir [11].

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, kum kalıplara uygulanan ablasyon yönteminden esinlenerek geliştirilmiş direkt su soğutma işleminin kaybolan köpük döküm yöntemiyle birlikte uygulanması ve ortaya çıkan ürünün boyutsal hassasiyetinin bozulmadan mekanik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Direkt su soğutma işleminin sağladığı erken ve hızlı soğuma ile kaybolan köpük döküm yöntemiyle A356 alaşımından dökülen parçaların mikroyapıları ve sertliklerinin incelenmesi, bu çalışmanın kapsamındadır. Çalışma sonucunda döküm sıcaklığı, su debisi ve direkt su soğutma işlemi öncesi bekleme süresi gibi parametrelerin optimum değerlerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu parametreleri belirlemede göz önünde bulundurulacak kriterler ise şekilsel ve boyutsal bütünlük ve yüksek mekanik özelliklerdir.

1.3 Hipotez

Geleneksel kum kalıba döküm yöntemlerinde kullanılan ablasyon döküm işleminden esinlenerek geliştirilmiş DSS işleminin KKD yöntemine entegre bir şekilde çalışması konusu özgün bir konu olarak öne çıkmaktadır.

Bu proje kapsamında direkt su soğutma işleminin kaybolan köpük döküm yöntemiyle koordine olarak uygulanabilirliği incelenecektir. Deneyler bazı parametreler üzerine kurgulanmıştır. Bu parametreler, döküm sıcaklığı, su debisi ve direkt su soğutma işleminden önce bekleme süresi olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ve kriterler üzerine yapılan deneyler sonucunda en uygun koşullar belirlenecektir.

2.1 Alüminyum

Alüminyum, yerkabuğunda en bol bulunan üçüncü element ve en çok bulunan metalik element olmakla birlikte, son elli yıldır endüstride demirden sonra en çok kullanılan metal olarak karşımıza çıkmaktadır. Alüminyum doğada element halinde bulunmamaktadır. Bugüne kadar, Bayer ve Hall-Héroult süreçleri, ticari miktarlarda alüminyum üretimi için en ekonomik yöntemler olarak kabul edilmekte ve birincil alüminyum endüstrisinin temel dayanağı konumundadır. Mevcut elektrolitik sürecin gelişimi, 1886'da Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Charles Martin Hall ve Fransa'dan Paul L.T Héroult (yani Hall-Héroult süreci) tarafından neredeyse aynı anda gerçekleştirilmiştir. Bu durum, yaklaşık 1890'da başlayan alüminyumun endüstriyel üretiminin yolunu açtığı için büyük bir ilerlemeyi temsil etmektedir. İşlemdeki önemli aşamalardan biri, boksit cevherinden alüminanın (Al_2O_3) çıkarılmasıdır ve bunun için en etkili yöntem 1888'de Karl Joseph Bayer tarafından geliştirilmiştir [12].

2.2 Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Alüminyum periyodik cetvelin 3A grubunda bulunur. Atom numarası 13'tür ve atom ağırlığı 26,98 g/mol'dür. Alüminyum kübik yüzey merkezli kafes yapısına sahiptir ve -269°C ve 658°C arasında kararlı halde bulunmaktadır, bu özelliği fiziksel dönüşüm gösterme ihtimaline karşı dirençli olduğunu göstermektedir. Alüminyum metali atmosferik şartlarda çok çabuk oksitlenir ve yüzeyde ince bir Al_2O_3 tabakası oluşturur. Oluşan bu tabaka alüminyumu korozyona karşı daha dirençli hale getirmektedir [13].

Alüminyum alaşımlarının çoğu alanda kullanımının en önemli sebebi düşük yoğunluğu ve yüksek özgül dayanımıdır. Alüminyumun yoğunluğu 2,7 g/cm³'tür. Alüminyum alaşımları ısıyı ve elektriği iyi bir şekilde iletmektedir [13].

Çoğu insanın aklında yer alan, alüminyumun yapısal bir metal olarak hizmet edecek kadar güçlü olmadığı fikri birçok defa çürütülmüştür. Gerçek şu ki, en yaygın alüminyum yapısal alaşımı olan 6061-T6, A36 çeliğinkine neredeyse eşit olan 240 MPa minimum akma dayanımına sahiptir. Bu mukavemet, hafifliği (çeliğin yaklaşık üçte biri) ile birleştiğinde, alüminyumu yapısal uygulamalar için özellikle avantajlı hale getirmektedir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı, geniş açıklıklı kubbe çatılar gibi çeşitli uygulamalarda alüminyum kullanımını desteklemiştir. [14].

2.3 Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları iki kategoriye ayrılır: dövülerek şekillendirilen alaşımlar ve şekillerini belirleyen bir kalıba ergimiş halde dökülen döküm alaşımları. Alüminyum Derneği, her kategori için, ANSI H35.1, Alüminyum için Alaşım ve Temper Tanımlama Sistemleri'nde açıklanan uluslararası kabul görmüş bir adlandırma sistemine sahiptir. Hem dövme hem de dökme ürünlerin mukavemeti ve diğer özellikleri, içeriklerine veya alaşım elementlerinin seçici olarak eklenmesine bağlıyken, bu özelliklerde ısı işlemleri ile daha fazla varyasyon elde edilebilir [14].

2.3.1 Dövme Alüminyum Alaşımları

Alüminyum Derneği'nin alüminyum alaşımları tanımlama sistemi 1954'te tanıtılmıştır. Bu sistemde, birliğe kayıtlı her alaşıma dört haneli bir sayı atanmaktadır. Alaşımın ilk numarası, benzer özelliklere sahip bir grup alaşım üreten birincil alaşım elementini belirtir. İkinci rakam, bir alaşımın modifikasyonunu gösterir. Örneğin 6463, daha iyi bitirme özellikleri elde etmek için demir, manganez ve krom gibi belirli alaşım elementlerinde biraz daha kısıtlayıcı sınırlara sahip 6063'ün bir modifikasyonudur. Birincil alaşım elementleri ve elde edilen alaşımların özellikleri aşağıda listelenmiş ve Tablo 2.1'de özetlenmiştir. Bu alaşımlar dövme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi plastik şekil verme yöntemleri ile üretilmektedirler. [14]–[16]

Tablo 2. 1 Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [13]

Sınıf	Alaşım elementi
1xxx Al alaşımları	Alaşımsız
2xxx Al alaşımları	Cu
3xxx Al alaşımları	Mn
4xxx Al alaşımları	Si
5xxx Al alaşımları	Mg
6xxx Al alaşımları	Si+Mg
7xxx Al alaşımları	Zn
8xxx Al alaşımları	Diğer elementler
9xxx Al alaşımları	Kullanılmayan sınıf

Ayrıca dövme alüminyum alaşımlarından 2XXX,6XXX,7XXX ve 8XXX serileri ısıtılma işlemi ile sertleştirilebilen serilerdir.

2.3.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımların işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik özellikleri yüksektir. Döküm alüminyum alaşımları, kalıbı doldurmak için, optimum akışkanlık elde etmek ve katılaştıran metali besleyerek büzülme gözenekliliğini azaltmak için dövme alaşımlardan daha büyük miktarlarda ötektik oluşturuşu elementler (genel olarak Si) içerir. Ağırlıkça %12'ye kadar Si içeren alaşımlar (ikili sistemin ötektik noktası), karmaşık şekillerin daha kolay dökümünü sağlar ve alaşımların mukavemetini artırır. Dökme alüminyum alaşımları ve dövme alüminyum alaşımları farklı adlandırma sistemlerine sahiptir. Her iki sistem de dört basamak kullanılmaktadır. Dökme alaşım tanımlama sisteminde üç rakam, ardından bir ondalık nokta ve ardından başka bir rakam (xxx.x) bulunur. İlk rakam, birincil alaşım elementini gösterir. İkinci iki hane alaşımı veya ticari olarak saf alüminyum döküm alaşımları söz konusu olduğunda saflık seviyesini belirtir. Son rakam ürün formunu gösterir: külçe için 1 veya 2 (safsızlık seviyelerine bağlı olarak) ve dökümler için 0. Döküm Al alaşım sınıfları ve içerdikleri ana alaşım elementleri ile birlikte Tablo 2.2'de verilmektedir. [14], [17]

Tablo 2. 2 Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [13]

Sınıf	Alaşım elementi
1xx.x	Alaşımsız
2xx.x	Cu
3xx.x	Si-Mg/Cu
4xx.x	Si
5xx.x	Mg
6xx.x	Kullanılmayan sınıf
7xx.x	Zn
8xx.x	Sn
9xx.x	Diğer elementler

3.1 Döküm İşlemi

Uzun yıllar boyunca metal şekillendirme amacıyla kullanılan döküm işlemi, temel olarak istenilen parça şeklinde hazırlanan kalıp boşluğuna sıvı malzemenin dökülerek katılaşması işlemidir.

Döküm ile üretilen ilk objeler, doğal bakırdan yapılmış baltalardır. Fırınların geliştirilmesi ve kömürün yakıt olarak kullanılması, fırın içinde indirgeyici bir ortam yaratmıştır ve ergitme için gerekli sıcaklığın elde edilmesine ve korunmasına yardımcı olmuştur. Tunç çağında dökülen ilk alaşım, ağırlıkça %4 Cu-As yani arsenikli bakırdı. Bu alaşım Britanya Adaları'ndan Ortadoğu'ya kadar geniş bir alanda kullanılıyordu. Kalayın, bilerek veya istemeyerek, erimiş bakıra eklenmesi, daha önceki döküm ürünlere göre mukavemet ve yüzey kalitesi gibi gelişmiş özelliklere sahip bir alaşım olan bronzun icat edilmesine yol açmıştır. Dünya çapında bulunan kanıtlar, ilk kapalı kalıp döküm ve kaybolan mum döküm deneylerinin bronz çağında yapıldığını göstermektedir [18].

Tunç çağından yaklaşık 1.500 yıl sonra dünya, Demir'in işlenmesiyle birlikte Demir Çağı adı verilen yeni bir çağa girmiştir. Çinliler, MÖ 600 yıllarında dökme demirin gelişmesiyle devasa heykeller inşa etmişlerdir. Avrupa ülkeleri, 15. yüzyılda icadından çok uzun bir süre sonra dökme demir ile tanışmıştır. Dökme demir, çan ve top üretimi için ilk tercih olarak kabul edilmiştir. 19. yüzyılın sonunda, alüminyum Charles Hall ve Paul Heroult tarafından saf halde üretilmiştir. Kimyasal indirgeme sürecinin gelişmesiyle birlikte, alüminyum fiyatları önemli ölçüde düşmüş ve döküm üretimini etkileyerek, otomotiv ve havacılık endüstrisi için önemli bir mühendislik malzemesi haline gelmiştir. Kum kalıba döküm üzerine kalıcı kalıplar ve yüksek basınçlı döküm yöntemlerinin ortaya çıkması, üreticilerin yeni alaşım ve döküm yöntemleri geliştirmesini desteklemiştir [18].

Cevherden elde edilen metal ve alaşımların ingot olarak dökülmesi ve karmaşık geometrili parçaların tek işlemle kullanılabilir hale getirilmesi için dökümden faydalanılabilir. Yarı mamul ve mamul parçaların üretiminde bazı durumlarda yalnızca dökümden faydalanmak yeterli olmasına rağmen, bazı durumlarda ise kaynak, dövme,

plastik şekil verme ve talaşlı imalat gibi usullerden de faydalanılmaktadır. Döküm yöntemi ile şekillendirmenin diğer yöntemlere göre avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [19].

- Çok geniş boyutsal esneklik sağlamaktadır
- Karmaşık ve içi boş parçaların üretimi mümkündür.
- Seri üretime oldukça uygun olan ekonomik bir üretim yöntemidir.
- Her yönden soğuma nedeniyle, döküm özellikleri her yönde aynıdır.
- Makine parçaları, gemi pervanesi vb. ağır ekipmanları birkaç küçük parçayı birleştirerek imal etmek yerine istenilen ebatta kolaylıkla döküm ile üretilebilmektedir.

Döküm işlemi ile ilgili sıralanan avantajların yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır[19],[20].

- İnce kesitte ürün elde edilmesi zordur.
- Az sayıda parça üretimi için ekonomik değildir.
- Diğer yöntemlerle üretilen parçalara göre bazı mekanik özelliklerde eksiklikler gözlemlenebilir.

3.2 Alüminyum Döküm İşlemlerinde Mekanik Özellikleri Etkileyen Faktörler

3.2.1 Mikroyapıya Bağlı Etkenler

Mikroyapıya bağlı etkenler aşağıda sıralanmaktadır.

- Tane Boyutu
- Dendrit kolları arası mesafe

Tane boyutu, aşağıdaki Hall – Petch denklemine (3.1) göre mekanik mukavemet ile doğrudan ilişkilidir[21].

$$\sigma_a = \sigma_0 + k(d)^{1/2} \quad (3.1)$$

σ_a akma gerilimi, σ_0 dislokasyon hareketinin başlaması için malzeme sabiti, k güçlendirme katsayısı ve d ortalama tane çapıdır. Çoğunlukla, daha küçük tane boyutu, metalurjide heterojen çekirdeklenmenin bir çıktısı olarak kabul edilmektedir.

Alüminyum alaşımlarında heterojen çekirdeklenmeyi teşvik etmenin bazı yolları aşağıda sıralanmaktadır.

- Sıvı metal içinde kararlı çekirdekler oluşturmak için gerekli enerjinin azalması nedeniyle, kristallerin çekirdeklenme teorisine göre daha hızlı aşırı soğuma ile daha küçük tane boyutları elde etmek mümkündür.
- Tane inceltici elementlerin eklenmesi, alüminyum alaşımlarında tane boyutunu önemli ölçüde azaltır. Alüminyum için en yaygın tane incelticiler, Ti master alaşımlarıdır. $TiAl_3$ ve TiB_2 fazlarının oluşumu, alüminyum için çekirdeklenme bölgelerinin sayısını artırır ve tane boyutunu azaltır [22].
- Al-Si alaşımlarının metalik Na, Sr, Ca ve P elementleri ile modifikasyonu, daha ince boyutlu ve dağıtılmış ötektik yapı verir. Silisyum ötektikleri genellikle, çatlak başlatıcı bölgeler olarak hareket eden, mukavemet ve tokluğu azaltan iğnemi çökeltilerdir. Ötektik altı alaşımlar için en kullanışlı modifikatör Na ve Sr iken, ötektik üstü alaşımlar için P daha uygundur. Her bir element ötektik fazda silisyumun büyümesini engeller ve daha ince lamelli bir yapı sağlar [23], [24].

Tane inceltme işlemleri, büzülmeyi ve hidrojen gözenekliliğini en aza indirmek ve sıcak çatlamayı ortadan kaldırmak için avantajlıdır. Bu kusurların giderilmesi sonucu elde edilen ürün, daha iyi besleme özellikleri, mekanik özellikler, ısıtma işlem tepkisi, döküm sonrası bitirme ve yırtılma direnci gibi birçok avantaj kazanmaktadır.

Dendrit kolları arası boşluk (DAS) genellikle metalurjide ikincil dendrit kolları arası mesafe (SDAS) kavramı ile karşımıza çıkmaktadır. SDAS, artan soğutma hızı ile azaltılabilir. Mikroyapıdaki dendrit kolları aralığını azaltmak malzemeye, tane boyutlarını küçültmekle sağlanan daha iyi mekanik özellikler gibi avantajlar katmaktadır. Buna rağmen, bu ikisinin mekanizması, dendrit kolları arasında tane sınırı olmadığı için benzer değildir, bu nedenle Hall-Petch denklemi bu parametre için geçersiz sayılmaktadır [25].

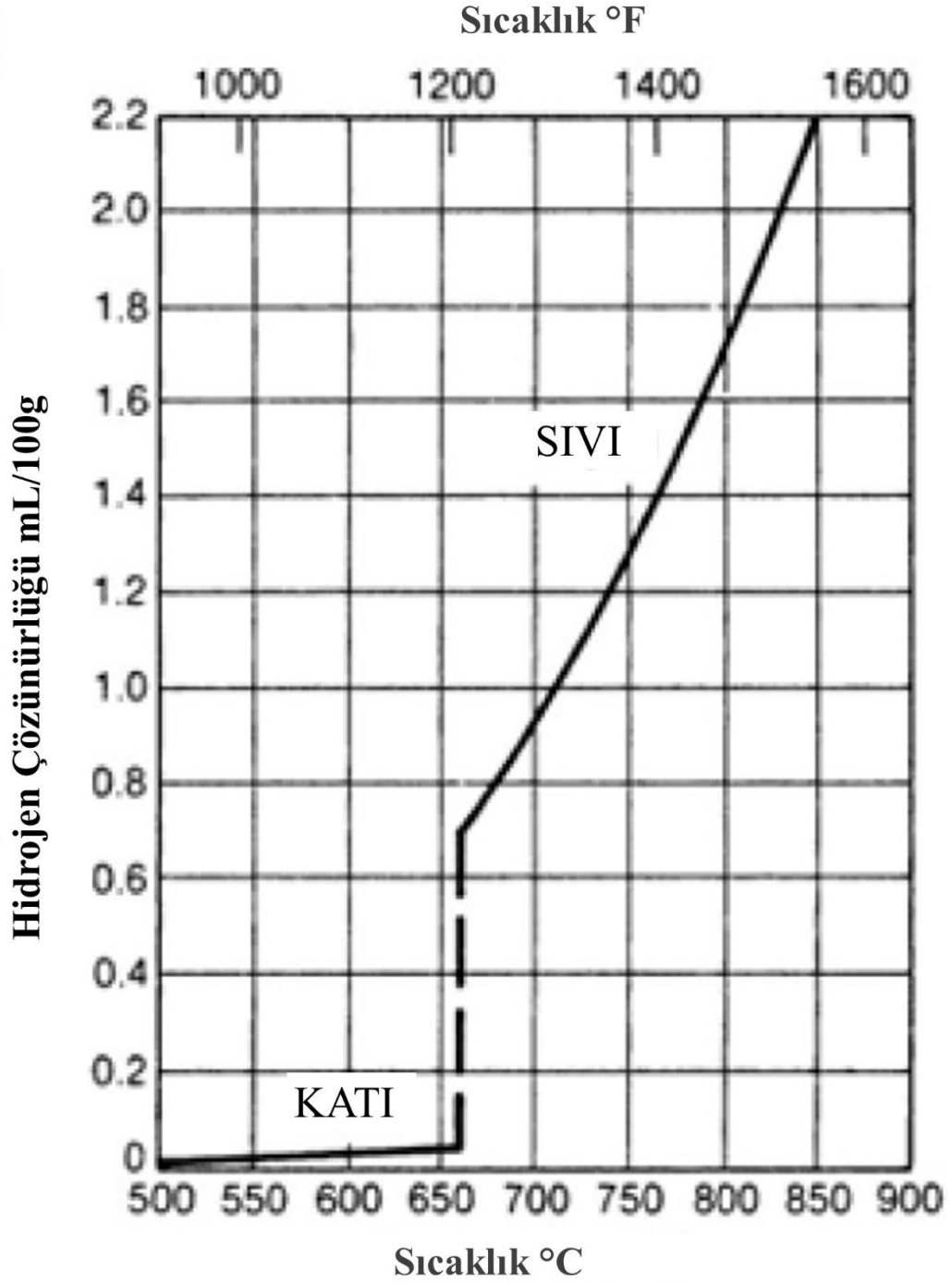
Bu olguyu açıklamak için birkaç teori vardır. Katılaştıran yapı boyunca yüksek aşırı soğuma oranları nedeniyle küçük bir yanlış yönlendirme ortaya çıkabilir. Ayrıca, yüksek aşırı soğuma oranları, dendrit boşluklarının büyümesini engeller ve dendritik fazlar için çekirdeklenme bölgelerini artırır. Ayrıca, bu interdendritik fazların irileşmek için fazla zamanı yoktur, bu da daha homojen bir yapı sağlar [25].

Başka bir teoriye göre, yüksek aşırı soğuma hızları, döküm işlemi sırasındaki türbülans nedeniyle sıvı metalde sıkışmış bir kusur olan bifilmliğin açılmasını önler. Bifilmliğin katılaşmanın başlangıcında yuvarlak parçacıklar olarak ortaya çıkarlar ve zaman geçtikçe zarar verebilecek boyutlara (birkaç ton ağırlığındaki dökümde 100 mm'ye kadar) ulaşabilirler. SDAS'ın sınırlı büyümesi, bifilmliğin büyümesini ve açılmasını engeller, bu nedenle dökümlerin sünekliğini arttırmaktadır [25].

3.2.1 Boşluk Hataları

Döküm yönteminde en büyük sorunlardan birisi boşluk hatalarıdır. Boşluk hataları hidrojen gözeneklikleri ve büzülme gözeneklikleri olmak üzere iki ana grupta incelenir.

Hidrojen, alüminyum ve alüminyum alaşımlarında önemli ölçüde çözünür tek gazdır. Sıvı alüminyumun (0.65 mL/100 g) hidrojen çözünürlüğü, katı alüminyumdan (0.04 mL/100 g) çok daha fazladır. Şekil 3.1'de hidrojenin alüminyum içerisinde çözünürlüğüne ait bir grafik verilmektedir. Çözünürlük değerlerindeki bu farklılıklar nedeniyle, erimiş metaldeki büyük miktarda çözünmüş hidrojen, katılaşma sırasında fazlalaşır ve diğer katı fazlar gibi çekirdeklenme ve tane büyüme teorisine göre katı metal boyunca çökebilir [23].

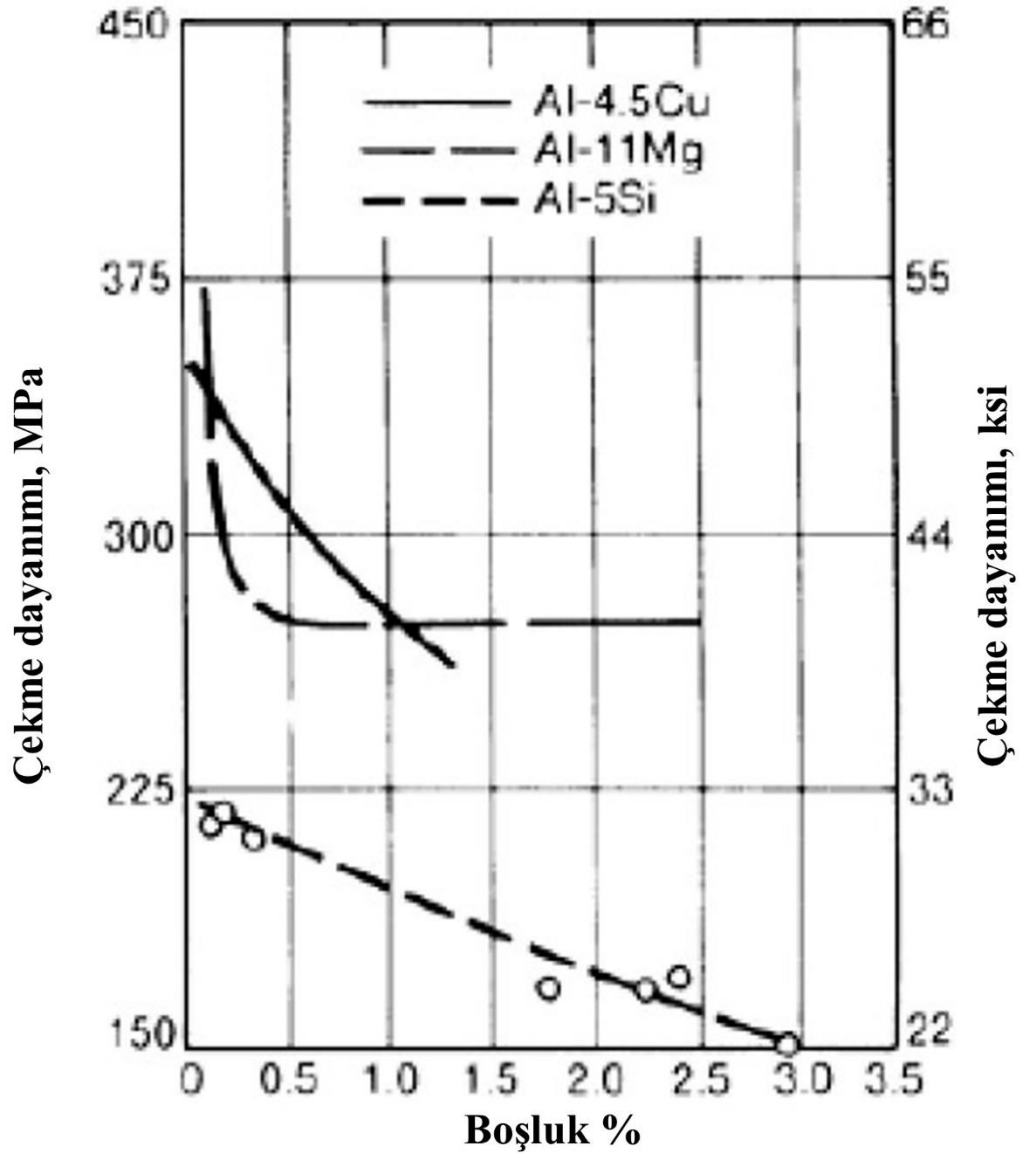


Şekil 3. 1 Alüminyum içerisinde Hidrojen çözünürlüğüne ait grafik [22]

Hidrojen gözenekliliği ürün içerisinde, interdendritik ve ikincil gözeneklilik olmak üzere iki şekilde oluşur. Dendritik gözeneklilik, daha yüksek hidrojen konsantrasyonlarında gözlemlenebildiği için ikincil gözeneklilikten daha kritik bir öneme sahiptir [23].

Ana hidrojen kaynağı, yağ kum kalıpları içindeki nemli ortam veya tam olarak kurumamış refrakterlerdir. Sıvı metal ve kum kalıbı, maçalar, takım ekipmanları arasındaki temas,

eriyik içine hidrojen difüzyonu sağlar. Magnezyum gibi oksit oluşturan alaşım elementleri, oksit bölgeleri bir hidrojen çekirdeklenme bölgesi olarak hareket ettiğinden, erimiş metale hidrojen difüzyon direncini azaltabilir. Hidrojen gözenekliliğinin artması, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi kum döküm alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini doğrudan etkiler.



Şekil 3. 2 Hidrojen boşluğu ve en yüksek çekme dayanımı arasındaki ilişki [22]

Büzülme gözenekliliği, sıvı metal ve katı metal hacmi arasındaki farktan kaynaklanır. Katılaşma sırasında birçok metal büzülür. Örneğin, Al alaşımlarının katılaşması sırasında hacimsel değişim %3,5-8,5'tir. Büzülme gözenekliliği hem metalin katılaşma aralığı hem

de nihai ürünün sıvı/katı oranları ile ilgilidir. Bir metal katılaşmaya başladığında, sıcak metalin etrafında oldukça güçlü bir kabuk oluşur [23].

Katı kabuk soğumaya devam ederken, süreç, sıvı metal ve katı/sıvı ara yüzeyinden çok daha düşük olan katı hal genleşme ve termal katsayısının kontrolü altındadır. Çekme kuvvetleri yüzey gerilimi kuvvetlerini aşarsa, işlem büzülme gözenekliliği ile sonuçlanır. Büzülme gözenekliliği, geliştirilmiş tane inceltme, beslenebilirlik ve azaltılmış oksit içeriği ile engellenebilir [23].

Döküm yöntemleri genel olarak iki başlıkta incelenmektedir.

1. Geçici (bozulabilir) kalıba döküm yöntemleri

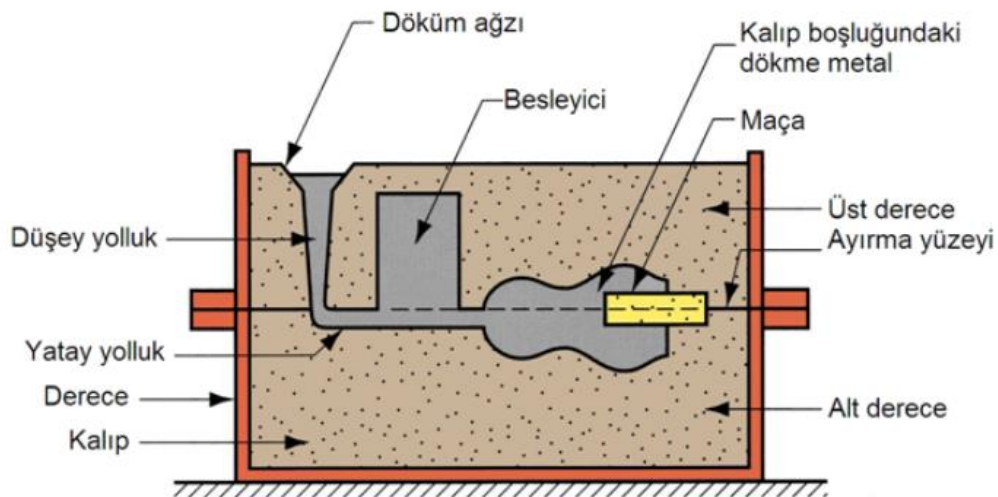
- Kalıcı model teknikleri
 - ❖ Kum kalıba döküm
 - ❖ Kabuk kalıba döküm
 - ❖ Vakumlu kalıplama
 - ❖ Alçı kalıba döküm
 - ❖ Seramik kalıba döküm
- Harcanabilir model teknikleri
 - ❖ Hassas Döküm
 - ❖ Kaybolan köpük döküm yöntemi

2. Kalıcı kalıba döküm yöntemleri

- Metal kalıba döküm
- Yüksek basınçlı döküm
- Alçak basınçlı döküm
- Sıkıştırma Döküm
- Merkezkaç döküm
- Sürekli döküm

3.3 Kum Kalıba Döküm

Kum kalıba döküm, kum karışımlarından yapılan kalıpların ve maçaların kullanıldığı bir metal döküm işlemi olarak tanımlanmaktadır. Kum kalıba döküm yöntemi en yaygın olarak kullanılan döküm yöntemlerindendir. Kum kalıba dökümün ana avantajı, kalıcı kalıba döküm yöntemlerinde en büyük masraf kalemi olan kalıp maliyetinin düşük olmasıdır. İşlemden, dar toleranslara izin vermemesi ve yavaş soğuma hızının bir sonucu olarak iri taneli mikroyapı oluşturmaması nedeniyle mekanik özellikleri nispeten düşük olmasına rağmen, karmaşık şekillere sahip dökümlerin seri üretimi için oldukça uygun bir yöntemdir. Örnek bir kum kalıp kesiti Şekil 3.3 'te verilmektedir. Kum kalıba döküm işlemleri kumun bağlanma şekline göre sınıflandırılır. Bağlayıcı katkılı kum kalıplar, reçine katkılı kum kalıplar ve bağlayıcısız kum kalıplar bu sınıflandırmaya dahildir [12], [26], [27].



Şekil 3. 3 Örnek kum kalıp kesiti [28]

En yaygın olarak kullanılan kum, silisyum elementinin bir oksidi (kuvars) olan silis kumudur. Silis kumları doğada en çok bulunan kum türüdür ve oldukça iyi kalıplama özelliklerine sahiptir. Yaygın olarak kullanılan diğer kumlar arasında olivin, zirkon ve kromit bulunur. Zirkon ve kromit kumları düşük ısı genleşme ve yüksek ısı iletkenli özelliklerine sahip kumlardır. Bu yüksek iletkenlik, dökümlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir. Alümina, boksit ve mullit dahil olmak üzere sentetik malzemeler bazı özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemeler sert, aşınmaya

dayanıklı ve küreseldir, bu özellikler de onları ideal kalıplama malzemesi yapmaktadır. Maliyet doğal kumlardan daha yüksek olduğundan, ekonomik olarak uygulanabilir hale getirmek için geri dönüşüm verimliliğinin yüksek olması gerekir. Kalıplama işleminden istenen temel özellikler, malzemenin istenilen yoğunluğa sıkıştırılabilmesi olarak tanımlanan yaş mukavemet ve akışkanlık özelliklerini taşıyor olmasıdır. Modelin bozulma veya çökme olmadan kalıptan çıkarılabilmesi için yaş mukavemet özelliği çok önemli bir role sahiptir. Mukavemet ve akışkanlık arasındaki denge, kalıplama işleminde kullanılan sıkıştırma yöntemine göre belirlenmektedir. [12].

Kalıp kumundan beklenen özellikler aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Kum, kum kalıpları üretmek için kullanılan kalıplama malzemelerini tanımlayan genel bir kelimedir. Kum kalıba dökümün başlangıcından bu yana, bu yöntemin geliştirilmesi sırasında aslında “kum” olmayan birkaç farklı kalıplama malzemesi tanıtılmıştır. Günümüzde bu malzemeler “kalıplama malzemeleri” olarak adlandırılmaktadır. Birbirinden ne kadar farklı olursa olsun, tüm kum türleri aşağıda listelenen gereksinimleri karşılamalıdır [29] .

- Boyutsal ve ısı kararlılık
- Uygun partikül boyutu ve şekli
- Sıvı metallerle tepkimesizlik
- Uçucu olmayan bileşenler
- Ekonomiklik
- Saflık, temizlik ve sabit pH
- Bağlayıcılarla uyumluluk

Geçirgenlik, kalıp içindeki gazların kalıp duvarından ne kadar kolay aktarıldığının bir ölçüsüdür. Yaş kum kalıplarında, nemin buharlaşması, sıvı halinden otuz kat daha fazla bir genleşmeye neden olur. Aynı dinamikler, döküm sırasında yanan ve egzoz gazlarına dönüşen kuru kalıplardaki organik bağlayıcılar için de geçerlidir. Bu gazlar kalıp boşluğu içinde tutulursa katılaşmış döküm parçada yüzey kusurlarına neden olurlar [24] .

Kum kalıpların geçirgenliği doğrudan kalıbın gözenekliliğine bağlıdır. Gözeneklilik derecesi, agrega kumunun tane boyutu dağılımı ile kontrol edilebilir. Dar tane boyutu dağılımı gözenekliliği artırır ve atık gazlar için bir yol oluşturur. Daha büyük gözeneklilik

dereceleri, sıvı metalin kalıp duvarının içine girmesine neden olabilir. Öte yandan, daha geniş tane boyutu dağılımı, daha ince taneler daha büyük taneler arasında doldukça gözenekliliği azaltır, bu da daha yoğun bir kalıp duvarına yol açar ve geçirgenliği azaltır [22] .

İncelik, kalıp kumu malzemelerinin tane boyutunun bir ölçüsüdür. Tane boyutu, bir dizi elekten bir kum numunesi geçirilerek belirlenir. Çoğu dökümhane tane inceliği için AFS standardını kullanır. Numune geçişinin en büyük miktarı olan elek inç başına açıklıklar, kalıplama malzemesinin inceliğini belirtir [28].

Kalıp kumunun tane boyutu, döküm paraçanın yüzey özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Daha ince taneler, daha kalın tanelerden daha pürüzsüz bir yüzey sağlar. Bununla birlikte, daha ince taneler, daha önce belirtildiği gibi geçirgenliği azaltır. Hem tane boyutu hem de geçirgenlik ters orantılı olduğundan, düzgün yüzey ile kalıbın geçirgenliği arasında taviz verilmesi kaçınılmazdır [24].

Refrakterlik, kum kalıbının yüksek sıcaklıklarda sıvı metale karşı tepkisiz kalabilmesidir. Kum malzemelerinin daha düşük refrakterliği, erimiş metal ile reaksiyonlara neden olarak hem kum kalıp hem de erimiş metal için zararlı olan istenmeyen bileşikler üretebilir [24].

Yaş mukavemet, kalıbı oluştururken, kalıbı taşıırken, maçaları veya modelleri çekerken, sıvı metal dökerken lazım olan özellik olan, kumun şeklini korumak için gerekli kritik bir parametredir. Bir yaş kum kalıbı, belirtilen dış kuvvetlere deformasyon olmadan direnmek için yeterli yaş mukavemete sahip olmalıdır. Daha yüksek yaş mukavemet, kalıbın işlenmesini ve kullanımını kolaylaştırır, ancak yaş kumun şekillendirilebilirliğini azaltır. Yaş mukavemet değeri, doğrudan yaş kumun kil ve nem içeriğine bağlıdır [30].

Kuru mukavemet, kum kalıbının kuru koşullarda döküm sırasında şeklini koruma yeteneğidir. Kalıplar, sıvı metal akışı ile aşınmayı önlemek için yeterli kuru mukavemete sahiptir. Çok fazla yüksek kuru mukavemet, katılaştan metalin sıcak yırtılmasına ve kırılmasına neden olur [28].

Dağılabilirlik, kum kalıbının bozulması sırasında kırılma kolaylığının derecesidir. Optimum bir dağılabilirlik, kalıbı frenlemeyi ve döküm ürünü herhangi bir hasar olmadan çıkarmayı çok daha kolaylaştırır [30].

Dayanıklılık kabaca kum kalıbın "son kullanma tarihini" tanımlar. Kum kalıbının özelliklerini kaybetmeden tekrarlı kullanıma dayanabilme yeteneğidir [22].

Kum kalıba döküm yönteminde en kritik kararlardan biri, kalıp malzemesinin seçimidir. Kalıp yapımında en yaygın kullanılan kum türleri aşağıda verilmiştir.

- Silis kumu
- Zirkon kumu
- Olivin kumu
- Kromit kumu

Silis kumu en yaygın olarak kullanılan kalıp kumu malzemesidir ve başlıca kuvars yapılı silika (SiO_2), ilmenit (FeO-TiO_2), manyetit (Fe_3O_4) veya olivin [$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$] içerir. Tüm dünyada kolaylıkla temin edilebilir, yüksek erime sıcaklığına sahip olmasının yanında iyi partikül boyutuna ve dağılımına sahiptir. Ancak 530°C 'de α -kuvarsın β -kuvarsa dönüşmesi, döküm sırasında kalıp boşluğu çevresinde istenmeyen ve düzensiz boyut değişiklikleri yaratmaktadır [31].

Demir alaşımları gibi daha yüksek erime noktasına sahip malzemelerin dökümü, β -kuvars 870°C 'de tridimit'e dönüştüğü ve tekrar büzüştüğü, sonunda 1470°C 'de geri dönüşü olmayan kararlı faz kristobalite dönüştüğü için işlem daha karmaşıktır. Kum kalıpları geri dönüştürüldüğünde kristobalit yüzdesi artar ve demir alaşımlı dökümde kullanıldığında kalıp büzülme olasılığını azaltabilir, ancak bu fenomen düşük erime noktalı malzemelerde bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır [31].

Zirkon kumu, bir Zirkon-Silikat bileşiğidir (ZrSiO_4), son derece refrakter, düşük ısııl genişleme katsayısı (yüksek sıcaklıklarda kararlı kalıp özellikleri), yüksek ısııl iletkenlik, yuvarlak şekilli kum kalıbı malzemesidir. Zirkonun soğutma hızı, kuvars kumundan dört kat daha fazladır, bu da kum kalıbına daha fazla ısı giderme yeteneği sağlar, ancak ince kesitlerde zorluklar yaratır. Zirkon kumu, doğal yüksek yoğunluklu ve yuvarlak şekilli parçacıklar nedeniyle silis kumuna göre daha az bağlayıcı gerektirir [28], [31].

Tüm faydalarına rağmen zirkon, geleneksel silis kumundan daha pahalı bir malzemedir. Ancak zirkon kumunun gerçek maliyeti malzemenin kendisinden gelir. Daha yüksek yoğunluk, aynı hacimde daha yüksek ağırlıklar anlamına gelir, bu nedenle otomatik kalıplama makineleri için daha yüksek enerji tüketimi ve daha güçlü ekipmanlar

gerektirir. Zirkon kumunun yüksek sertliği, onları kalıplama ekipmanına karşı daha aşındırıcı hale getirir. Keskin kenarlı zirkon partikül oranı arttıkça, kumun geri dönüştürölmesiyle durumlar daha da kötüleşir ve daha zararlı malzemeler ortaya çıkar [24].

Olivin kumu, yeşil renkli, forsterit (Mg_2SiO_4) ve fayalit (Fe_2SiO_4) bileşiiği içeren, çelik döküme uygun silis kumu alternatifidir. Silis kumundan daha düşük bir termal genleşme ve erimiş metale karşı düşük reaksiyon eğilimine sahiptir. Ancak, kayaların küçük parçacıklar halinde ezilmesinden elde edilen olivin kumu, kalıplama ekipmanlarına zararlı köşeli şekilli parçacıklar verir. Olivin kumu sadece alkali bağlayıcılara tepki vererek kumun şekillendirilmesini daha zor hale getirir. Demir içeriği, refrakterlik seviyesinde belirleyici bir role sahiptir ve başarılı dökümler için kontrol edilmesi gerekir [24].

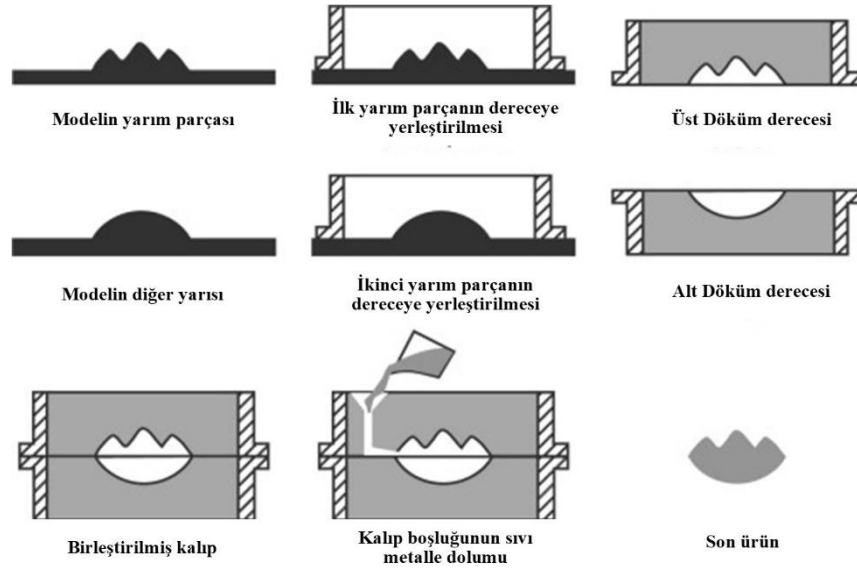
Kromit kumu ($FeCr_2O_4$), çelik dökümhaneleri için uygun, siyah renkte, yüksek oranda refrakterlik gösteren bir kum alternatifidir. Zirkon kumunun iki katı ısılgenleşmeye sahiptir ve dökümlerde gaz kusurları oluşturan sulu bileşikler içerir. Kromit genellikle silis kumu kalıpları için kalıp kumu olarak kullanılır ve kromit sırlanmasına neden olarak ürünlerin yüzey özelliklerinin zayıf olmasına neden olur. Ayrıca, kromitin fayalite (Fe_2SiO_4) ve grunerite ($FeSiO_3$) ayrışması, refrakterliği ve kum kalıplarının ıslah şansını azaltır [24].

Yaş kum kalıplama en yaygın olarak kullanılan kum kalıplama yöntemlerindendir. Yaş kalıplama kumu içerisinde kuvars döküm kumu, kil (bentonit, kaolin), su ve bazı özellikleri tamamlamak için kullanılan az miktarda ilave malzeme (demir silikatlar, zirkon, kromitler) bulundurmaktadır. Yaş kum kalıba dökümün en önemli avantajlarından biri, iyi bir tasarım esnekliği sağlaması ve böylece her boyutta ve ağırlıkta parça için döküm yapılabilmesi için olanak sağlamasıdır. Bu döküm işlemini kullanarak, çok daha az harcama ile karmaşık şekiller çok kolay bir şekilde ortaya çıkarılabilir. Ayrıca, diğer döküm işlemlerine kıyasla çok kısa bir teslim süresi ile çok çeşitli malzemeler kullanılabilir. Bu avantajların yanında yaş kum kalıba döküm işlemi parçalardaki görece yüksek gözenekliliği nedeniyle nihai üründe yüksek mukavemet sağlayamayabilir. Ayrıca, düşük boyutsal doğruluk ve çok zayıf bir yüzey kalitesi vardır. Nihai ürüne yeterli toleransı vermek için genellikle ikincil işlemler gerekir [32].

Kum kalıba döküm işlemi genel olarak 5 temel adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar en sadeleştirilmiş biçimiyle aşağıdaki gibidir.

- Model Yapımı
- Maça Yapımı
- Kalıp yapımı
- Ergitme ve döküm işlemleri
- Ardıl işlemler (Temizleme)

Şekil 3.4' de kum kalıba döküm işleminin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 3. 4 Kum kalıba döküm yönteminin işlem basamakları [12]

3.3.1 Kalıp Kumu ve Bağlayıcılar

Kalıplama malzemesinde gerekli olan özelliklerin kombinasyonu, dökümün ağırlığına, bileşimine ve uygulanacak kalıplama yöntemine bağlıdır. Özellikler, kum veya diğer refrakterlerin bağlayıcı malzemeler, su ve özel katkılarla karıştırılmasıyla geliştirilir. Kalıp kumları, kullanılan kum malzemenin tipine göre iki kategoride incelenmektedir [30].

Doğal olarak bağlı kumlar, doğada bulunduğu halinde yüksek oranda bağlayıcı içeren kum tipleridir. Bu tür kumlar genellikle sadece su ilavesiyle iyi kalıplama özellikleri

gösterirler, ancak nispeten yüksek kil içerikleri refrakterliği ve geçirgenliği azaltmaktadır [33].

Sentetik kumlar temel olarak doğal halde çok az bağlayıcı içeren veya hiç içermeyen silis kumlarına dayanır, mukavemet özellikleri ayrı ilavelerle geliştirilir. Bu özellik, kalıp kumunun özelliklerinin kontrolünde esneklik sağlar [33].

Son yıllarda, kalıplar ve maçalar için inorganik bağlayıcılar geliştirilmeye başlanmıştır. Bu bağlayıcılar çevre dostudur ve toksik madde içermezler. Ayrıca fenoller, formaldehit, izosiyanatlar, nafta, üretanlar veya furanlar içermez. Çevresel faydalarına ek olarak, katılma sırasında döküm parçaya hiçbir organik gaz atığı salmaz, bu özellik döküm parçada çoğu harici gaz kusurunu ortadan kaldırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu özellik, doğal kalıp havalandırmasının olmadığı ve organik sistemler tarafından üretilen gazların yoğunlaştığı kalıcı kalıplarda kullanılan maçaları üretmek için kullanışlıdır. İnorganik bağlayıcı sistemleri düşük reaktivite gösterir ve bilinen bağlayıcı sistemleri içinde en düşük mukavemete sahip olanıdır, bu nedenle kalıp veya maça yapımı sırasında ek kontroller gerektirir. Bağlayıcılar da hidrofiliktir, bu nedenle kalıplar ve maçalar dökülmeye kadar kuru bir yerde saklanmalıdır. Sisteme ek olarak eklenen bazı katkı maddeleri, yüksek sıcaklık ve nem koşulları altında bağlayıcı malzemenin bozulmasını geciktirmek amacıyla kullanılmaktadır. Diğer bir zorluk, maçaların su bazlı kaplama sistemleriyle kaplanmasıdır. Su bazlı kaplamaların kurutulması gerektiğinden, maça bozulmasını önlemek için kurutma sisteminin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Yüksek sıcaklık ve bağıl nem, kurutma sırasında maçayı giderek daha zayıf hale getirerek, potansiyel olarak deformasyona veya kırılmaya açık hale getirecektir. Teknik zorluklara rağmen, birçok dökümhane inorganik maça üretimini rutin hale getirmiştir[12], [32].

Kalıp malzemesinin kompozisyonu, öncelikle kalıbın refrakterlik özelliği için kritik bir parametredir. Çoğu kalıp kumu, hem jeolojik olarak bol olan hem de 1700°C'ye yaklaşan sıcaklıklara dirençli olan mineral kuvarsa dayanır, ancak hacim değişiklikleri içeren faz dönüşümleri daha düşük sıcaklıklarda meydana gelmektedir. İdeal kalıp malzemesi karışımı, minimum bağlayıcı ilavesiyle yüksek saflıkta silis kumu içermelidir.

Kalıp kumunun tane boyutu ve dağılımı, oluşturulan kalıbın birçok özelliğini doğrudan etkiler. Bu özelliklerden en belirgin olanları geçirgenlik ve yüzey inceliğidir. Kalıp

kumunun tane boyutu, bağlayıcı karışımların dayanım özelliklerini etkiler, kil bağlı kumlarda basınç dayanımı ile tane boyutu arasında ters bir ilişki vardır [28], [30].

Tane şekli ve yüzey dokusu jeolojik kökene göre belirlenir, açılal taneler esas olarak buzul hareketleri ile, yuvarlak taneler ise rüzgar ve su hareketi ile ilişkilidir. Tane şekli akışkanlık ve mukavemet açısından önemlidir. Köşeli kumların, kalıplamada daha düşük bir akışkanlık standardını temsil eden daha dik kütle yoğunluğu gradyanları verdiği gözlemlenmiştir. Tane şeklinin mekanik dayanımla ilişkisi, kısmen elde edilen sıkıştırma yoğunluğu tarafından yönetilir [28].

Bağlayıcının işlevi, yaş veya sertleştirilmiş durumdaki refrakter taneler arasında kohezyon oluşturmaktır. Bağlayıcı malzemeleri yüksek derecede refrakter olmadığından, kalıplama için gerekli mukavemet, olabildiğince az ilave malzeme ile sağlanmalıdır. Killer, silikatlar ve hem sentetik hem de doğal sayısız organik reçineler ve yağlar dahil olmak üzere birçok madde bağlama özelliklerine sahiptir: tek başlarına veya kombinasyon halinde kullanılabilirler. Kil bağlı kumlar, kapalı sistemlerde yeniden sirküle edilebilmeleri ve su ilavesiyle yeniden bağ oluşturabilmeleri ile ayırt edilirler; diğer bağlayıcıların çoğu geri döndürülemez ve kalıplama malzemesi tek bir üretim döngüsünden sonra atık sayılır [30], [34].

Bağlayıcı normalde ya sıvı haldedir ya da kum tanelerinden çok daha ince toz haldedir. İdeal dağılım, her bir tanenin etrafında ince bir film olacak şekildedir; kum hazırlamanın birincil amacı, düzgün bir kaplama elde etmektir. Sıkıştırmada, bağlayıcı kaplamalar, tanelerin temas noktalarında mercek şeklinde kütleler oluşturur [30].

Kil: Yaş ve geleneksel kuru kum uygulaması için kalıp kumları genellikle kil ile birleştirilir. Doğal kalıplama kumlarında kil, kum taneleri ile birlikte bulunurken, sentetik kumlar ayrı tortulardan seçilmiş killer ile bağlanır. Yaş kum kalıplarının bağlanmasında kullanılan en yaygın killer, montmorillonit veya hidratlı alüminyum silikat formları olan bentonitlerdir. Montmorillonit, oksijen atomlarıyla çevrili silika atomlarının ve oksijen atomlarıyla çevrili alüminyum atomlarının dönüşümlü tetrahedralarından oluşur. Bu katmanlı bir yapıdır ve düz plakalar olan kil parçacıkları üretir. Bu plakaların yüzeylerinde su emilir ve bu da bentonitin su varlığında genişmesine ve kurduğunda büzülmesine neden olur. Kimyasal bağlama sistemleri, sertleştirme yaklaşımlarına bağlı olarak üç grupta incelenir.

Bunlar (1) sıcak sertleştirme, (2) soğuk sertleştirme ve (3) gaz veya buharla sertleştirmedir [30], [33].

Isıyla sertleşen bağlayıcılar: Bunlar, geleneksel fırında sertleşen maça bağlayıcıların türevleri olarak kabul edilebilir. Bu gruba yapılan başlıca modern eklemeler, şişirilmiş maçaların seri üretimi için kullanılan, sıcak ve ılık kutu proseslerinde kullanılmak üzere geliştirilmiş hızlı kürlenene, katalizörle sertleşen, organik reçinelerdir. Sıcak kutu işleminde kullanılan sıvı reçineler, asit veya asit tuzu katalizörleri ile üre formaldehit (UF), fenol formaldehit (PF) ve furfuril alkolün (FA) çeşitli kombinasyonlarını kullanır ve ısıtılan malzemeye temas ettiğinde hemen sertleşen kararlı kum karışımları oluşturur. Sıcak kutu sistemleri, ısıtılmış kutu ile temas halinde hızla kürlenene, çok ince kesitlere sahip dayanıklı ve karmaşık maça parçalarının üretimde tercih edilmektedir [28], [30].

Soğukta sertleşen bağlayıcılar: Soğukta sertleşen veya fırınsız bağlayıcı sistemleri, organik veya silikat formunda olabilir. Kum karışımı, sıvı bağlayıcı ve uygun bir sertleştirme reaktifi veya katalizörü ilave edilerek hazırlanır, sertleşme süresi, sonraki ilavenin yapısı ve miktarı tarafından kontrol edilir. Reaksiyon hızı, sıcaklığa ve kumun diğer bileşenlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Hızlı sertleşme oranları elde edilebilir, ancak büyük kalıpların üretimine zaman tanımak için hız da kontrol edilmelidir. Uygun karıştırıcı tasarımları, bileşenlerin sürekli olarak ölçülmesini ve karıştırılmasını ve üretim noktasına hızlı teslimatı kolaylaştırır, ancak bazı uygulamalar için toplu karıştırma da uygulanabilir. Organik soğukta sertleşen sistemlerin önemli bir özelliği, uygun özellikleri elde etmek için gereken çok düşük bağlayıcı içeriğidir. %2'nin altında ve bazı durumlarda %1'den az ilaveler yeterli olabilir [30].

Furan bağlayıcılar: % 30-85 aralığında furfuril alkol içeriğine sahip bu bağlayıcılar asit katalizörlerle sertleştirilmiş UF/FA, PF/FA ve UF/PF/FA kombinasyonlarına dayalı üç ana grup olarak bulunmaktadır. Özellikle UF/FA sistemi ile uygulanan demir esaslı döküm işlemleri sonucu elde edilen parçalarda nitrojen gözenekliliği sorunlarıyla karşılaşılabilirken, üre varlığı da geri dönüştürülmüş kumlarda nitrojen birikmesine neden olabilir. Bu problem, reçinelerdeki artan furfuril alkol oranları ile daha yüksek maliyetle de olsa azalır ve bir alternatif olarak PF/FA reçinelerinin kullanılmasıyla ortadan kalkar [30].

Esterle sertleştirilmiş fenolik reçineler: Alkali fenolik reçine bağlayıcılar, metil format veya bütlen glikol diasetat gibi çeşitli organik esterlerin etkisiyle sertleştirilebilir; ester seçimi, birkaç dakikadan birkaç saate kadar değişen sertleşme süresinin belirlenmesinde etkilidir. Kumlar, %85'e varan oranlarda geri kazanılabilir. Bu sistem düşük emisyon ve az koku yayması ile bilinmektedir. Sistem, iyi erozyon direncini mükemmel bozulma özellikleriyle birleştirmektedir ve çelik dökümler için yaygın olarak kullanılmaktadır [30].

Fenolik üretan bağlayıcılar: Bu sistem soğukta sertleşen sistemler arasında yer almaktadır. Sistemde üç aşamadan oluşan bir bağlayıcı formülasyonu kullanılır. Bir fenol novalak reçinesi, ilave miktarı ile belirlenen bir oranda çapraz bağlanmayı indükleyen üçüncül bir amin sıvı katalizör varlığında diizosiyanat ile karıştırılır: bu sayede bağlayıcıda, hızlı kütleme özelliğini, çeşitli üretimlere uyacak şekilde yeterli çalışma süresini seçme yeteneği ile birleştirir. Aşırı nitrojen birikiminden kaçınılması koşuluyla, tamamen yeniden kullanımı mümkündür [30].

Esterle sertleştirilmiş silikatlar: Bu sistem, 2.5-2.8:1 aralığında SiO_2 : Na_2O moleküler oranlarına sahip sodyum silikatlar kullanır; bağ, bir gliseril asetat gibi bir sıvı organik ester ile reaksiyona sokularak geliştirilir. Geliştirilen malzeme, hidrolize çözeltideki pH değerini düşürerek kısmen susuz halde bulunan bir silika jel oluşturur. Bazı katkı maddeleri, söz konusu bağlayıcının özelliklerini geliştirmek için kum karışımına ilave edilir. Sistem, çelik dökümlerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır ve dökümde çok az duman oluşumu ile birlikte çevreye karşı oldukça duyarlıdır. Esterle sertleştirilmiş fenolik reçine alternatiflerinin ortaya çıkması ile sistemin kullanımı azalmıştır [30], [35].

Çimento: Bağlayıcı olarak çimento kullanımı, ayırt edici bir kum kalıplama uygulaması olan Randupson prosesinin temeli olarak öne çıkmaktadır. Yaklaşık olarak %11 Portland çimentosu ve %6 su içeren silis kumu, çimentonun ilk sertleşmesine kadar yerinde bırakılan geçici ahşap çerçevelere monte edilmiş modellerler kullanılarak kutusuz bir blok kalıplama sisteminde kullanılabilir. Büyük kalıpların taşınması için destek, iç ızgaralar tarafından sağlanır. Çimentonun hidratasyonunu takiben fazla suyun buharlaşması için zaman verilerek nihai kalıbın güçlü, sert ve refrakter özellik göstermesi sağlanır. Önemli çevre sorunları bulunmamaktadır. Hidrasyon reaksiyonu geri döndürülemez. Ancak kullanılan kalıplama malzemesi ezilip, elenerek daha sonra hazırlanacak karışımlarda kullanılmak üzere geri kazanılması sağlanabilir [30].

Gaz ve buharla sertleşen bağlayıcı sistemlerinde, maça veya kalıp parçası oluşturulduktan sonra ayrı bir soğuk sertleştirme işlemi uygulanır. Sertleştirme işlemi, sıkıştırılmış kumdan bir gaz veya buhar geçirilerek gerçekleştirilir, böylece zamanlaması operatör tarafından belirlenir [28].

CO₂ silikat sistemi: Bu çok yönlü geliştirme, kumun soğuk sertleşmesini, her ne kadar zorunlu olmasa da, genellikle maça kutusu veya model ile temas halinde olan ilk uygulamadır. 1,5 ila 3:1 aralığında moleküler oranlara sahip sodyum silikatlar, %2.5-4 aralığındaki miktarlarda ve genellikle parçalayıcı katkı maddeleriyle birlikte kullanılır. Çünkü silikat bağlayıcılar bu açıdan zayıf niteliklere sahiptir. CO₂ gazının geçişi, sulu çözeltide karbonik asit üretir ve kuru gazın akışıyla su içeriği azalır ve viskozite artar. pH'daki azalma, SiO₂: Na₂O oranının yükselmesine ve sertleşerek bağı oluşturan kolloidal silika jel oluşumuna neden olur. Yeniden kullanım, yaklaşık %50 ile sınırlıdır ve bu, ancak ıslak yöntemlerle artırılabilir. Bu özellik, çevresel etkiler nedeniyle söz konusu işlemin en büyük dezavantajı olarak kabul edilir. Organik bağlayıcı sistemlerinin uygulanmasındaki artışa rağmen, CO₂ prosesi, demir dışı dökümler için kalıpların üretiminde ve genel olarak maça yapımında, özellikle daha büyük dökümler için önemli bir rol oynamaya devam etmektedir [30].

Fenolik ürethan soğuk kutu sistemi: CO₂ silikat prosesine benzer bir süreç kullanan ilk organik soğuk kutu uygulamasıdır. Üç parçalı bir formülasyon kullanılır. Sıvı fenol novalak reçinesi ve izosiyanat reaktifi, kuru kum ile karıştırılır, ancak üçüncül amin katalizörü, karışımı sıkıştırma işleminden sonra buhar olarak uygulanır ve maça kutusu içinde veya model üzerinde hızlı sertleşme meydana getirir. Sistem, düşük gaz çıkışı, iyi bozulma özellikleri ve yeniden kullanım için uygunluk gibi özelliklerin yanında iyi mukavemet özellikleri de sunmaktadır. Soğuk kutu maça yapımı alanında büyük önem kazanmış, yüksek hacimli üfleme maça üretimi ile genel maça yapımı ve kalıplama için yaygın olarak tercih edilmiştir. Amin buharla kütleme aşaması için kapalı sistemler gereklidir, sertleştirilmiş çekirdek sistemden aktarılmadan önce kalan buhar temizlenir ve tükenir. Az miktarda amin ve çözücüler koku üretir, ancak bu sorunu azaltmak için çeşitli modifikasyonlar yapılmıştır [30].

Ester kürlü fenolik soğuk kutu sistemi: Benzer soğukta sertleşen bağlayıcı durumunda olduğu gibi, alkali fenolik reçinesi bir esterin etkisiyle sertleştirilir, ancak bu yöntemde

metil format buhar olarak uygulanmaktadır. Kalıp mukavemeti fenolik ürethan ile elde edilenlerden daha düşük olmasına rağmen, bir dakikadan daha az sertleşme süreleri elde edilir. Sistem koku ve duman problemleri içermez. Esterle sertleştirilmiş soğuk kutu sistemi, hem maça hem de kalıp üretimine uyarlanabilirliği nedeniyle geniş çapta kullanım alanına sahiptir. İyi parçalanma nitelikleri %75 oranında yeniden kullanımı kolaylaştırır [28], [30], [35].

3.4 Ablasyon Döküm

Kum kalıba döküm yönteminde son yıllarda gerçekleşen en önemli gelişmelerden birisi doğrudan su soğutmanın yapıldığı ablasyon dökümdür. Basitçe tanımlamak gerekirse ablasyon döküm işlemi, kum kalıba yapılan bir dökümün katılaşması sona ermeden su püskürtülerek kalıbın bozulması ve parçanın hızlı soğutulması işlemidir. Kalıp yapımında suda çözünebilen bir bağlayıcı ve soğutmayı sağlayacak özel bir su püskürtme düzeneği kullanılır. Bu teknik geleneksel kum kalıba döküm ile basınçlı dökümün bazı karakteristiklerini birleştirmek için tasarlanmıştır. Basınçlı dökümün sağladığı hızlı soğumadan dolayı oluşan ince taneli mikroyapıya rağmen yüksek hızlı ve kaotik kalıp dolumu havanın parça içinde kalmasına ve buna bağlı olarak parçada poroziteye neden olabilmektedir. Ayrıca basınçlı dökümle şekillendirilecek alüminyum alaşımlarında kalıba yapışmayı engellemek için demir içeriği arttırılmaktadır ve bu durum demir içeren intermetalik fazların miktarını arttırarak gevrekliğe neden olmakta ve mekanik özellikleri kötü yönde etkilemektedir. Bunların yanında yoğun talaşlı işleme gerektirdiği için basınçlı döküm kalıplarının üretimi zor ve maliyetlidir, yalnız yüksek miktarda üretimler için karlı olmaktadır. Basınçlı dökümle kıyaslandığında kum kalıba dökümde metal dolumu çok daha kontrol edilebilir durumdadır. Ancak bu yöntemde de soğuma hızı oldukça düşüktür. Bir tür kum kalıp tekniği olan kaybolan köpük döküm (KKD) yönteminde de aynı durum söz konusudur. Özellikle metalin büzülmesi ve kum kalıbın genişlemesinin neden olduğu hava boşluğu ısı iletimini büyük oranda yavaşlatmaktadır.

Ablasyon dökümde bu hava boşluğunun oluşmasına izin verilmeden kalıp bozulmakta, sürekli ve hızlı bir soğutma sağlanmaktadır. Oluşan yüksek sıcaklık gradyanı çekme boşluğu miktarını azalttığı ve mikro yapıyı önemli ölçüde incelttiği yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır. Su püskürtme süreci yeterli kalınlıkta bir kabuk katılaştıktan sonra başlamaktadır, böylece parça şeklinde ve yüzeyinde bozulmalar meydana

gelmemektedir. Döküm ile su püskürtme arasındaki bekleme süresi ablasyon döküm işleminin en kritik parametresidir.

Ablasyon döküm, yüksek mukavemetli döküm parçalar üretmek için kullanılan görece yeni bir döküm işlemidir. Kalıp, sıvı metal ile doldurulduktan sonra Şekil 3.5'te de gösterildiği gibi su ile bozulabilen (aşınan) suda çözünür bir bağlayıcı yardımı ile bağlanmış bir kumdan yapılmaktadır.

Soğutma suyu ile döküm parça arasında doğrudan temas olduğu için soğutma için hava boşluğu kullanımına gerek bulunmamaktadır. Kalıp sadece döküm parçanın şeklini tanımlar. Soğutma, dökümün geometrisine uyacak şekilde bağımsız olarak kontrol edilir. Ablasyon dökümünde mümkün olan yüksek soğutma hızı, genellikle çok ince ötektik faz bulunduran benzersiz mikro yapılara yol açabilmektedir. Ablasyon döküm yönteminde katılaşma süresinin esas olarak kesit kalınlığı tarafından kontrol edildiği doğal katılaşma sürecinin aksine, uygulanan soğutma ile doğrudan kontrol edilebilen ve bu nedenle kesit kalınlığından bağımsız olarak döküm boyunca homojen katılaşma sürelerine ulaşılabilir. Soğutma, katılaşma sırasında çok dik bir sıcaklık gradyanı oluşturmak için de kontrol edilebilir, bu da 6061 ve 7075 gibi normalde dökümü olmayan alaşımların yanı sıra uzun donma aralığına sahip alaşımlarının dökümünü kolaylaştırır. Ablasyon dökümde gradyanlar 60 Kmm^{-1} kadar yüksek olabilmektedir. Yüksek sıcaklık gradyanları, herhangi bir alüminyum alaşımında besleme aralığını genişletecek ve çok ağır bölümlerin ince döküm duvarlardan beslenmesini mümkün kılacaktır. Al- Si döküm alaşımlarında ince ötektik yapı elde edilmesi kritik bir konudur. Bu alaşımlardan dökülen yüksek kaliteli alüminyum dökümlerin mukavemeti ve sünekliği ötektik Si yapısı ile yakından ilişkilidir. Ötektikte Si boyutunun küçültülmesi, bu alaşımların performansını iyileştiren ön önemli etkidir [1], [12].



Şekil 3. 5 Ablasyon döküm örneği

Geleneksel kum kalıba dökümler ve hassas dökümlerin kalıp dolumu yüksek basınçlı döküme kıyasla daha iyi kontrol edilebilir, ancak katılaşma hızı çok daha düşüktür ve karmaşık soğutucular gerektirmektedir. Elde edilen mekanik özellikler bu nedenle nispeten zayıf ve değişkendir. Reçine tipi bağlayıcı sistemleri büyük maliyetli sistemlerdir. Ek olarak, döküm parçanın katılaşması sırasında, parça kalıptan uzaklaşır ve kalıp genişleyerek döküm parça ile kalıp arasında hava boşluğunu oluşturur. Bu hava boşluğu soğuma hızını, dolayısıyla mikroyapının inceliğini ve dökümün mekanik özelliklerine etki etmektedir. Ablasyon döküm teknolojisi, çevre dostu, suda çözünür bir inorganik bağlayıcı ile bir arada tutulan kum kalıbını, kalıbı bozacak (yani çözünerek aşındıracak) şekilde püskürtülen suyla bozar ve suyun doğrudan döküm parçayı soğutmasına izin verir. Teknik, döküme yüksek bir soğutma hızı sağlarken hem kalıbın kendisinin hem de en karmaşık iç maçaların kolayca çıkarılmasını sağlar. Yönlü katılaşma, tipik Al-Si sisteminin dışındaki döküm alaşımlarıyla yaygın olarak ilişkilendirilen alışagelmış sorunları azaltarak büyük ölçüde geliştirmektedir[1], [2].

Bu döküm yönteminin enine kesitinde büyük bir sıcaklık gradyanı vardır, bu özellik kalın cidarlı parçalarda, büzülme gözenekliliğinin ortadan kaldırılmasını kolaylaştırmaktadır. Katılaşma, benzeri görülmemiş derecede yüksek soğutma hızları altında meydana gelir

ve bunun sonucunda elde edilen mikroyapı mekanik özelliklere doğrudan etki eder. Literatürden elde edilen verilere göre, ablasyon döküm yöntemiyle üretilen bir döküm parçanın mekanik özellikleri, yüksek basınçlı döküm yöntemi kullanılarak elde edilen parçaya göre eşit veya daha yüksek olabilmektedir. Ablasyon döküm teknolojisi, esas olarak, değişen duvar kalınlıklarına ve karmaşık geometriye sahip, dökümlerin nispeten yavaş katılaştığı ve bunun sonucunda istenmeyen bir tane büyümesi ile sonuçlandığı kum kalıba döküm ile yapılan parça üretimlerinde bir kurtarıcı görevi görmektedir. İnce taneli bir yapı elde ederek mekanik özellikleri iyileştirmek için, sıvı metale döküldükten hemen sonra döküm kalıbının ablasyon soğutması uygulanır [1], [2], [4].

Ablasyon döküm yönteminin diğer döküm yöntemlerine karşın tüm avantajları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- Ablasyon döküm işlemi, dökümhanelerdeki toz kirliliğini önleyerek ek bir döküm sonu işlemi olan kalıptan çıkarma işlemini ortadan kaldırır.
- Kalıp ile soğutulmuş döküm parçanın yüzey tabakası arasında dışarıya ısı akışını sınırlayan hava boşluğu yoktur.
- Hava boşluklarının olmaması, benzeri görülmemiş derecede büyük sıcaklık gradyanı ve yüksek çekirdeklenme hızı koşulları altında sıvı metalin katılaşmasını sağlar.
- Elde edilen dökümlerin mekanik özellikleri, basınçlı döküm işleminde elde edilen mekanik özelliklerin seviyesine eşit veya daha yüksektir.
- Bu yenilikçi teknolojinin bir başka avantajı, büzülme gözenekliliğini ortadan kaldıran kontrollü yönlü katılaştırmasıdır.
- Ayrıca, yüksek maliyetli metal kalıp teknolojileriyle ilgili olarak, kum kalıplarda yüksek kaliteli döküm üretme süreçleri bu yöntemle oldukça ekonomik hale gelmektedir.
- İnorganik suda çözünebilen bir bağlayıcı kullanımıyla diğer döküm yöntemlerine kıyasla çevresel sayılabilmektedir.
- Döküm işleminin tüm girdileri geri dönüştürülerek kullanılabilir olduğundan ekonomik açıdan gayet makul bir yöntemdir.

Ablasyon döküm işleminin geliştirilmesi ile maça üretimi oldukça kolay hale gelmiştir. İnorganik bağlayıcılı kumun minimum gaz çıkışına sahip olması, havalandırılmayan karmaşık maçalar için büyük bir avantajdır. Ayrıca, yeni yöntem ile en karmaşık iç maçalar bile basitçe üretilmekte olup oksijenin maçanın bazı bölümlerine kolayca ulaşamamasından kaynaklı standart termal problemleri ortadan kaldırılmıştır. Ablasyon döküm yöntemin uygulama alanlarından bazıları, içi boş süspansiyon bileşenleri, valf gövdeleri gibi parçalardan karmaşık maçalar içeren ve yüksek özellikler gerektiren motor silindir kapaklarına kadar uzanmaktadır[1], [34], [36].

Ablasyon döküm işlemin bir diğer avantajı ise hem ince (2 mm) hem de kalın (100 mm'ye kadar) kesit kombinasyonlarının sorunsuz bir şekilde dökülebilmesidir. Bunun nedeni, kalıbın metalden ısı çıkarmak için tasarlanmamasıdır; soğutma sıvısı bunu kontrollü bir şekilde gerçekleştirir. Böylece kalıp ya önceden ısıtılabilir ya da minimum miktarda ısı çıkarmak için seçilen düşük ısı yayımlı bir kumdan oluşturulabilir, böylece ince bölümlerin doldurulması kolaylaşır. Bu nedenle teknoloji, özellikle içi boş kesitli olanlar olmak üzere, çok çeşitli yapısal bileşenlerin üretimine uygun hale gelebilir [1], [37].

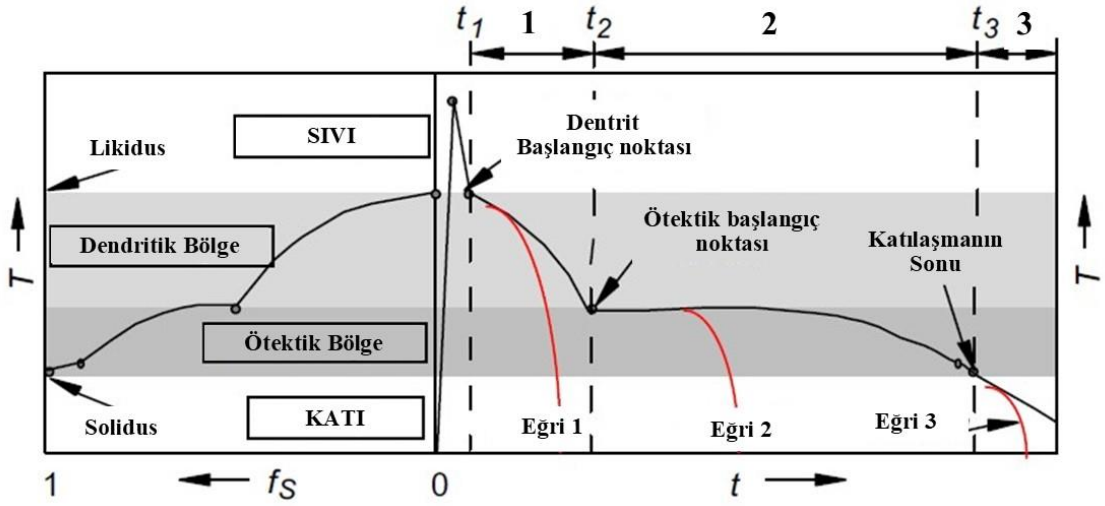
Ablasyonlu dökümler için ek avantajlar, oldukça rekabetçi maliyetleri gibi görünmektedir. Bu, esas olarak, silikat bazlı bağlayıcının, rakip reçine bazlı bağlayıcılardan çok daha az maliyetli olması nedeniyle ortaya çıkar, ancak aynı zamanda nispeten düşük ekipman gereksinimi maliyetinden de yararlanır. Su bazlı teknolojinin bir sonucu olarak başka faydalar da ortaya çıkar. İşlem, koku, duman ve toz üretmez (geri dönüştürülmüş kum çoğunlukla ıslak veya nemlidir), bu da maliyetli duman ve toz emme ekipmanı kurulumundan tasarruf sağlar.

Ablasyon döküm teknolojisi için, küçük miktarlarda suyla seyreltilebilir inorganik bağlayıcılara dayalı kalıplama kumları uygundur. Bu kalıplama kumları kolayca aşındırıcı ortamın etkisine maruz kalmaktadır. En yaygın olarak kullanılan bağlayıcı, ilk kez 1947'de kullanılan hidratlı sodyum silikattır. O zamanlar kalıplama kumları gaz halindeki CO₂ ile sertleştirilmektedir. Hidratlı sodyum silikat ve sıvı ester sertleştiriciler (1968'de) ile kendiliğinden sertleşen gevşek kalıplama kumlarının geliştirilmesi, kullanılan bağlayıcı miktarında azalmaya izin vermiştir. En yaygın olarak kullanılan proseslerden biri Flodur tipi sertleştiricilerin kullanıldığı Floster prosesidir. Fosfat bağlayıcılar, suda iyi çözünürlük ile tanımlanırlar. Toksik değildirler ve çevreye zararsızdırlar ve onları sertleştirmek için

hiçbir organik bileşik kullanılmaz. Temel bağlayıcı bileşenleri, esas olarak ortofosfat alüminyum(V) olmak üzere fosfatlardır. Toz haline getirilmiş magnezyum oksit MgO esas olarak sertleştirici olarak kullanılır. Kalıpların ve maçaların üretimi için inorganik bağlayıcılar ayrıca mineral polimerlere (jeopolimerler) dayalı bağlayıcıları da içerir. "Geopolimer" terimi, bir grup amorf alüminosilikat malzemesini tanımlamaktadır. Bunlar 1980'lerde Fransa'da Davidovits tarafından geliştirilmiştir. Kendiliğinden sertleşen kalıp kumları esterler vasıtasıyla sertleştirilebilir ve ayrıca inorganik bir bağlama sistemi geliştirilmiştir. Burada SiO_4 ve AlO_4 tetraeder zincirlerinden oluşan silisyum ve alüminyum bazlı inorganik bir polimer kullanılmıştır. Sertleştiricinin etkisi sonucunda polimerizasyon derecesi artar ve yüksek bağlama kapasiteli bir polimer oluşur. Bağlayıcının kademeli polimerizasyonunun seyri, sıvının viskozitesinde kademeli bir artışa ve polimere dönüşmesine neden olur. Literatür taraması, ablasyon döküm teknolojisinde kalıp yapmak için çeşitli inorganik bağlayıcılar kullanma gereksinimini açıkça göstermiştir [38]–[40].

3.4.1 Ablasyon Dökümde Katılaşma

Bir ablasyon döküm işlemi sırasında gerçekleşen faz değişimleri ve soğutma koşulları Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 3.6'da verilen şemada y ekseni sıcaklığı temsil etmektedir. O'ın sol tarafındaki x ekseni katı oranı f_s 'i ve sağ taraftaki soğutma süreleri t 'yi tanımlamaktadır. Şekil 3.6'da T-fS eğrisi sol tarafta ve soğuma eğrileri sağ tarafta bulunmaktadır. Döküm alaşımları genellikle birincil dendritik fazı ve ötektik fazı içermektedir. Soğuma aşamasında f_s , azalan sıcaklıklarla beraber O'dan artmaya başlar ve sıcaklık alaşımın katılaşması tamamlandığında f_s 1'e ulaşana kadar ötektik fazlar çeşitli sıcaklıklarda kademeli olarak oluşur. Burada t_1 dendritik katılaşmanın başlangıç zamanı, t_2 ötektik katılaşmanın başlangıç zamanı ve son olarak t_3 ise katılaşmanın bittiği zamanı temsil etmektedir [36].



Şekil 3. 6 Kum döküm ve ablasyon döküm koşulları altında bir A356 alaşımı için T-f_s eğrisinin ve soğuma eğrilerinin şematik gösterimi [36]

A356 alaşımlı dökümün herhangi bir noktasındaki olası soğuma eğrileri, Şekil 3.6'da sağ tarafta şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde verilen siyah renkli eğri, kum kalıba dökümdeki tipik soğuma eğrisini temsil eder. Döküm parça üzerine su jeti ile soğutma uygulaması, soğuma eğrisi üzerinde üç bölgeye ayrılarak anlatılabilir. Bölge 1, t_1 ve t_2 arasında bulunur ve alaşımın dendritleri ve sıvı fazı birlikte içerdiği dendritik bölgeyi temsil eder. Bölge 2, t_2 ve t_3 arasında bulunur ve ötektik fazların dendritler arası sıvı içinde büyüdüğü ötektik bölgedir. Bölge 3, katılaşmanın tamamlandığı bölgeyi temsil eder. Ablasyon soğutmasının soğuma eğrisinin ölçüldüğü noktaya ulaşmaya başladığı an olarak tanımlanan ablasyon soğutmasının başlangıcı, katının çeşitli oranlarında, f_s grafiğinin bölgelerinin herhangi birinde meydana gelebilir. Bölgesel sıcaklık çok yüksek olduğundan ve konumdaki metal hala sıvı durumda olduğundan, ablasyon soğutmasının başlangıcının t_1 'den önce gerçekleşmesi olası değildir. Aslında, katının bölgesel oranı f_s , su jetlerinin etkisine dayanacak kadar yüksek olmadığında, su jetlerinin dökümle temas etmesine izin verilmemelidir [36].

Kırmızı eğriler, ablasyon soğutmasının farklı ablasyon başlangıç zamanlarındaki soğuma davranışını gösterir. Erimiş metal kalıp boşluğuna döküldükten sonra metal ilk olarak siyah eğri boyunca katılaşmaya başlar. Su jetleri dökümdeki katılaşmayı etkiler etkilemez metal kırmızı eğri boyunca soğumaya yönelir. Dendritleri ve ötektik fazları etkin bir şekilde modifiye etmek için, ablasyon soğutmasının başlangıç zamanı Bölge 1'de veya

Bölge 2'nin ilk kısmında olmalıdır. 3. Bölgede yapılan ablasyon soğutma işlemi döküm parçanın mikroyapısını herhangi bir etkide bulunmaz [36].

3.4.2 Ablasyon Dökümde Mikroyapı

Literatür verileri, bir ablasyon dökümündeki tane boyutunun benzer bir kum kalıba dökümdekinden daha küçük olduğunu göstermektedir. Çoğu döküm alaşımı için sıvıdan çökelen ilk ana faz dendritik fazdır. Bir dendritik tane, altı birincil dendrit kolundan oluşur ve her bir birincil dendrit koluna bağlı bir dizi ikincil dendrit kolu bulunur. Her bir tanenin yönünü ortaya çıkarmak için benzersiz teknikler kullanılmadıkça, bir döküm alaşımında, özellikle alüminyum-silisyum alaşımında tane boyutunu ortaya çıkarmak oldukça zordur. İkincil dendrit kolları mikroskop altında gözlemlenebilmektedir [4], [5], [36].

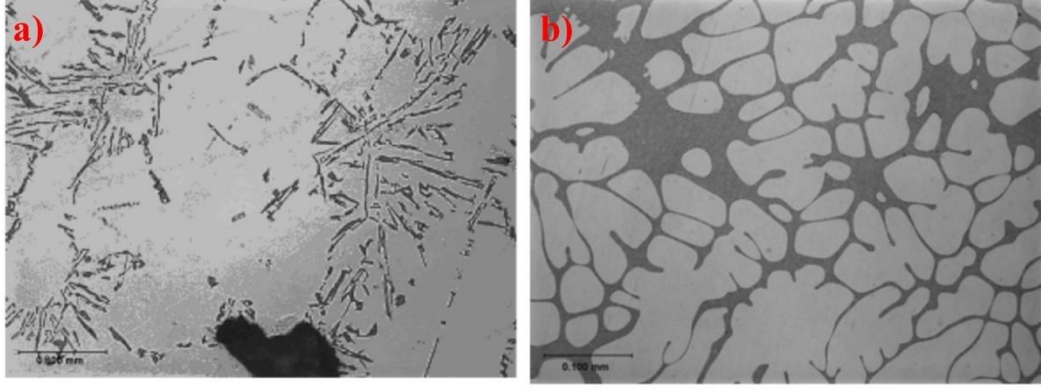
Tane boyutu, kum kalıbında oluşan veya çekirdeklenen tanelerin/dendritlerin sayısı ve bunların büyüme koşulları olarak tanımlanabilir. Su akışlarının belirli katı oranlarını içeren nispeten sert bir döküm kabuğuna uygulanması gerektiğinden, su jetlerinin kum kalıptaki tanelerin çekirdeklenmesini etkilemesi olası değildir. Bununla birlikte, ablasyon soğutması Şekil 3.6'da gösterilen Bölge 1'e düşerse, su jetleri soğutma işlemi kesinlikle dendritik tanelerin büyümesini etkiler. Bu koşullar altında dendritik cepheye dik olan dendritler büyür ve uzamış şekiller oluşturur. Aslında, suyla hızlı soğutma, dar katılaşma aralığına sahip bir alaşımda kolonsal tanelerin oluşumunu desteklemektedir [36].

Ablasyon soğutmasının başlangıç zamanı ötektik fazların oluşmaya başladığı Şekil 3.6'da gösterilen Bölge 2'ye denk geliyorsa, su jeti soğutmanın tane boyutu ve morfolojisi üzerinde çok az etkisi olmaktadır. Bu ötektik fazlar genellikle dendritlerin yüzeylerinde çekirdeklenir veya bunlar üzerinde büyür, birincil dendritik tanelerin daha fazla büyümesini engeller. Ablasyon soğutmasının başlangıç zamanı Bölge 3'e düşerse, su jeti soğutmanın birincil dendritik taneler üzerinde hiçbir etkisi olmamaktadır [36].

Birincil dendrit kol aralığını (DAS), farklı kolonsal tanelerin olduğu bölgeler olmadığı sürece bir dökümde tanımlamak zordur. Endüstriyel öneme sahip olan, çözünen elementlerin ayrılmasını, ötektik fazların boyutunu ve morfolojisini, kabarcıklar, oksitler ve intermetalik bileşenler dahil olmak üzere ikincil faz parçacıklarının nihai dağılımını etkileyen en önemli unsur ikincil dendrit kol aralığıdır (SDAS). Sonuç olarak, SDAS, bir

dökümde süneklik ve yorulma mukavemeti gibi birçok mekanik özelliğe etki eder [36], [41].

Ablasyon dökümünün benzersiz özelliklerinden biri, bir dökümde ötektik katılaşma aşamasında çok daha hızlı soğutma hızlarının elde edilebilmesi gerçeğinden dolayı, değiştirilmiş morfolojilere sahip son derece ince ötektik fazlara sahip dökümler elde etme kabiliyetidir. Kum kalıp boşluğuna dökülen erimiş alaşımın ilk soğutulması, birincil dendritlerin oluşumuna yol açar. Bölgesel katı oranı 0,15 – 0,25 aralığında olduğunda, döküm parçanın yüzeylerine yakın dendritler tutarlı bir noktaya ulaştığında, nispeten sert bir dendritik kabuk oluşur. Döküm parça daha sonra büzülerek kalıptan uzaklaşır. Bu sırada kalıplar hala sıcak olan döküm parça tarafından ısıtılır ve genleşir. Dökümün büzülmesi ve kalıpların genleşmesi olayları sonucunda döküm parça ile kalıp arasında hava boşluğu oluşur. Bu boşluk, döküm parçanın soğuma hızını yavaşlatan ve kaba bir ötektik yapının oluşumuna yol açan bir ısı bariyer görevi görür. Ablasyon döküm işleminde kullanılan su soğutucu, bağlayıcı malzemeyi çözer, kum kalıbın bozulmasına yol açar ve oluşan hava boşluğunu ortadan kaldırarak su soğutucunun katılaşmaya devam eden döküm parçayı direkt olarak soğutmasına izin verir. Böylece özellikle ötektik katılaşma aşamasında uygulanan ablasyon işlemi, döküm parçanın soğuma hızını önemli ölçüde artırır. Ötektik Si fazı içeren Al-Si alaşımları için, ötektik silisyumun morfolojisi plaka benzerinden lifli veya çubuk benzerine dönüştürülebilir. Bu değişime örnek Şekil 3.7’de verilmektedir. Çubuk benzeri ötektik silisyum içeren Al-Si alaşımları, levha benzeri silisyum ötektiği içerenlerden çok daha toktur. Ötektik silisyumun bu tip morfolojik modifikasyonu ya eser miktarda modifiye edici elementler kullanılarak ya da hızlı soğuma etkisi ile elde edilebilir [36], [42].



Şekil 3. 7 A356 alüminyum alaşımına ait mikroyapı a) ablasyon uygulanmamış b) ablasyon uygulanmış

Ablasyon dökümünün bir başka benzersiz özelliği, muhtemelen peltemsi (yarı-katı) evre bölgesindeki artan sıcaklık gradyanı veya dökümün uzak ucundan besleyiciye doğru artan aşamalı katılaşma nedeniyle düşük gözenekliliğe sahip dökümler elde etme kabiliyetidir [4]. Alüminyum dökümlerde, kalıp doldurma sırasında hava sıkışması, yağlayıcılar ve kaplamalar dahil kalıplama malzemelerinin gaz çıkışından erimiş metale üflenen gazlar, çözünmüş gazlar nedeniyle çöken kabarcıklar veya yetersiz besleme nedeniyle büzülme ve gözeneklilik oluşabilir. Bir alaşımın katılaşması sırasında oluşan gözeneklilik büzülme gözenekliliği ve gaz gözenekliliği olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir. İlki, dökümün katılaşma büzülmesi yeterli beslenemediğinde meydana gelir ve ikincisi, çözünmüş bir gazın içeriği, katılaşan metal içindeki çözünürlüklerinden daha yüksek olduğunda meydana gelir. Bu iki tip boşluk tipinin oluşumunun ablasyon döküm işleminden olumlu yönde etkilenmesi beklenmektedir. Çoğu zaman, gaz gözenekliliği ötektik cepheye yakın peltemsi bölgede çekirdeklenir. İyi kontrol edilen kademeli soğutma işlemi, büzülme gözenekliliğini ortadan kaldırmak için çok uygun bir yöntemdir. Bir dökümde gaz gözenekliliğini azaltmak için genellikle gazdan arındırma gerekir. Alüminyum dökümler yapmak için ablasyon döküm işlemi kullanılarak gaz giderme işleminin gerekliliği ortadan kaldırılabilir. Uygulanan işlem, peltemsi bölgedeki oluşacak hava kabarcıklarını başarılı bir şekilde gidermektedir [36].

3.5 Kaybolan Köpük Döküm Yöntemi (KKD)

Bağlayıcısız kum kalıpla kalıplama teknikleri başlığı altında listelenen yöntemlerden biri olan KKD yöntemi 20. yüzyılın ortalarında geliştirilmiştir. İlgili metot dolu kalıba döküm, uçucu modelle döküm, kalıp boşluksuz döküm, uçucu köpükle döküm olarak da adlandırılmaktadır. Yöntem prensipte bağlayıcısız kum içerisinde bulunan ve daha öncesinde refrakter bir boya ile kaplanmış, istenen biçimdeki polimerik köpük model materyalinin döküm sırasında sıvı metalin sahip olduğu ısı tarafından bozunmasının ardından, refrakter ile çevrelenen metalin katılaşmayı takiben model materyalinin şeklini almasına dayanmaktadır [43].

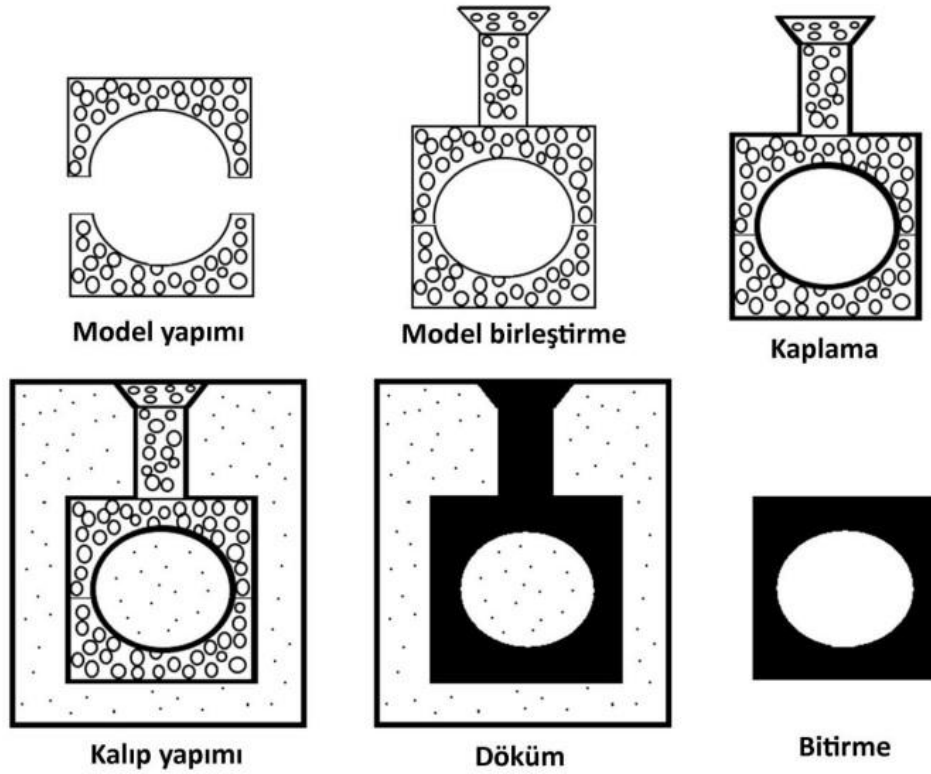
KKD yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- İşlem kolaylığı
- Maça gerektirmemesi
- Kumun tekrarlı olarak kullanılabilmesi
- Azaltılmış işçilik gereksinimleri ve bitirme işlemleri
- Karmaşık şekilli parçaların dökümüne uygun olması

KKD yöntemi ilk olarak 1958 yılında H. F. Shroyer tarafından geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. Polistiren model malzeme, KKD işleminin ilk uygulamalarında kalıplama malzemesi olarak yaş kum kullanılarak refrakter boya olmadan kalıplanmaktaydı [44].

1964 yılında T.R. Smith, KDD işlemlerinde bağlanmamış kum kullanımının patentini alarak bu endüstride devrim yaratmıştır. Günümüz uygulamalarında da bu yöntem sıklıkla tercih edilmektedir. 1981 yılında T. R. Smith tarafından alınan patentin süresinin dolması ile yöntemin otomotiv endüstrisinde kullanımındaki artış dikkat çekici olmuştur. 1990'lı yılların başında Almanya ve ABD başta olmak üzere birçok otomotiv firmasında üretim hatları kurulmuştur.

KKD yönteminin ürün dağılımı zamanla otomotiv endüstrisinden başlayarak daha geniş bir alana yayılmıştır. Yöntem zamanla altyapı sistemlerinde ve denizcilik sektöründe pompa gövdelerinin üretiminde yerleşmiş ve 2000'li yılların başından itibaren demir esaslı alaşımlar ve magnezyum alaşımlarının dökümünde kullanılmaya başlanmıştır [45]. KKD yönteminin temel süreç aşamaları şematik olarak Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 8 Kaybolan köpük döküm yönteminin işlem basamakları

3.5.1 Köpük Üretimi (Ön Şişirme)

Polistiren, model üretiminde en yaygın kullanılan ve en ucuz polimerdir. Genleştirilecek polistirenin moleküler ağırlığı 200 kg/mol'dür ve şişirme maddesi olarak yaklaşık %5 pentan ile ilave edilir. Genleşebilen polistirenin ham haldeki yoğunluğu 640 kg/m^3 iken, köpük model üretimine uygun olması için bu değerin $16\text{-}27 \text{ kg/m}^3$ 'e düşürülmesi gerekmektedir. İşlemin ön genleşme adımı buhar yardımıyla ısıtılan ve karıştırılan bir haznede gerçekleşmektedir. Bu işlem aşamasında polimerik taneler yumuşar, gaz halindeki girdiler genişler ve köpük tanelerinin büyümesiyle genleştirilmiş polistiren (EPS) üretilmiş olur. Bu işlemin bir sonucu olarak, tane çapı artar ve bu da yoğunluğun azalmasına yol açar. Genleştirilmiş taneler, ön şişirme aşamasını takiben 6-12 saat soğumaya bırakılır ve stabilize olması beklenir. Köpük model yoğunluğu, ön şişirme sonucu elde edilen köpüklerin yoğunluğuna bağlıdır. EPS'ye ek olarak, kalıp yapımında genleştirilmiş polimetil metakrilat (EPMMA) da kullanılır. EPMMA özellikle demir çelik sektöründe tercih edilen bir malzemedir. Demir- çelik dökümlerinde karbondan gelen kusurları azaltır. Ancak malzemenin maliyetinin fazla olması en önemli

dezavantajlarından biridir. Bu sebepten dolayı demir esaslılarda EPS ve EPMMA birlikte daha yaygın olarak kullanılmaktadır [46].

3.5.2 Model Yapımı

KKD yönteminde model yapımı işlemi, kalıpta üfleme ve blok köpükten işleme olmak üzere iki farklı yolla uygulanır.

Ön şişirmeyi takiben soğuyan ve stabilize olan köpük, model kalıplama işlemi için presin hammadde haznesine şarj edilir. Model yapım süreci doldurma, kaynaştırma, soğutma ve ürün çıkarma işlemleri olarak 4 ana basamakta gerçekleşir. Köpük modeller veya model parçaları, model kalıplarında son üfleme işlemi ile şekillendirilir. Kaynaştırma işlemi için kalıp içinden buhar geçirilir. Kalıplarda buhar transferi için delikler ve kanallar yer almaktadır. Buhar, genleşme sürecini tekrar tetikler ve malzeme yumuşar. Genleşen malzeme hava boşluklarını doldurur, serbest taneler birleşerek modeli oluşturur. Soğutma işlemi kalıbın dışından püskürtülen su yardımıyla gerçekleşir. Soğutma işlemi tamamlanmadan kalıp bozulursa, köpük tanelerinde bulunan iç basınç, genleşmenin durmasını engeller ve genleşme devam eder. Bu nedenle, soğutma aşaması ayrıca bir boyut belirleme işlevine de sahiptir. Kalıp soğumasını takiben kalıp açılır ve model, ejektör pimler yardımıyla kalıptan dışarı itilir. Tüm bu işlemler için gerekli süre yaklaşık 1-2 dakikadır. Çıkarma adımından sonra kalıptan çıkan modelin boyutları zamanla değişir. İlk olarak, model boyutunda bir artış gözlemlenir, ancak bu artışı bir büzülme takip eder. Model boyutundaki bu değişimler, pentan gazının difüzyonunun bir sonucudur. Kalıp boyutunun stabilizasyonunu hızlandırmak için yaşlandırma işlemi genellikle 65 °C'de 4 saat süre ile gerçekleştirilir ve söz konusu yaşlandırma işlemi ayrıca döküm hatalarına neden olabilecek kalıntı nemi de ortadan kaldırır[46] .

Diğer bir yöntemde ise blok halinde kalplara üflenmiş köpük malzeme kullanılır. Bu yöntem büyük boyutta parçalar daha çok tercih edilen bir yöntemdir. Bu parçaların modelleri ve modeli oluşturan parçaları kalıpta üflenemeyecek kadar büyük boyuttadır. Bununla birlikte, büyük parçaların üretim hacmi genellikle düşüktür ve kalıpları bloklardan işlemek daha ekonomiktir. Bu yöntem kalıp prototipleme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Model işleme, CNC tezgahlarında veya sıcak tel kesicilerde gerçekleştirilir. Şişirilmiş köpük bloklar yerine, kalıptan çekilmiş köpük bloklar da kalıp üretmek için işlenebilir [46].

Modelin özellikleri döküm kalitesini önemli ölçüde etkileyebilir. Dökümlerde ortaya çıkan kusurların çok büyük bir yüzdesi, model yoğunluğundaki heterojenlik ile ilişkilendirilir. Ergiyik, köpük modelin yerini alırken eşit ve homojen bir şekilde ilerleme yerine, metal modeldeki daha düşük yoğunluklu alanlara doğru akma eğilimindedir. Bu, çeşitli erimiş metal akışlarının etkileşime girmesine neden olarak, döküm parçada kıvrımlara (katlanmalara) ve köpük artıklarına neden olur. Ek olarak, modelin bazı bölgelerinde köpük partiküllerinin gevşek bir şekilde sıkıştırılması, modelin o kısmında metalin çok daha hızlı hareket etmesine yol açacaktır. Model yapımında, modeldeki köpük yoğunluğu varyasyonunun ve köpük tanelerinin sıkıştırılma derecelerinin en önemli iki faktör olduğu genel olarak kabul edilmiştir [46], [47].

3.5.3 Model Birleştirme

KKD yönteminde model birleştirme işlemi için genellikle mum veya silikon esaslı yapıştırıcı malzemelere kullanılır. Endüstride genellikle sıcak sıvı yapıştırıcı malzemeler kullanılır. Yapıştırıcı sıcaklığı ve kimyasal bileşimi model malzemeye zarar vermeden köpük modelin şeklini ve boyutsal bütünlüğünü korumalıdır. Döküm hatalarını önlemek amacıyla, seçilen yapıştırıcının buharlaşma hızı ve kül miktarı model malzemesinin özelliklerine benzer olmalıdır. Kullanılan yapıştırıcı kaplama, nakliye ve kalıplama aşamalarında kırılmamalı veya ayrılmamalıdır. Birleştirme işlemleri manuel olarak yapılmasının yanında otomatik ve yarı otomatik sistemler de kullanılmaktadır. Bu sistemlerde sıcak yapıştırıcıyı yüzeye hızlı ve hassas bir şekilde uygulayan özel yapıştırıcı baskı makineleri kullanılmaktadır [46].

3.5.4 Model Kaplama

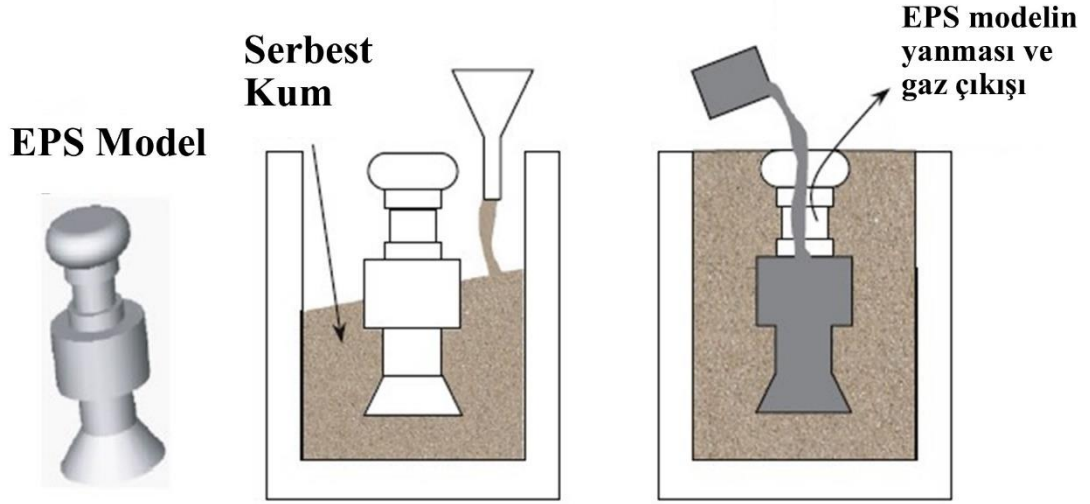
Bazı dökümleri kaplamasız yapmak mümkün olsa bile, KKD yönteminde refrakter kaplama temel bir gerekliliktir. Bu refrakter kaplama malzemesinin iki önemli görevi bulunmaktadır. Birinci görevi, pürüzsüz model yüzeyi ile kaba kum arasında bir bariyer görevi görerek döküm sırasında kalıbın çökmesini engellemek ve kalıbın boyutsal kararlılığı koruyarak yüzey kalitesini korumaktır. İkinci işlev ise, köpük modelinin buharlaşmasıyla oluşan gaz ürünlerinin kaplama vasıtasıyla kalıp kumuma tahliyesine izin vererek kontrollü bir geçirgenlik sağlamaktır. Kaplamanın gaz geçirgenliği, döküm işlemi sırasında sıvı metal-köpük ara yüzeyinden bozunma ürünü gazların ve havanın kaçma hızını belirler. Gaz geçirgenliği çok düşükse, sıvı metal-köpük ara yüzeyinde

yüksek geri basınç oluşur ve metal ilerleme hızı azalır, bu da eksik nüfusiye hatalarına neden olabilir. Yüksek gaz geçirgenliği değerlerinde ise, sıvı metal akışında türbülans oluşabilir ve sıvı halde bulunan polimerik ürünler metal içine hapsolarak piroliz kusurlarına neden olabilir. Kaplama malzemesinin ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi alaşımın katılma davranışlarını etkiler. Düşük geçirgenliğe sahip kaplama malzemeleri, emme manifoldları gibi yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip alüminyum döküm parçaların üretimi için tercih edilir. Demir bazlı dökümler genellikle demir içermeyenlere göre daha yüksek geçirgenliğe sahip kaplamalar gerektirir. Kaplama malzemesinde silika, mika, alümina, zirkon veya olivin gibi seramik katkıları bulunabilir. Düşük maliyetli silis kumu en çok kullanılan seramik katkı malzemesidir. Zirkon ve olivin bazlı kaplamalar maliyet açısından çok fazla tercih edilmemektedir. Kaplama malzemeleri için taşıyıcı solvent malzeme seçenekleri çok azdır, çünkü kullanılan taşıyıcı solventin köpük model malzemesi ile uyumlu olması gerekir. Hidrokarbon ve klor içeren taşıyıcı solventler, EPS gibi en yaygın kullanılan model malzemelerine karşı agresif olabilir. Bu durumdan dolayı kaplamaların çoğunluğu su bazlı olarak bulunabilmektedir. Köpük modele uygulanan refrakter kaplama işlemi daldırma, püskürtme, fırçalama veya akış kaplama yöntemleri kullanılarak yapılabilir. Genellikle küçük ve orta büyüklükteki parçalar için daldırma yöntemi tavsiye edilirken, büyük parçalar için diğer yöntemler kullanılabilir. Kurumuş boya tabakasının kalınlığı 0,2- 0,3 mm arasındadır. Kaplama işlemini takiben kurutma aşamasına geçilir. Kurutma aşaması, ortam koşullarında 24 saat süreyle veya bir fırında veya ısıtılmış bir odada daha kısa sürede gerçekleştirilebilir. Bu kurutma yöntemi 50-65 °C'de 2-6 saat süreyle gerçekleştirilir. Çok yüksek hacimli üretimde mikrodalga ısıtma da kullanım için uygundur [46], [47].

3.5.5 Kalıp Yapımı

KDD yönteminin en kritik özelliklerinden biri, kalıp yapımında serbest kum kullanılmasıdır. Ancak bazı durumlarda, büyük kalıpları desteklemek için kalıpta kısmen veya tamamen bağlayıcı kum kullanılabilir. KDD kalıplarında genellikle iri küresel silis kumu kullanılır. Bazı dökümhaneler, düşük termal genleşme özelliklerinden dolayı olivin veya sentetik mullit kumu kullanmayı tercih etmektedir. Buharlaşılan gazın hızla dağılması gerektiğinden, yüksek geçirgenlik için kaba kum gereklidir. Model yapımında kaplama kullanıldığı için iri kum yüzey kalitesini düşürmez. Demir esaslı dökümlerde genellikle üç

elek dağılımında 35 AFS boyutunda kum tercih edilir; Öte yandan demir dışı dökümlerde de yine üç elek dağılımında 45 AFS boyutunda kum tercih edilmektedir. Şekil 3.9’de örnek bir kalıp kesiti şematize edilmektedir.



Şekil 3. 9 KKD yönteminde örnek bir kalıp kesiti[48]

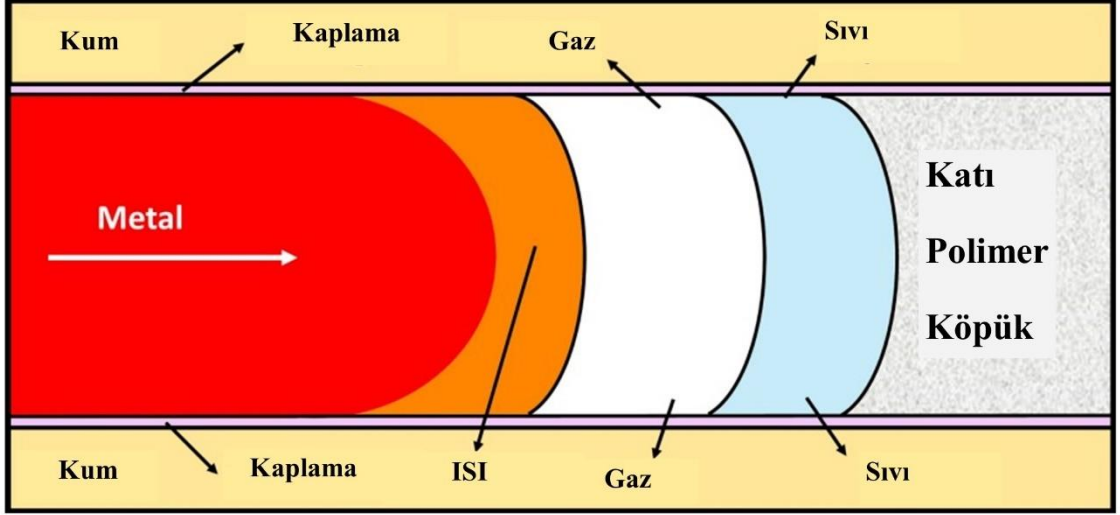
Kalıplama aşamasında genellikle tek parça çelik kutular kullanılmaktadır. Hazırlanan modeller, önceden belirli kalınlıkta (25-75mm) kum yatağı ile doldurulmuş bir kutuya yerleştirilir. Daha sonra serbest kum yağmurlama yöntemiyle kalıp kutusunu doldurur. Yağmurlama sistemi, kumun kutu içerisinde her bölgede aynı yükseklik ile doldurulmasını sağlar ve yığılmaları önleyerek hassas modelin zarar görmesini engeller. Kum doldurma işlemi sırasında veya sonrasında serbest kumu uygun bir şekilde sıkıştırmak için kalıba vibrasyon uygulanır. Uygulanan titreşimin genliği ve frekansı, gerekli sıkıştırmayı elde etmek için geniş bir aralıkta seçilebilir. Kalıbın iç ve dış boşluklarını doldurması için titreşim süresi iyi ayarlanmalıdır. Kum içerisinde biriken ince parçacıkların elenmesi kalıp kumunun geçirgenliğini korumasını sağlamaktadır. Bazı dökümhaneler kalıp kumuna termal ıslah işlemleri uygulamaktadır. Isı ile buharlaşan polimerik köpük atıkları kum içinde dağılarak döküm parçaya yakın bölgelerde yoğunlaşır. Bu kalıntılar kumun akışkanlığını, sıkıştırılabilirliğini ve geçirgenliğini olumsuz etkiler. Kalıp kumu, bu tür kalıntılardan termal ıslah işlemi ile arındırılabilir. Bir sonraki kullanımdan önce kumun yeterince soğumasını sağlamak, kalıplama işlemi için önemli bir unsurdur. Kutuya doldurulan kalıp kumunun sıcaklığı 50°C’nin üstündeyse polimerik köpük modelin zarar görmesi kaçınılmazdır [46].

3.5.6 Döküm ve Metal Akışı

KKD yönteminde kalıba sıvı metal doldurmanın diğer döküm yöntemlerinden bir farkı yoktur. Döküm, akışın devamlılığı sağlanarak, döküm havuzu ve döküm kanalının sürekli dolu kalacağı bir hızda yapılmalıdır. Bu sayede sıvı metal cephesinde metallostatik basınç sabit tutulur, gaz ve cürufun kalıba girmesi engellenir ve yolluğun çökmesi engellenir ve sıvı metal tüm kalıba ulaşabilir. KKD yönteminde döküm sıcaklığı oldukça önemlidir ve diğer döküm yöntemlerine göre daha sıkı kontrol edilmelidir. Alüminyum alaşımları, bakır alaşımları (pirinç ve bronz) ve gri dökme demir dökümler için önerilen döküm sıcaklık aralıkları sırasıyla 705-790 °C, 1040-1260 °C ve 1370-1455 °C'dir [46].

Esas olarak döküm işlem yerçekimi ile gerçekleştirilir, ancak bazı durumlarda vakum desteği de kullanılmaktadır. Vakum işlemi, bozunan zararlı ürünlerin giderilmesine ve bu atıkların yol açabileceği olası döküm kusurlarının önlenmesine yardımcı olur. Döküm ve katılaştırma aşamalarından sonra kalıp uç bölgesine aktarılır ve bağlayıcı kullanılmadığı için kutu basitçe ters çevrilerek döküm parça kumdan ayrılır [47], [49].

Bu yöntemde modelin kalıp içinde olması ve yerine sıvı metalin alması gerekliliği metal akışını diğer tüm döküm yöntemlerinden çok farklı kılmaktadır. Sıvı metal katı köpüklerle temas eder etmez ara yüzeyinde sıvı ve gaz halinde polimer bölgeleri oluşur. Ara yüzeyde oluşan gaz ve sıvı bölgelerin genişliği, doğrudan sıvı metalin sıcaklığına bağlıdır. Düşük döküm sıcaklıklarında (Al ve Mg alaşımlarının dökümü), arayüzeyde oluşan gaz ve sıvı bölgelere daha dardır. Yüksek döküm sıcaklıklarından ötürü demir esaslı malzemelerin dökümünde arayüzeyde oluşan bu bölge genişler. Bu yüzden KKD yöntemine uygulanan vakum desteği demir bazlı alaşımların dökümü için kritik bir önem taşımaktadır. Şekil 3.10'da KKD yönteminde sıvı metal hareketliliğinin şematik gösterimi verilmektedir [49].



Şekil 3. 10 KKD yönteminde sıvı metal hareketliliğinin şematik gösterimi

Sıvı metal cephenin önündeki kontrollü geri basınç sayesinde arayüzey düzgün bir akı ile ilerler, türbülans oluşumuna izin verilmez ve sıvı veya gaz halindeki zararlı atık ürünlerin kaplama yardımıyla döküm parçadan uzaklaşması için yeterli zaman sağlanır. Sıvı metal cephesi ilerledikçe, geride kalan noktada meydana gelen sıcaklık düşüşü, geriye doğru önemli bir sıcaklık gradyanı yaratır. Oluşan bu sıcaklık gradyanı, yönlü katılaşma oluşumuna yol açar. Bu yüzden, besleyici boyutları küçültülebilir veya bazı zamanlarda kullanılması gerekmeyebilir[46].

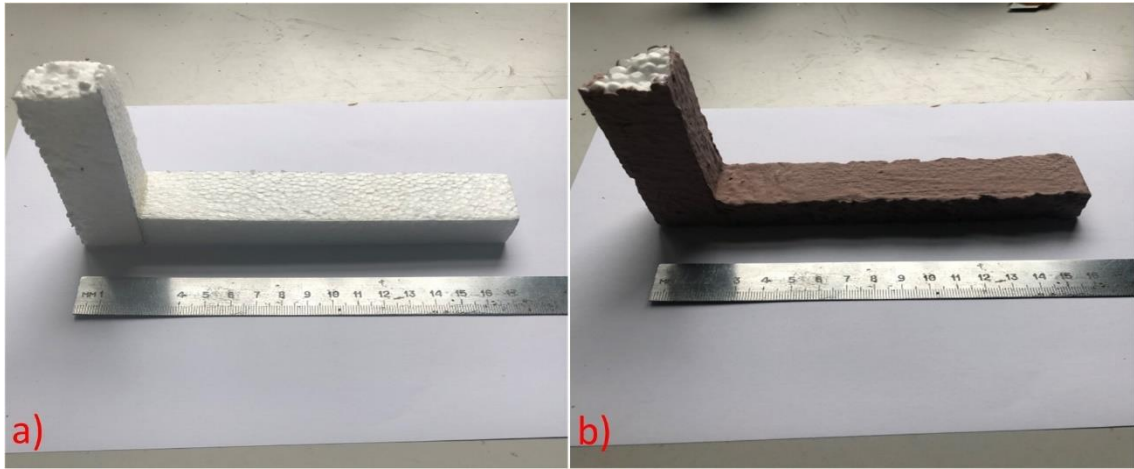
3.6 Direkt Su Soğutma İşleminin KKD Yöntemine Uygulanması

Direkt su soğutma (DSS) işleminin KKD yöntemiyle birlikte uygulanması yenilikçi ve orijinal bir çalışmadır. Bu uygulamanın bağlayıcı kalıp sistemlerinde uygulanan ablasyon dökümün avantajlarına ek olarak sağlayacağı önemli avantajlar bulunmaktadır. Bu ek avantajlar aslında KKD yönteminin doğasından gelen özelliklerin bir yansımasıdır. Öncelikle KKD yönteminde kalıp kumu serbesttir ve bağlayıcı içermemektedir [50]. Bu sayede su soğutma uygulandığı anda döküm parçasına hemen ulaşacak ve daha etkin ve hızlı bir soğutma sağlayacaktır. Maça kullanılmaması KKD yönteminin en önemli özelliklerinden biridir. Kalıp içinde maça bulunmaması, su soğutma uygulandığında döküm parçaların hem dış hem de iç yüzeylerden soğuyabilmesine olanak sağlayacaktır. Bağlayıcıya gereksinim olmaması, suda çözünebilir özel bağlayıcı temini veya geliştirilmesi ile dökümden sonra bağlayıcının sudan geri kazanımı veya bertaraf edilmesi sorunlarının tamamını ortadan kaldırmaktadır. KKD yöntemi geleneksel kum kalıba

döküme göre daha yüksek boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesi sağlamaktadır ve bir harcanabilen model yöntemi olduğu için daha karmaşık şekilli parçaların üretimine imkân tanımaktadır [51]. Ayrıca yüksek geçirgenliğe sahip bağlayıcısız kuma suyun nüfuz etmesi çok daha kolay olacağı için KKD yönteminde DSS işlemi çok daha basit bir şekilde uygulanabilmektedir.

4.1 Model Hazırlama

DSS işleminin KKD yöntemine uygulandığı bu çalışmada; döküm işlemleri genişletilmiş polistiren (EPS) köpük bloktan kesilen, yaklaşık 18 x 30 x 145 mm ölçülerinde dikdörtgen prizma modeller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesilen modeller, aynı köpük malzemeden elde edilen yaklaşık 25 x 30 x 95 mm ölçülerindeki yolluk parçaları ile organik bazlı yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir. Parça birleştirme işleminden sonra elde edilen tam modeller su bazlı ticari refrakter boya (ASK Chemicals CERAMCOTE FS 402) ile kaplanmıştır. İlk boya işleminden sonra modeller 24 saat kurumaya bırakılmış, ardından bir kat daha boyanmıştır. Birleştirilmiş ve refrakter ile kaplanmış model parçaların görüntüsü Şekil 4.1’de verilmektedir.

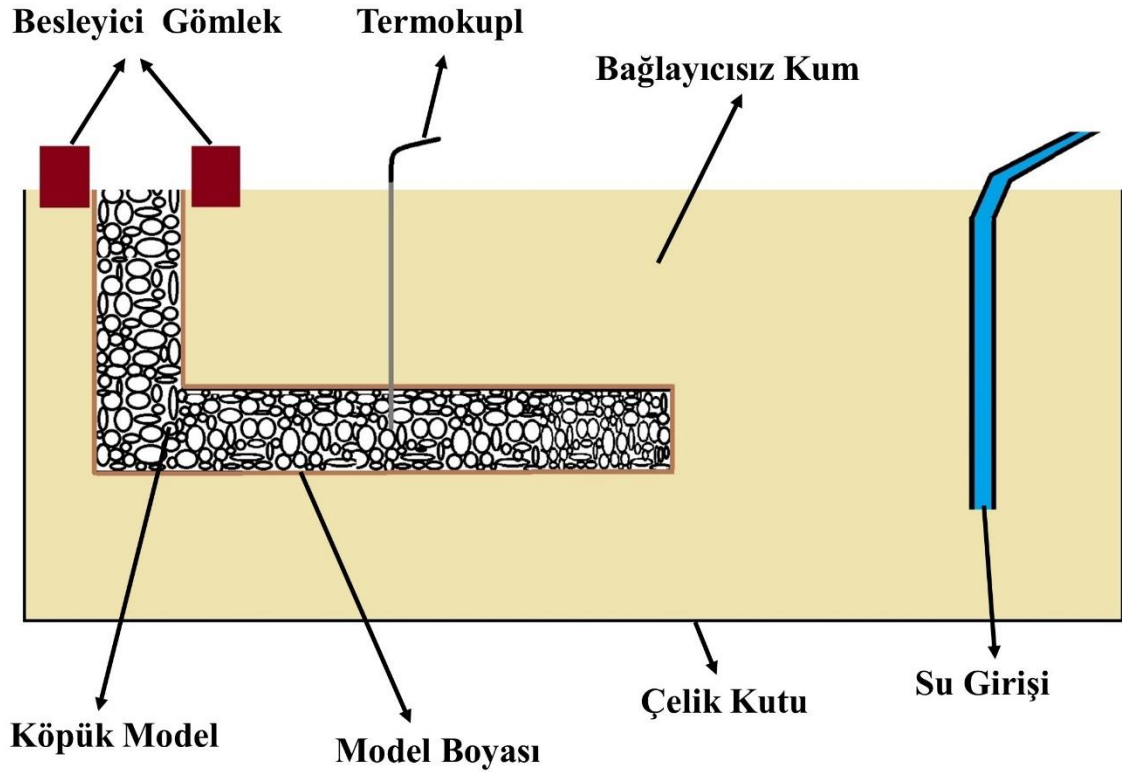


Şekil 4. 1 EPS köpük model a) Refrakter boya ile kaplanmadan önce b) Refrakter boya ile kaplandıktan sonra

4.2 Kalıp Hazırlama

Kalıp hazırlama işlemi 300 x 150 x 150 mm boyutlarındaki çelik kutularda 45 AFS bağlayıcısız silis kumu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çelik kutunun dibine serilen kuma DSS işlemi için hazırlanan su giriş sistemi, modelin uç noktasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Daha sonra model çelik kutunun içerisine yerleştirilip, kalıp kum ile

doldurulmuştur. Bu doldurma işlemi sırasında çelik kutuya 2 mm genlik ve 50 Hz frekansta titreşim (Octagon 200) uygulanıp kumun sıkıştırılması sağlanmıştır. Tüm kalıplama sisteminin görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4. 2 Kalıp kesitinin şematik gösterimi

4.3 Ergitme ve Döküm İşlemleri

Ergitme işlemleri kil/grafit potalarda A356 alüminyum döküm alaşımı kullanılarak elektrik dirençli Protherm marka fırında gerçekleştirilmiştir. Dökümlerde kullanılan A356 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 4.1’de verilmiştir. Ergitme işlemleri sırasında herhangi bir tane inceltme, modifikasyon veya gaz giderme işlemi yapılmamıştır. Dökümler 710 ve 750 °C olmak üzere 2 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Tüm döküm işlemleri için parçanın boyutu ve olası kayıplar göze alınarak yaklaşık 500 g alaşım kullanılmıştır.

Tablo 4. 1 A356 alaşımlarının kimyasal bileşimi

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti	Pb	Al
A356	7.288	0.144	0.011	0.028	0.354	0.008	0.003	0.0031	0.123	0.0117	Bal.

4.4 Döküm Sonrası İşlemler

Dökümlerden sonra kum kalıp içerisinde bulunan parçaya 225 ve 450 ml/s olmak üzere iki farklı su debisi ile direkt su soğutma işlemi uygulanmıştır. Direkt su soğutma işlemi kalıp dolumundan 60, 90, 120, 150 ve 180 s sonra uygulanmış ve her parametre için 20 s devam ettirilmiştir. Bunlara ek olarak; tüm parametreler için, K-tipi termokupl ve veri toplayıcı yardımıyla ısı analiz işlemi gerçekleştirilip soğuma eğrileri elde edilmiştir. Isıl analiz düzeneği Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Test edilen deneysel parametreler Tablo 4.2'de paylaşılmıştır.

Tablo 4. 2 Temel deneysel parametreler

Döküm Sıcaklığı (°C)	710°C		750°C	
DSS işleminin Debisi (ml/s)	225 ml/s (Düşük Debi)	450 ml/s (Yüksek Debi)	225 ml/s (Düşük Debi)	450 ml/s (Yüksek Debi)
DSS işlemi uygulanamadan önce beklenen süre (s)	60s	60s	60s	60s
	90s	90s	90s	90s
	120s	120s	120s	120s
	150s	150s	150s	150s
	180s	180s	180s	180s



Şekil 4. 3 Döküm sistemine entegre ısı analiz sistemi

4.4.1 Numune Hazırlama ve Mikroyapı İncelemeleri

Dökümler başarılı bir şekilde tamamlandıktan sonra, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, her döküm parçanın besleyiciye uzak olan uç kısmından metalografik işlemler için numune kesilmiştir.

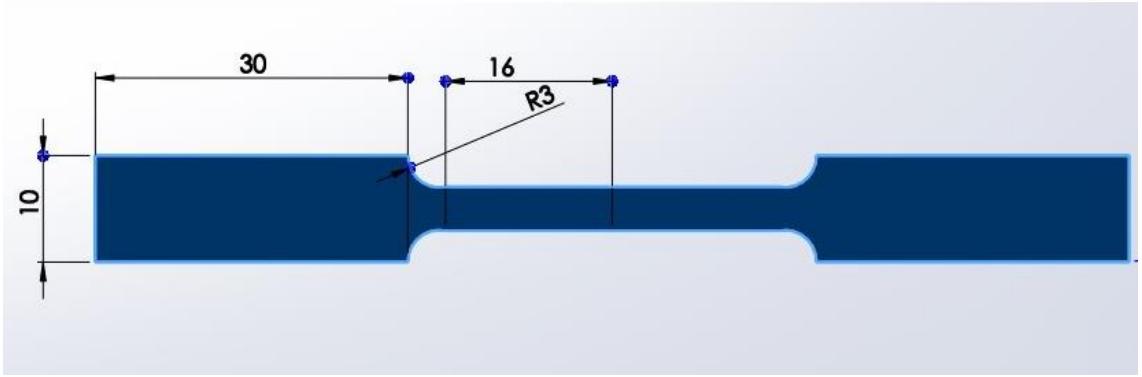


Şekil 4. 4 Numune inceleme için kesilen bölge

Döküm parçaların ucundan alınan numuneler, geleneksel metalografik numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1.000, 1.200 ve 2.000 grit SiC partiküllü aşındırıcı zımparalar kullanılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra her bir numune 1 μm 'lik elmas süspansiyon yardımıyla parlatma çuhası üzerinde parlatılmıştır. Parlatılmış numuneler %0,5 HF çözeltisi vasıtasıyla dağlanmıştır. Tüm mikroyapı görüntüleri Nikon Eclipse MA100 optik mikroskobu ile alınmıştır. Alınan mikroyapı görüntüleri üzerinde ortalama SDAS değeri analizleri her bir numune için 30 farklı ölçüm yardımıyla hesaplanmıştır. Ayrıca seçili numunelerden taramalı elektron mikroskobu (SEM, Hitachi SU3500) yardımıyla görüntü alınıp EDS analizleri yapılmıştır. Bunlara ek olarak seçili numunelere XRD (Xpert Pro) analizi yapılmıştır.

4.4.2 Mekanik Deneyler

Numunelerin sertlik değerleri 2,5 mm bilye çapı ve 62,5 kg yük ile Brinell sertlik cihazı ile ölçülmüş ve altı farklı ölçümün ortalaması rapor edilmiştir. Elde edilen döküm parçalardan mikroyapı ve sertlik için örnek alındıktan sonra kalan parça, çekme testleri için Şekil 4.5'te verilen ölçü ve standartlara uygun olarak işlettirilmiş ve çekme testleri Mohr & Federhaff çekme cihazı ile yapılmıştır. Tüm sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 4. 5 Çekme testi numunelerinin ölçeklendirilmiş iki boyutlu görüntüsü

4.5 Ana Parametreler Dışında Yapılan Deneysel Çalışmalar

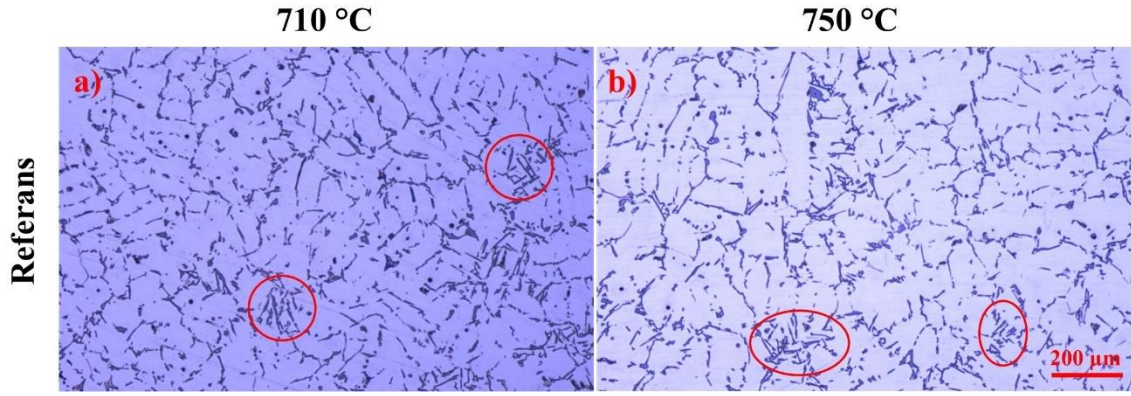
Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında dört adet döküm işlemi daha yapılmıştır. Bu dökümlerin parametreleri ise şu şekilde belirlenmiştir: 680°C-60s, 710°C-

60s, 710°C-90s ve 750°C-90s. Belirtilen bu parametrelerde dökülen ve DSS işlemi uygulanan numunelere 165°C'de 8 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

Ana parametrelere ek olarak yapılan deneyler arasında döküm sıcaklığının DSS işleminde mikroyapı ve sertlik üzerine etkisinin araştırılması yer almaktadır. Dökümler 710°, 720°C, 730°C ve 750°C'de yapılmış olup her bir sıcaklık için yüksek debili DSS işlemi kalıp dolumundan 60s sonra başlatılmıştır. Dökümler sonucunda elde edilen parçalardan alınan numunelere SDAS ölçümü ve sertlik hesaplamaları yapılmıştır.

5.1 Mikroyapı İncelemeleri

Deneysel çalışmaların ilk bölümü olan döküm işlemleri sonucunda elde edilen parçalardan alınan örnekler ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. İlk olarak dökülen referans numunelere herhangi bir DSS işlemi uygulanmadan kalıp içerisinde soğumaları sağlanmıştır. Şekil 5.1’de referans dökümlerin besleyiciden uzak ucundan alınan numunelere ait mikroyapılar verilmiştir.



Şekil 5. 1 Kaybolan köpük döküm referans numunesinin mikroyapı görüntüleri

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi referans numunelerinin mikroyapısı tipik modifiye edilmemiş ötektik altı Al-Si döküm alaşımlarının yapısını yansıtmaktadır. Mikroyapılarda α -Al kristalleri açık renkli bölgeler olarak görülmekteyken, ötektik Si partikülleri ise şekilde gösterildiği üzere iğnesel morfolojide karşımıza çıkmaktadır. İki mikroyapı arasındaki yegane fark, tatbik edilen üst ısıya bağlı olarak yüksek sıcaklıkta gerçekleşen dökümde daha kaba bir tane yapısı gözlenmektedir. Gerçekleştirilen ölçümlerde ortalama SDAS değeri 710 °C referans numunesinde 64 μm olarak ölçülmüşken bu değer 750 °C referans numunesinde 81 μm olarak belirlenmiştir.

710 °C ve 750 °C’de DSS işlemine tabi tutulmamış referans numunelerine ait SDAS, sertlik, çekme dayanımı ve yüzde uzama değerleri Tablo 5.1’de verilmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, daha sonrasında DSS işlemine tabi tutulmuş numunelerden elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

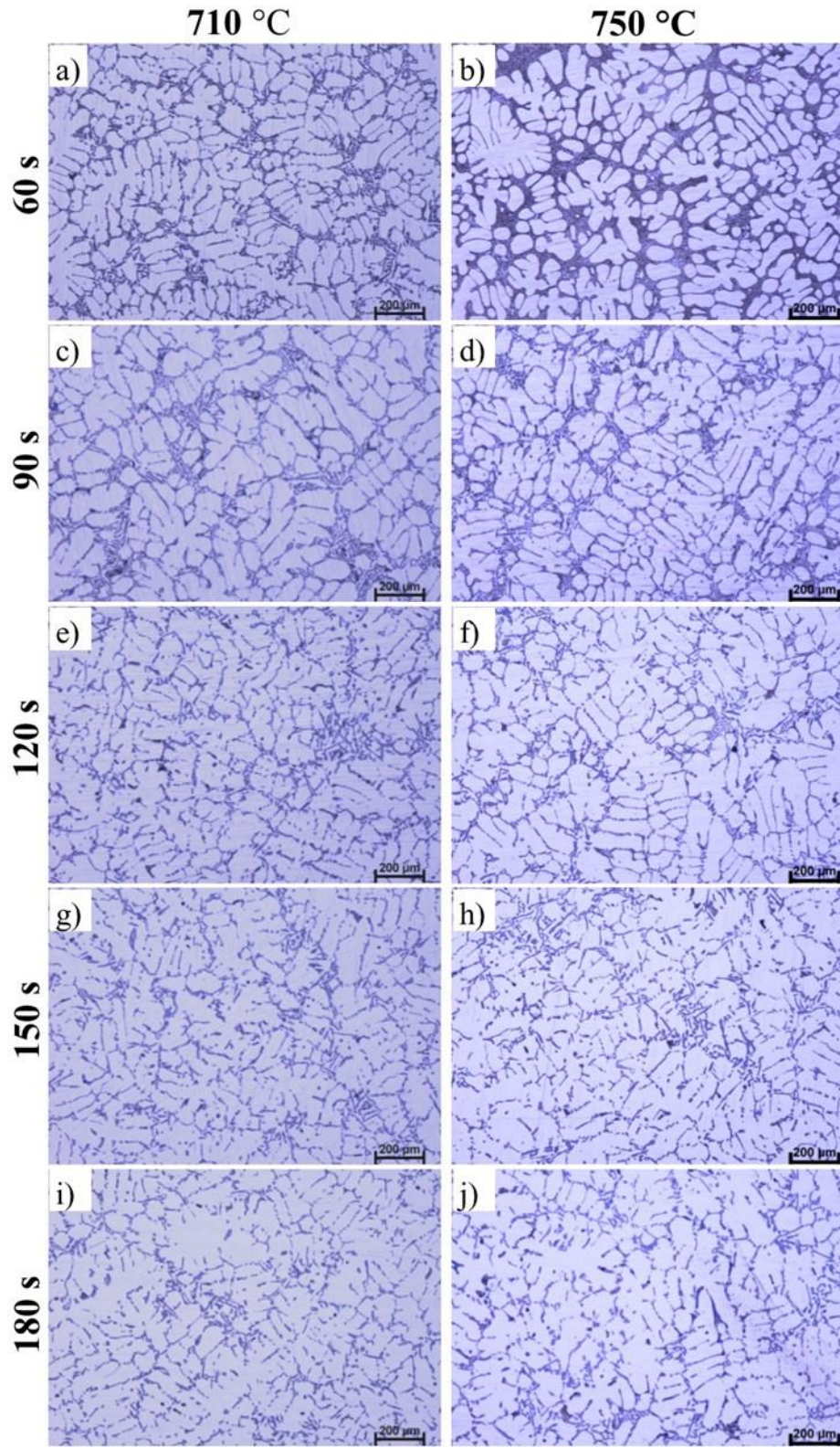
Tablo 5. 1 Referans numunelerinin SDAS, sertlik, çekme dayanımı ve yüzde uzama değerleri

SDAS (μm)		Sertlik (HB)		Çekme Dayanımı (MPa)		% Uzama	
710°C	750°C	710°C	750°C	710°C	750°C	710°C	750°C
64±2,14	81±1,64	53±1,30	51±3,00	138±8,00	119±12,00	2,47±1,32	2,17±0,84

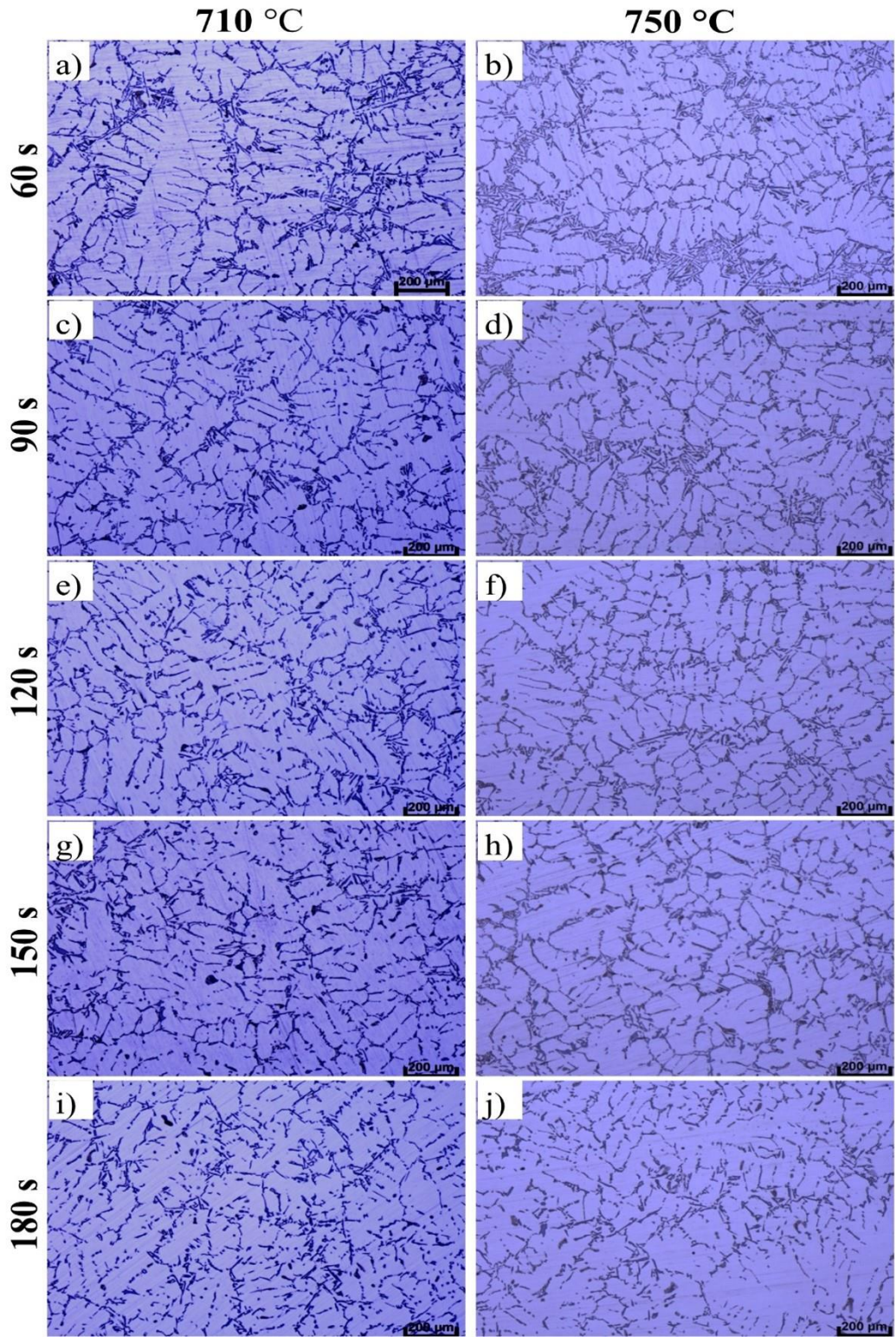
Daha önce de bahsedildiği gibi, KKD yönteminde ortaya çıkan kaba ikincil faz ve tane morfolojisi problemlerine olan etkilerini incelemek için farklı parametrelerde gerçekleştirilen DSS işleminin ardından elde edilen mikroyapılar Şekil 5.2 ve 5.3'te verilmiştir. Yüksek debiyle ve farklı bekleme süreleri ile DSS işlemi uygulanan 710 ve 750 °C dökümlerine ait mikroyapı görüntüleri Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Düşük debiyle DSS işlemi uygulanan döküm numunelerinin mikroyapıları ise Şekil 5.3'te verilmektedir.

Döküm numunelerinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde 750 °C'de dökülen ve 60 s sonra DSS işlemine tabi tutulan numunede ötektik yapının ortaya çıkan hızlı soğuma etkisi sayesinde tamamen modifiye olduğu görülmektedir. Tablo 4.3'te numunelere ait ötektik Si partikülleri arasındaki ortalama mesafeler verilmiş olup, ortaya çıkan bu modifikasyonun sonucu olarak referans numunede 14,73 μm olarak ölçülen bu değer 60 s numunesinde 1,49 μm 'ye düştüğü görülmektedir.

Bu dönüşüm haricinde, mikroyapılara genel olarak bakıldığında, tane morfolojisinin DSS işlemi ile farklılaşan parametrelere bağlı olarak farklı seviyelerde incelendiği gözlenmektedir. Hem ötektik hem de tane boyutunda gerçekleşen değişimler ilerleyen kısımda kantitatif olarak incelenmiştir.



Şekil 5. 2 Yüksek debiyle direkt su soğutma işlemine tabi tutulan 710 ve 750°C dökümlerin mikroyapı görüntüleri

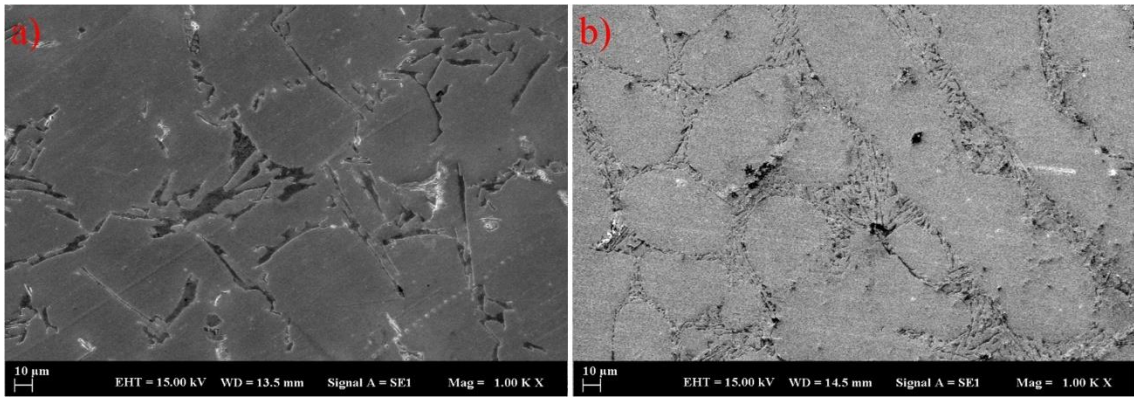


Şekil 5. 3 Düşük debiyle DSS işlemine tabi tutulan 710 ve 750°C dökümlerin mikroyapı görüntüleri

Mikroyapılar incelendiğinde gözlenmektedir ki; 750 °C 60 s numunesinde gerçekleşen ötektik modifikasyon diğer parametrelere ait numunelerde belirgin bir şekilde ortaya çıkmamıştır. Ancak 750 °C DSS numunelerine ait mikroyapılarda oluşan ötektik bileşenin kısmen daha ince olduğu gözlenmektedir. Ayrıca her iki sıcaklıkta da artan bekleme süresine bağlı olarak SDAS değerlerinin genişlediği görülmektedir.

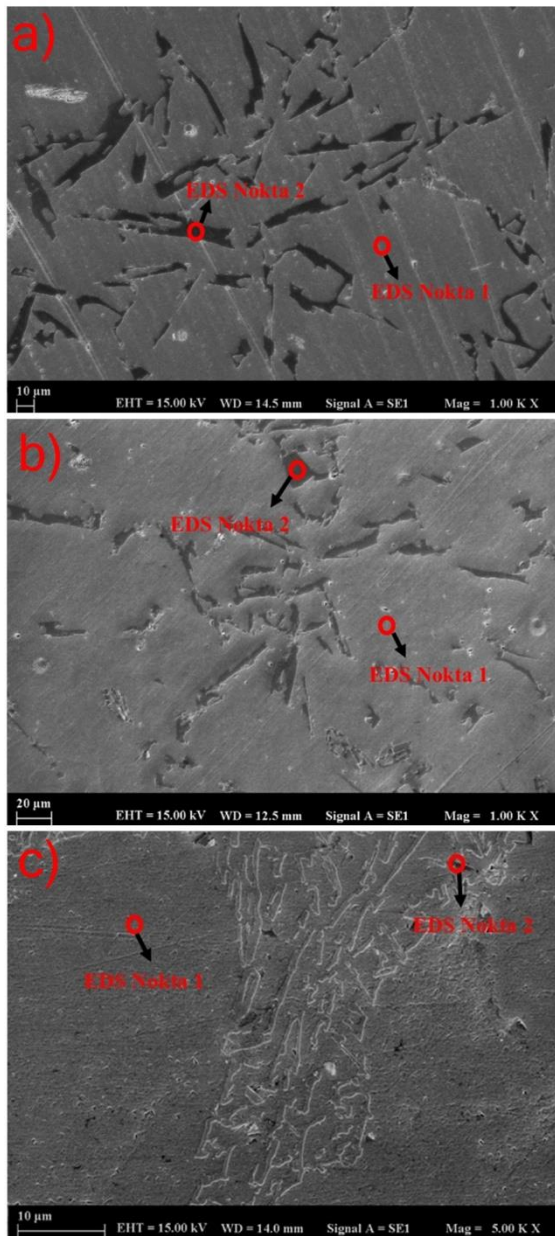
Düşük debi ile gerçekleştirilen DSS işleminde ise tane boyutu ve ötektik bileşenin dağılımında benzer iyileşmeler gözlenmiştir. Bu durum düşük debi ile gerçekleştirilen DSS uygulamasında da etkin soğumanın gerçekleştiğini göstermektedir.

Şekil 5.4'te 60 saniye sonra yüksek debi ile DSS işlemine tabi tutulan 710 ve 750 °C döküm numunelere ait SEM görüntüleri verilmektedir. Şekil 5.4'te verilen bu iki parametre arasında ötektik modifikasyon açısından çok belirgin bir fark olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 4 SEM görüntüleri a) 710 °C 60 s YD b) 750 °C 60s YD

Şekil 5.5'te verilen EDS nokta analiz sonuçlarında görüldüğü gibi numunelerde herhangi bir kimyasal değişim görülememekle beraber yalnızca morfolojik bir değişim olduğu göze çarpmaktadır. DSS işleminin mikroyapısal bileşenlerde herhangi bir kimyasal değişime neden olmadığı EDS sonuçları ile gösterilmiştir. Şekil 5.5'te verilen tüm görsellerde 1 numaralı EDS noktaları α -Al bölgelerinden, 2 numaralı EDS noktaları ise ötektik Si içeren bölgelerden alınmıştır. Şekil 5.5 (c)'de ötektik silisyumun oldukça incilmesi sonucu EDS analizinde 2 numaralı noktaya ait kompozisyonda yoğun miktarda alüminyum da görülmektedir.



EDS Nokta 1

Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %
AlK	98.7	98.7	1.6
SiK	1.3	1.3	14.3

EDS Nokta 2

Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %
AlK	2.2	2.3	5.2
SiK	97.8	97.7	1.8

EDS Nokta 1

Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %
AlK	100.0	100.0	3.2

EDS Nokta 2

Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %
AlK	3.3	3.4	12.4
SiK	96.7	96.6	2.7

EDS Nokta 1

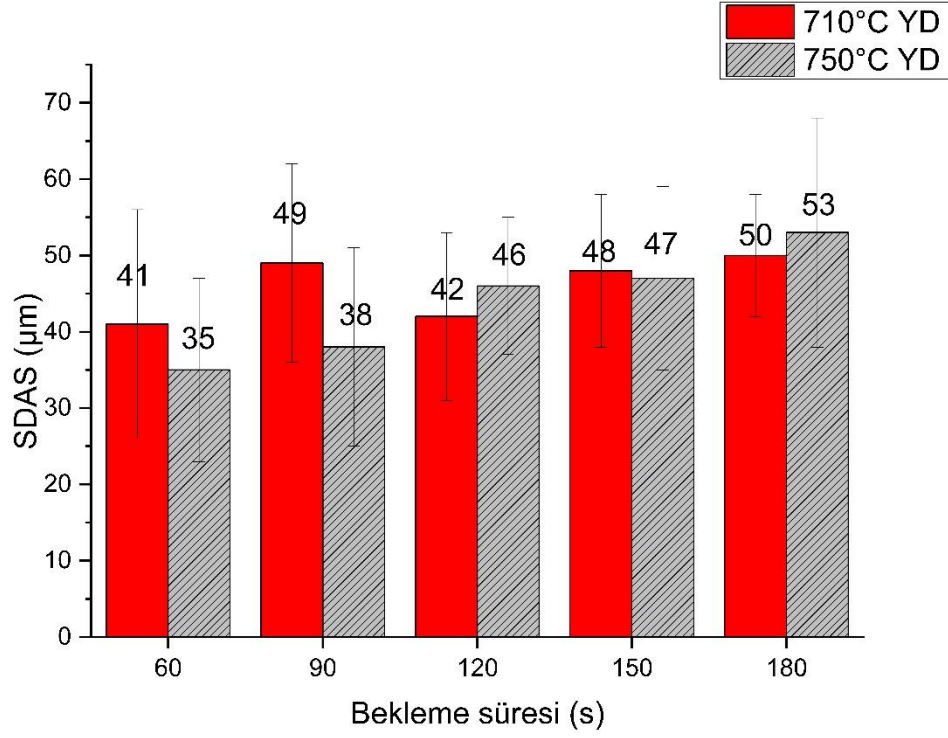
Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %
AlK	98.5	98.5	1.6
SiK	1.5	1.5	15.2

EDS Nokta 2

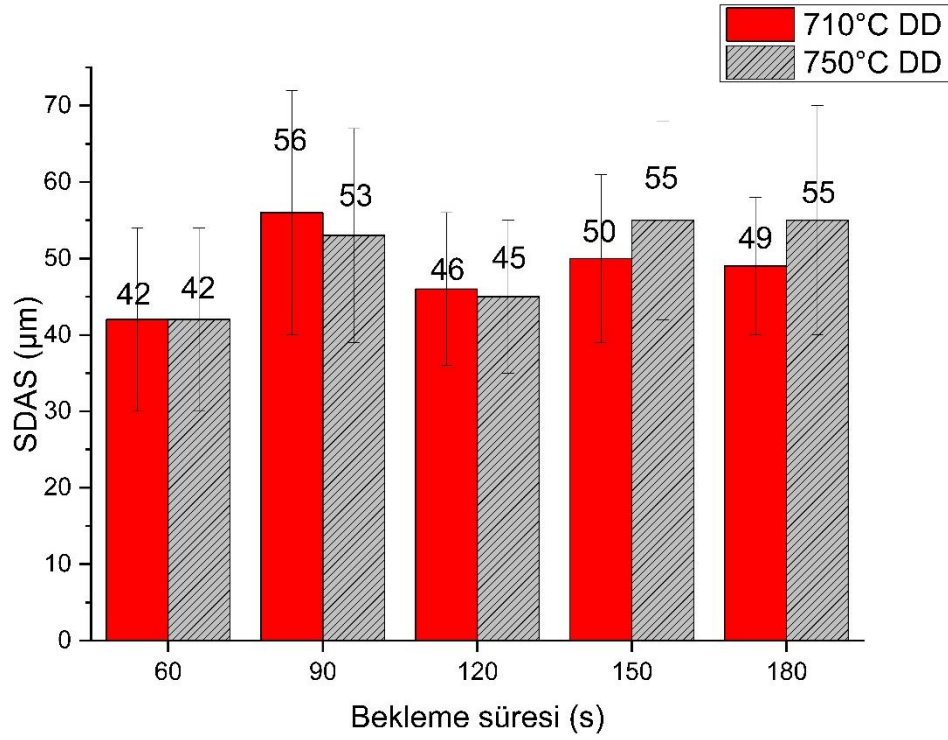
Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %
AlK	67.0	67.8	1.8
SiK	33.0	32.2	5.8

Şekil 5. 5 EDS analizi sonuçları a) 710°C referans b) 750°C referans c) 750°C 60

Şekil 5.6 ve 5.7’de yüksek ve düşük debiyle DSS işlemi uygulanmış numunelerden ölçülmüş SDAS değerleri verilmektedir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de de görüldüğü üzere ortalama SDAS aralığının artan bekleme süresine bağlı olarak yaklaşık 40 μm ’den 50 μm ’ye genişlediği tespit edilmiştir.



Şekil 5. 6 Yüksek debiyle (YD) DSS işlemi uygulanmış numunelerin ortalama SDAS değerleri



Şekil 5. 7 Düşük debiyle (DD) DSS işlemi uygulanmış numunelerin ortalama SDAS değerleri

Yüksek debiyle DSS işlemi uygulanmış numunelerin SDAS değerleri ile referans numunelerinin SDAS değerleri karşılaştırıldığında, 710 ve 750 °C sıcaklıklarında sırasıyla 64 ve 81 µm olarak ölçülmüş olan SDAS değerleri yüksek debili DSS işlemi ile 60 s bekleme süresinde iki sıcaklık için ortalama 41 ve 35 µm değerlerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Düşük debili DSS işleminde ise her iki döküm sıcaklığı için ortalama SDAS değerleri en düşük 42 µm olarak ölçülmüştür. SDAS değerleri incelendiğinde en büyük düşüş yaklaşık %57'lik fark ile 750 °C'de 60s bekleme süresi ile DSS işlemi uygulanan numunede gözlemlenmiştir. Bu düşüşün başlıca sebebi, 750 °C 60 s numunesinde DSS işlemi, α -Al tanelerinin katılaşması devam ederken uygulandığı için ikincil dendrit kollarının büyümesini durdurmasıdır. Elde edilen tüm SDAS ölçümlerine bakıldığında ise DSS işlemi yapılan tüm döküm sonrası bekleme sürelerinde referans numuneye kıyasla belirgin bir daralma söz konusudur. Bu durumun mekanik özelliklere olumlu olarak yansması beklenmelidir.

M. Taghipourian ve arkadaşları, A356 alaşımının ablastyon dökümünde su jeti başlangıç zamanının etkisini araştırmışlardır. 25 mm kalınlığında, 170 mm boyunda ve 140 mm genişliğinde plaka şekilli parçalar dökmüşlerdir. Su jeti başlangıç süresi 120, 60 ve 30 s olacak şekilde deneyler yapmışlardır. Bu sürelerde ulaştıkları SDAS değerleri sırasıyla; 50,5 µm, 48 µm ve 25,5 µm'dir [5].

Bir diğer çalışmada V. Bohlooli ve arkadaşları ablastyon dökümün A356 alaşımının mikroyapısı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kalınlığı 65 mm, uzun kenarı 120 mm olan L şekilli parçaları 710 °C'da dökmüşlerdir. Ablastyon işlemi sonucunda SDAS değerleri ortalama 40 µm olarak belirlenmiştir [3].

P. Dudek ve arkadaşları AlSi7Mg alaşımının ablastyon dökümü üzerine çalışmalar yapmışlardır. 700 °C'de ince ucu 3 mm kalın ucu 15 mm olan merdiven şekilli parçalar dökmüşlerdir. Ablastyon işlemi sonucunda ince uçta ölçtükleri SDAS değerini 14,3 µm, kalın uçta ise 35,3 µm olarak belirlemişlerdir [4].

KKD yönteminde DSS uygulaması ablastyon dökümle bire bir aynı işlem olmamakla birlikte, SDAS değerleri açısından A356 alaşımı ile gerçekleştirilen ablastyon döküm uygulamalarına benzer sonuçlar ortaya konmuştur.

Tablo 5.2’te tüm numunelerden ölçülen ötektik Si partikülleri arası mesafe değerleri verilmiştir.

Tablo 5. 2 Ötektik Si partikülleri arası mesafeler (μm)

	710°C YD	750°C YD	710°C DD	750°C DD
Referans	14,56 $\pm$ 7,62	14,73 $\pm$ 3,00	14,56 $\pm$ 7,62	14,73 $\pm$ 3,00
60s	3,76 $\pm$ 1,78	1,49 $\pm$ 0,55	4,76 $\pm$ 1,93	4,17 $\pm$ 2,81
90s	3,99 $\pm$ 2,20	3,90 $\pm$ 1,88	5,68 $\pm$ 2,16	5,46 $\pm$ 2,51
120s	7,89 $\pm$ 4,15	6,37 $\pm$ 3,38	4,86 $\pm$ 2,70	7,59 $\pm$ 3,84
150s	6,84 $\pm$ 3,06	5,86 $\pm$ 3,6	6,61 $\pm$ 3,30	4,47 $\pm$ 2,31
180s	7,77 $\pm$ 4,07	7,14 $\pm$ 4,73	5,88 $\pm$ 2,94	9,40 $\pm$ 4,57

Tablo 5.2’de verilen ötektik Si partikülleri arası mesafe ölçümlerini referans numune ile kıyaslayacak olursak tüm süre ve sıcaklık değerlerinde mikroyapıyı destekleyecek şekilde ötektik silisyumun hızlı soğuma etkisiyle incelme gerçekleşmiştir. Her iki sıcaklık ve debi uygulamasında ötektik silisyumdaki incelmenin en fazla gerçekleştiği numuneler 60 s bekleme süresine sahip olanlardır. 750 °C’de dökülen ve yüksek debide DSS işlemi uygulanan numunede ötektik Si partikülleri arasındaki mesafe 1,49 μm olarak ölçülmüştür. Bu değer referans numuneden alınan ortalama değer olarak ondan biridir.

J. Grassi ve arkadaşlarının 2008 yılında ablastyon dökümü tanıttıkları çalışmada A356 alaşımından dökülmüş parçalar üzerinde incelemeler gerçekleştirmişlerdir. Ablastyon işleminin ötektik yapıda partiküller arası boşluğu kimyasal modifikasyon olmaksızın 1 μm ’nin altına indirdiklerini rapor etmişlerdir [1].

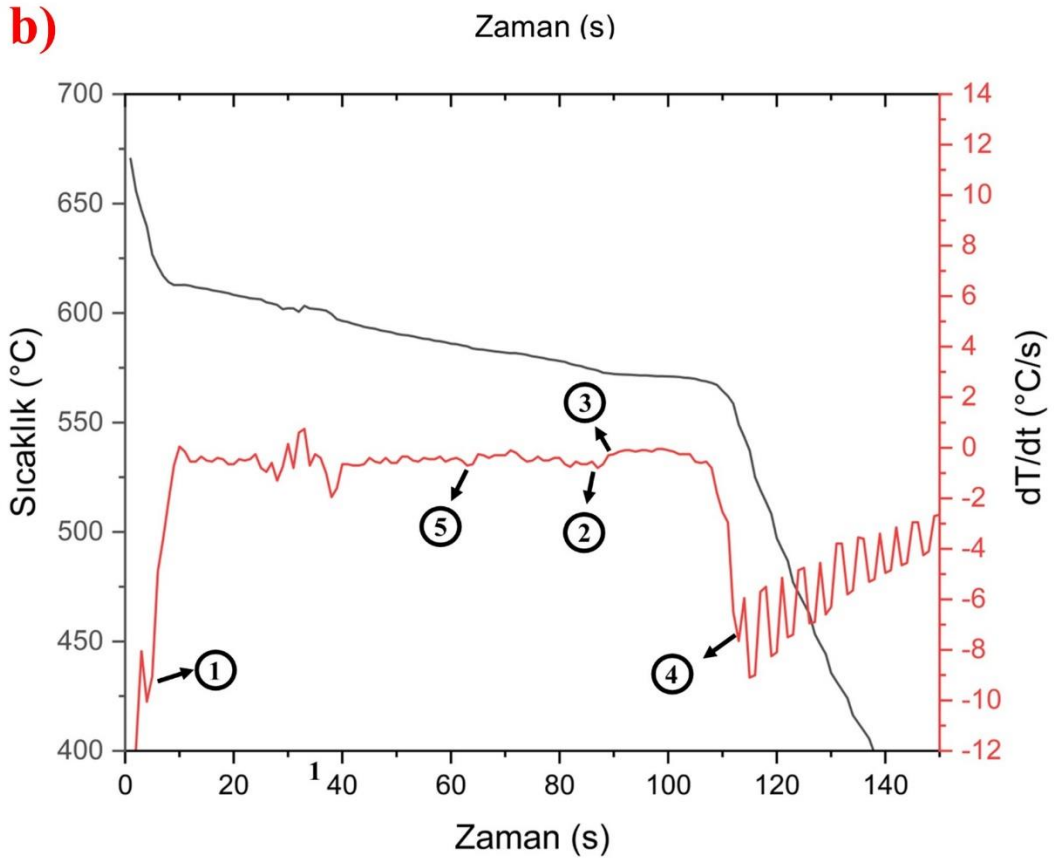
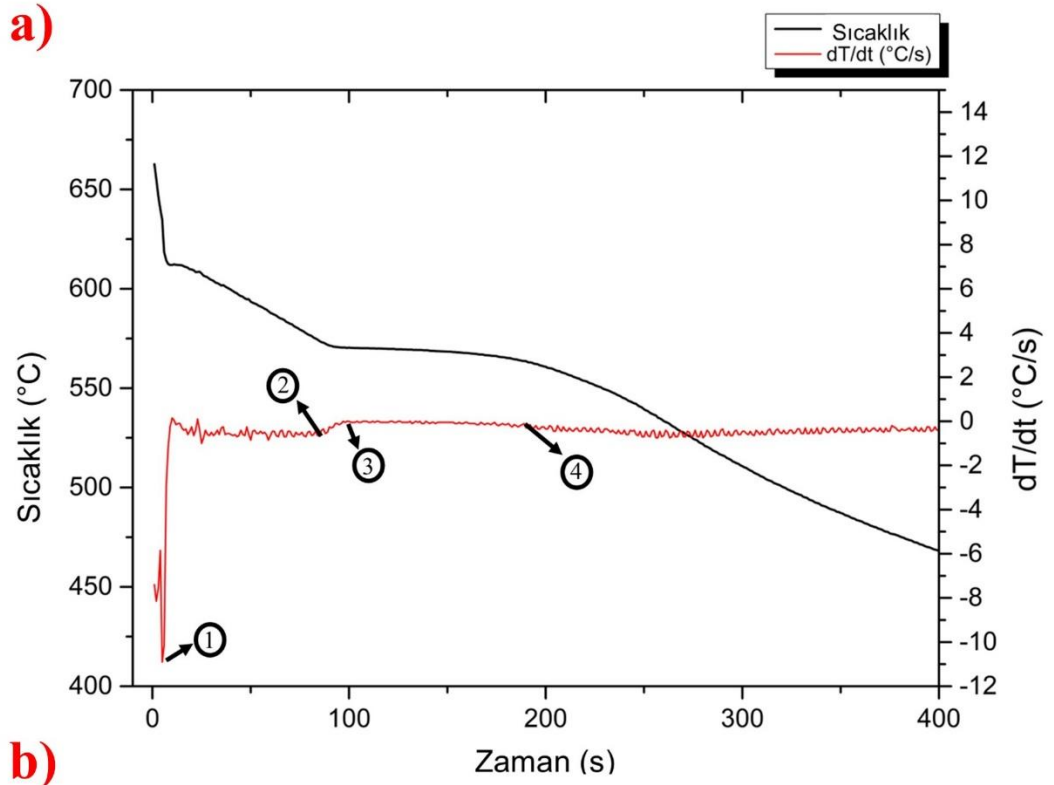
A. Kheirabi ve arkadaşlarının A413 (AlSi11) alaşımıyla yaptıkları ablastyon döküm çalışmalarında; 150 mm genişliğinde ve 180 mm uzunluğunda basamaklı plaka şekilli parçalar dökmüşlerdir. Bu çalışmada geleneksel ablastyondan farklı olarak kalıbın üst parçası işlem öncesi çıkartılmış ve döküm parçaya doğrudan su spreyi uygulanmıştır. Bu işlemin ötektik Si partikülleri arasındaki mesafeyi yaklaşık 1 μm seviyesine indirdiği belirtilmiştir [10].

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda KKD yöntemine uygulanan DSS işleminde ötektik Si partikülleri arası mesafe en düşük 1,49 μm olarak ölçülmüştür. Bu değer literatürde elde edilen değerlere yakındır. KKD’de DSS uygulaması daha önce de

belirtildiği gibi geleneksel ablasyon veya direkt su püskürtmenin doğrudan aynısı olan bir işlem değildir. Bu yöntemde kalıba soğutma suyu verildiğinde kalıp malzeme ablasyon dökümde olduğu gibi ortamdan uzaklaşmaz ve bu durumun soğumayı bir miktar yavaşlatıcı etkisi söz konusudur. Ayrıca model yüzeyine uygulanan refrakter kaplama dökümden sonra metal parça yüzeyinde varlığını korumaya devam etmektedir. Bu durumun da soğumayı yavaşlatıcı etkisi olduğu söylenebilir. Bu nedenle literatürden elde edilen mikroyapı ölçümlerine yakın sonuçlar elde edilmiş olsa da daha ince ötektik morfolojisi bu parça kalınlığı için elde edilememiştir.

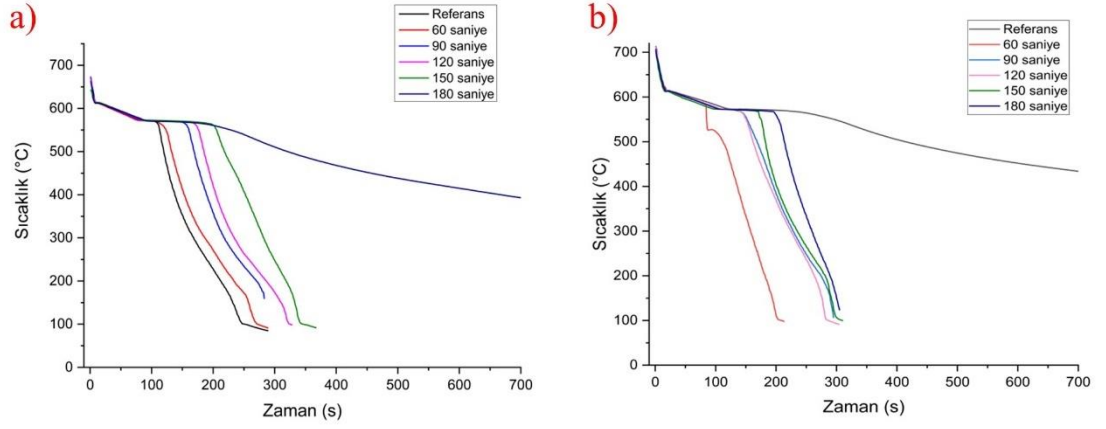
5.2 Isıl Analiz Verileri

Şekil 5.8’de referans ve örnek olarak 710 °C 60 s (YD) numunelerine ait soğuma eğrileri ve bu eğrilerin türevine bağlı olarak soğuma hızı değişimi verilmektedir. Parça soğurken gerçekleşen kritik olaylara ait sıcaklık ve süreler grafik üzerinde numaralarla belirtilmektedir. Şekil 5.8-a’daki noktalardan hareketle 1 numaralı nokta α -Al fazının çekirdeklenmeye başladığı noktayı, 2 numaralı nokta oluşan α -Al fazının büyümesinin durduğu noktayı, 3 numaralı nokta sıvı $\rightarrow$ Al + Si ötektik reaksiyonunun başladığı noktayı ifade etmekten bu noktadan sonra oluşan ötektik faz yapı boyunca büyümektedir. 4 numaralı nokta ise tüm katılaşmanın sonunu ifade etmektedir. Şekil 5.8-b’de verilen DSS işlemi uygulanmış numunede referans numuneden farklı olarak verilen 5 numaralı nokta ise DSS işleminin uygulandığı sıcaklık ve süreyi göstermektedir. Bu numunede 5 numaralı noktanın α -Al fazının katılaşmasının sonlanması ve ötektik başlangıç noktasının gerisinde olmasından dolayı 60. saniyede başlayan DSS işleminin α -Al fazının katılaşmasının son döneminde ve ötektik katılaşmanın tamamında etkin olduğu görülmektedir.



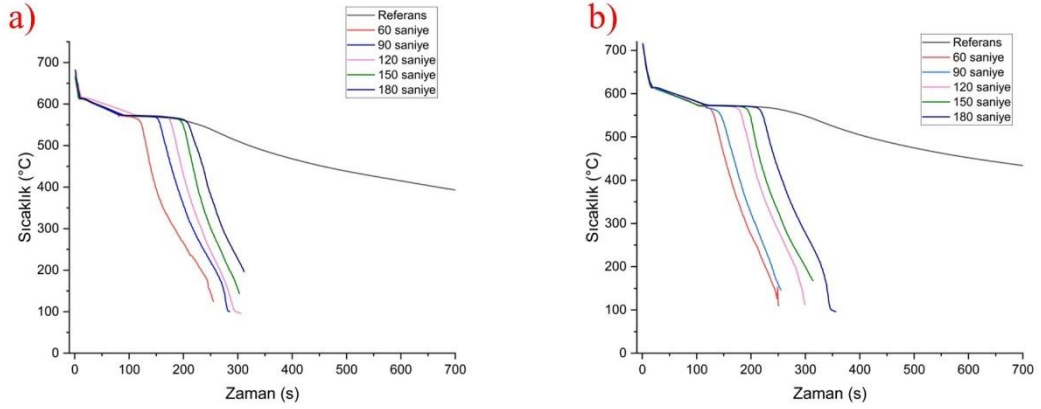
Şekil 5. 8 Soğuma eğrileri ve soğuma hızı arasındaki ilişki a) Referans numune b) DSS işlemi uygulanmış numune (710 °C 60 s YD)

Tüm parametreler için uygulanan ısı analiz işleminin verileri grafiğe dökülerek Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da referans numune ile karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 5. 9 Yüksek debi ile DSS işlemi uygulanmış numunelerin ısı analiz verileri a) 710°C

b) 750°C



Şekil 5. 10 Düşük debi ile DSS işlemi uygulanmış numunelerin ısı analiz verileri a) 710°C

b) 750°C

Bu grafikler yardımıyla toplam soğuma hızı (TSH) verisi hesaplanmıştır.

$$TSH = \frac{(T_{\alpha} - T_k)}{(t_{\alpha} - t_k)} \quad (4.2)$$

Formülde verilen T_{α} ve t_{α} sırasıyla α -Al fazlarının çekirdeklenmeye başladığı sıcaklık ve süreyi ifade ederken T_k ve t_k ise katılaşmanın bittiği sıcaklık ve süreyi ifade etmektedir. Formülden yararlanarak elde edilen veriler Tablo 5.3'te verilmiştir.

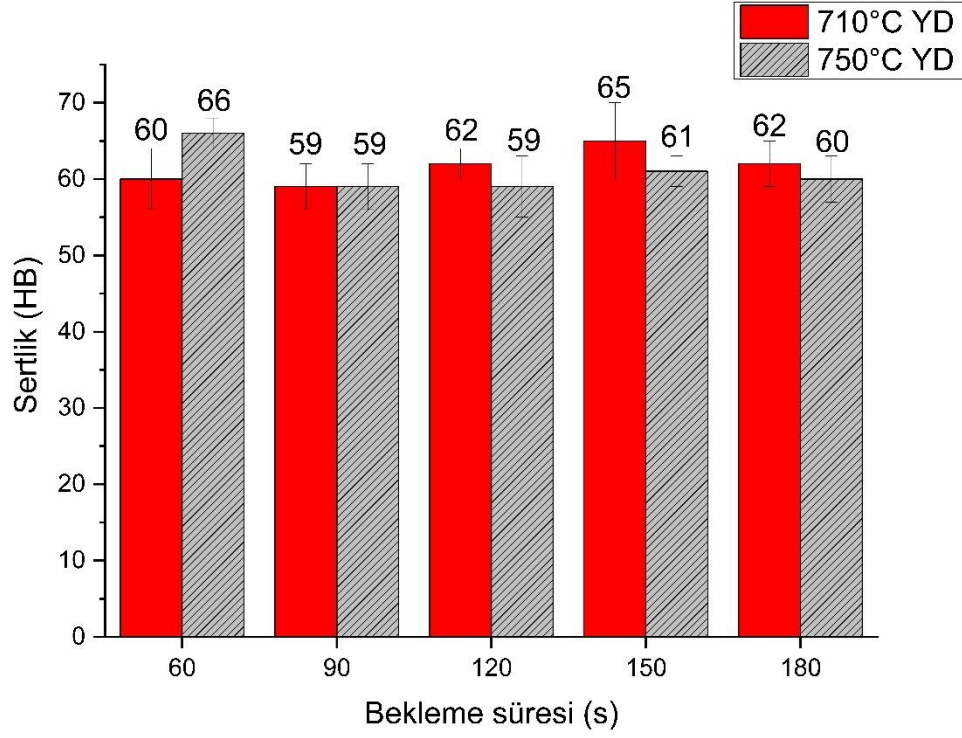
Tablo 5. 3 Tüm parametrelere ait toplam soğuma hızı değerleri (°C/s)

	710°C YD	750°C YD	710°C DD	750°C DD
Referans	0,36	0,27	0,36	0,27
60 s	1,38	1,6	1,26	1,55
90 s	1,25	1,1	0,92	0,98
120 s	0,97	0,9	0,89	1,05
150 s	0,88	0,83	0,8	0,94
180 s	0,71	0,74	0,73	0,8

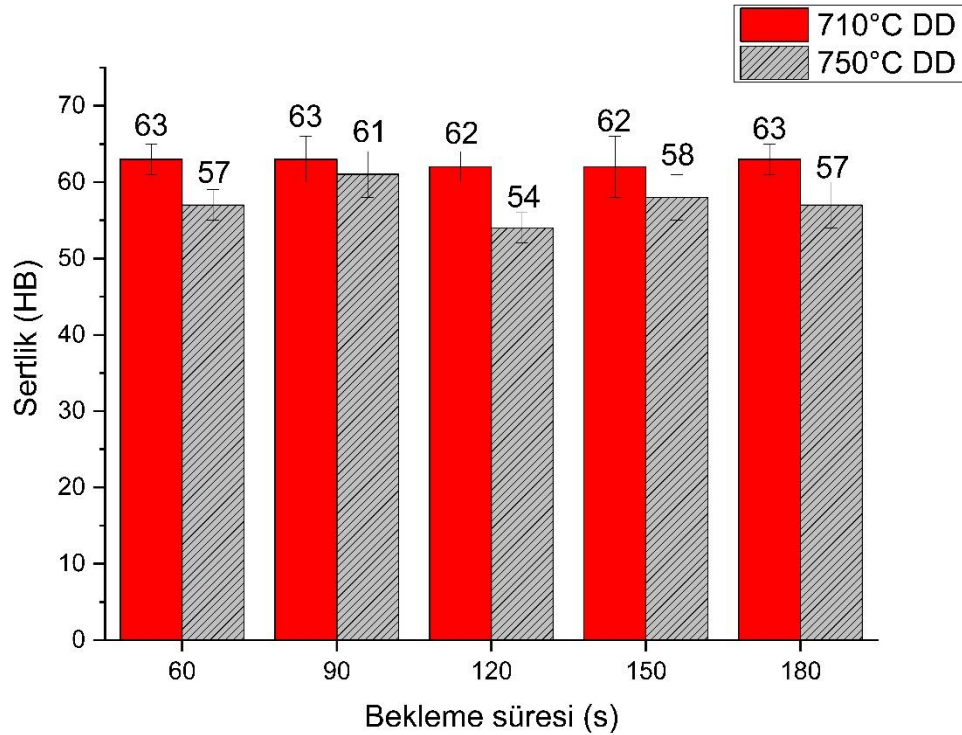
Elde edilen toplam soğuma hızı değerleri incelendiğinde belirgin ötektik modifikasyonu için soğuma hızının 1,6 °C/s değerinden yüksek olması gerekmektedir. Toplam soğuma hızı değerleri mikroyapı görüntüleriyle birlikte incelendiğinde 0,70 °C/s değerinin altındaki soğuma hızlarında mikroyapı ve ötektik morfolojisi referans numuneye yaklaşmaktadır. Ayrıca, DSS işlemi sayesinde, tasarlanan sistem ve parça boyutu için toplam soğuma hızının yaklaşık beş kata kadar artırılabilirdiği gözlemlenmiştir. 750 °C 60 s beklemede DSS işleminde soğutma işlemi α -Al katılaşması sırasında gerçekleşirken, diğer döküm sıcaklığı ve bekleme sürelerinde ötektik katılaşma sırasında başlamaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak 750 °C 60 s beklemede yapılan yüksek debili soğutmada üretilen parça fiziksel bütünlüğünü koruyamayarak kırılmıştır.

5.3 Mekanik Deneyler ve Sonuçları

Şekil 5.11 ve 5.12’de yüksek ve düşük debiyle DSS işlemi uygulanan numunelerin Brinell sertlik verileri histogram grafikleri şeklinde verilmektedir.



Şekil 5. 11 Yüksek debi ile DSS işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri



Şekil 5. 12 Düşük debi ile DSS işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri

Referans numunelerde 50 HB civarı ölçülen sertlik değerleri, DSS işlemi sayesinde döküm sıcaklığı, uygulanan debi ve bekleme süresinden bağımsız olarak 60 HB civarı

ölçülmüştür. Bu artışın ana nedeni DSS işleminin SDAS değerlerini düşürmesi ve ötektik Si yapısını inceltmesidir.

Tablo 5.4'te döküm parçalardan standartlara uygun bir biçimde işlenmiş numunelere uygulanan çekme testi sonuçları verilmiştir.

Tablo 5. 4 Referans ve DSS işlemi uygulanan numunelerin çekme testi sonuçları

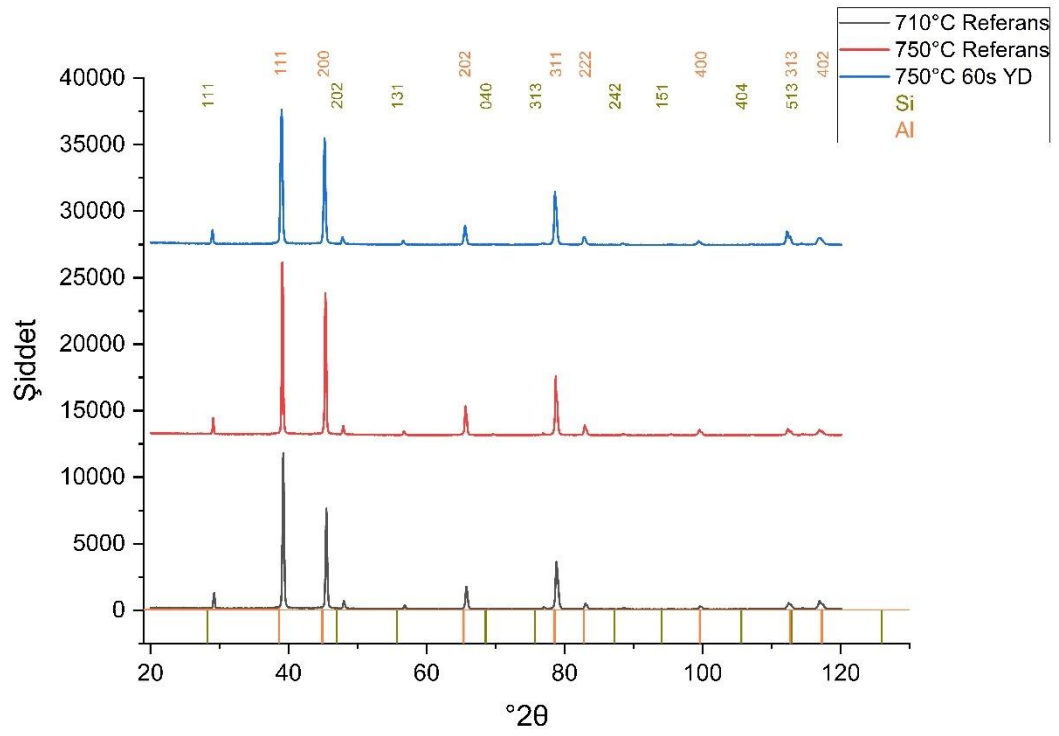
	710°C			750°C		
Numune	R _e (MPa)	R _m (MPa)	% Uzama	R _e (MPa)	R _m (MPa)	% Uzama
Referans	120±8,0	138,00±7,0	2,47±1,3	99±12,0	119,35±3,0	2,17±0,84
60 s YD	132±5,0	164,54±2,54	4,85±1,0	-	-	-
90 s YD	124±13,1	149,67±11,3	4,35±2,0	128±11,2	149,38±2,23	5,80±1,18
120 s YD	133±6,0	157,00±7,0	5,17±2,3	123±8,0	149,57±6,25	3,05±2,22
150 s YD	122±5,9	147,09±6,0	3,00±3,0	136±6,32	147,19±4,0	4,85±1,0
180 s YD	132±4,6	152,59±8,46	4,40±1,5	140±7,0	157,63±3,68	5,17±0,54
60 s DD	131±5,6	153,93±7,33	5,12±2,0	118±10,2	154,32±4,48	4,92±2,24
90 s DD	126±9,7	153,35±8,0	4,92±1,3	125±5,56	151,32±5,0	6,32±1,2
120 s DD	128±7,0	147,41±6,48	4,00±2,2	129±8,66	145,24±8,0	4,50±2,0
150 s DD	120±5,0	147,03±6,0	5,35±2,0	120±10,2	139,98±4,38	2,97±2,84
180 s DD	136±10,	152,17±9,0	3,85±1,1	118±11,0	143,76±7,64	6,17±0,76

Çekme deneyi sonuçlarına göre 710 °C'de YD ile yapılan DSS numunelerinde çekme dayanımı ortalama 154 MPa olarak belirlenirken ortalama % uzama değeri %4,35 olarak hesaplanmıştır. 710 °C DD numuneleri için bu değerler 151 MPa ile %4,65'tir. 750 °C'de YD için ortalama çekme dayanımı 151 MPa, % uzama ise %4,72 olarak hesaplanırken, DD için bu değerler 147 MPa ve %4,98'dir. Bu sonuçlar ışığında debi farkının mevcut parça ve kalıp boyutu için çekme özellikleri üzerinde büyük bir fark yaratmadığı söylenebilir. 710 °C ve 750 °C numuneleri kendi aralarında kıyaslanacak olduğunda çekme dayanımı

bakımından 710 °C YD'nin az bir farkla öne çıktığını söylemek mümkündür. % Uzama değerlerinde ise 750 °C numunelerinin 710 °C numunelerine göre daha yüksek sonuç verdiği gözlenmiştir. 710 °C 150 s YD, 750 °C 120 s YD ve 750° C 150 s DD numunelerinde kopma uzaması değeri ortalama değerlerin altında kalmıştır. Bu sonuçların olası sebebinin proses sırasında gaz alma işlemi yapılmaması kaynaklı bazı parçalarda porozite oranının yükselmiş olması olabileceği düşünülmektedir. Mikroyapı görsellerinde etkin bir soğuma görülmesine rağmen, 750 °C 60 s YD numunesi sağlam üretilemediği için çekme deneyi yapılamamış ve sonuç elde edilememiştir. Çekme testi sonuçlarında referans numunelere göre hem çekme dayanımı hem de % uzama değerlerinde daha iyi sonuçlar ortaya konmuştur. Uzama değerlerindeki artış çekme dayanımı değerlerindeki artışa göre daha dikkat çekicidir. Bu sonuçlardan yola çıkarak DSS işleminin tokluğu artırıcı bir etkisi olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

5.4 İlave Deneyler ve Analizler

Uygulanan DSS işleminin fazlarda kimyasal bir değişikliğe neden olup olmadığını detaylandırılması amacıyla seçilen numunelere XRD analizi yapılmıştır. Referans numuneler ve 750 °C 60 s numunesine uygulanan XRD analiz sonuçları Şekil 5.13'te verilmektedir. Bu sonuçlar EDS sonuçlarını destekler niteliktedir. Matris fazına ait piklerin 2θ (°) değerleri vasıtasıyla hesaplanan kafes parametreleri ise Tablo 5.5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; ortalama kafes sabitleri 710 °C referans, 750 °C referans ve 750 °C 60 s numuneleri için sırasıyla 4,020, 4,027 ve 4,030 Å olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. 13 XRD analizi sonuçları

Tablo 5. 5 Matris fazına ait kafes sabitleri

Miller indisleri			Kafes sabiti (Å)		
h	k	l	710 °C referans	750 °C referans	750 °C 60 s
1	1	1	3,978	3,993	3,998
2	0	0	3,990	4,002	4,010
2	0	2	4,016	4,024	4,027
3	1	1	4,028	4,032	4,036
2	2	2	4,028	4,034	4,038
4	0	0	4,037	4,038	4,041
3	1	3	4,042	4,045	4,046
4	0	2	4,044	4,046	4,043

Bu deneylere ek olarak, belirlenen parametreler için yeniden dökümler yapılmıştır. Bu parçalara döküm işlemini takiben 165 °C'de 8 saat boyunca T5 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.6'da paylaşılmıştır.

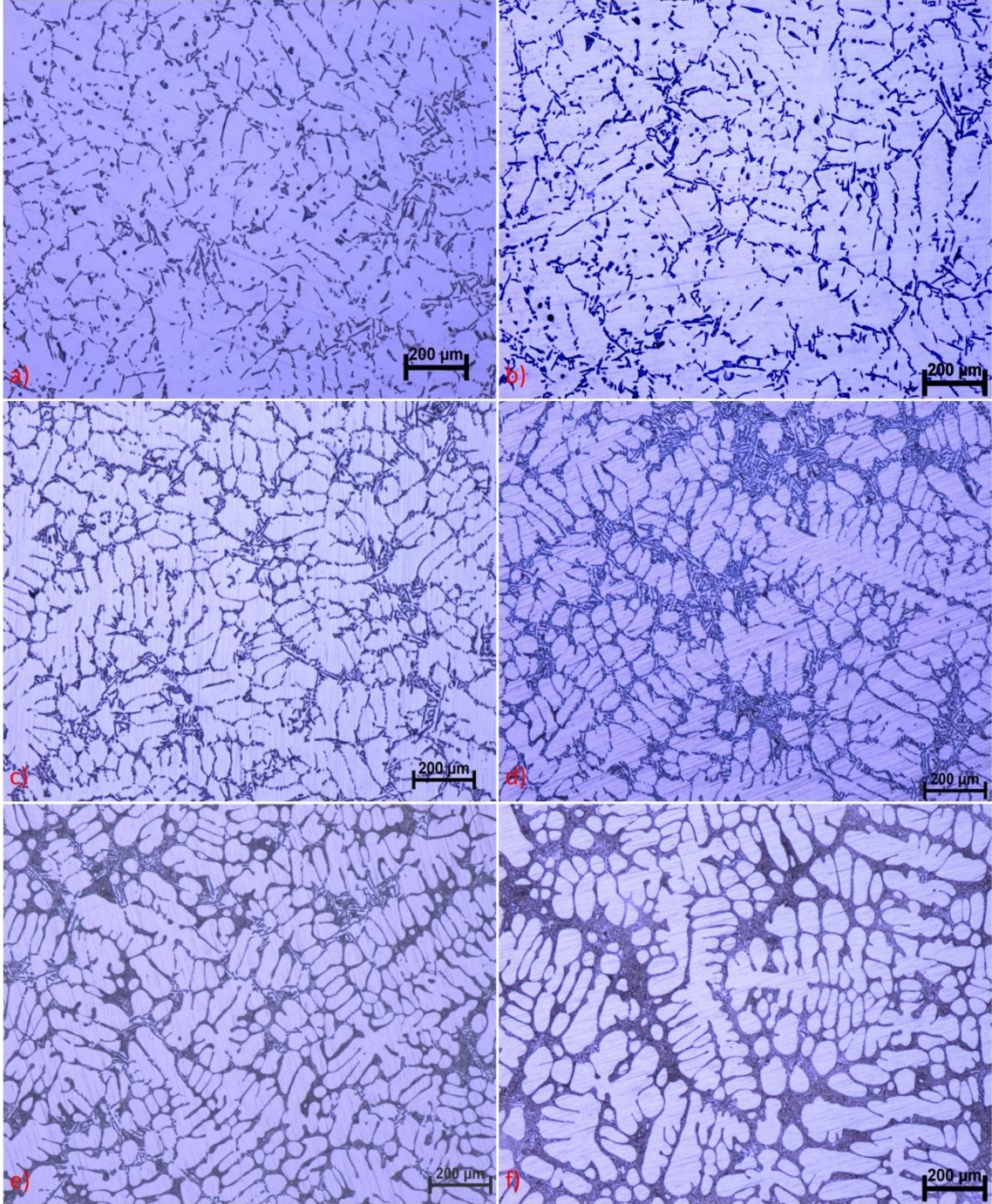
Tablo 5. 6 T5 ısıtma işlemine tabi tutulmuş numunelerin mekanik özellikleri

Numune	R _e (MPa)	R _m (Mpa)	%ε	Sertlik (HB)
680 °C 60s	176.25±2.0	194.0±2.30	1,95	87
710°C 60s	174.0±1.60	189.0±1.50	3,65	83
710°C 90s	168.0±2.20	180.0±3.0	2,52	84
750°C 90s	178.65±3.0	195.0±4.50	4,45	82

Tablo 5.6'da da görüldüğü gibi yaşlandırma sonucunda çekme dayanımında belirgin bir artış vardır. DSS yönteminde uygulanan hızlı soğuma, T6 işlemindeki çözeltiye alma ve su verme aşamalarının yerini almaktadır. Geliştirilen bu yöntemin dikkat çekici sonuçlarından biri de T6 sürecinde yüksek sıcaklıkta yapılan çözeltiye alma işleminin gerekliliğini ortadan kaldırma potansiyelidir. Tablo 5.6'daki sertlik değerlerine bakıldığında; sadece DSS uygulanmış numunelerin sertlik değerlerine göre yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelerde yaklaşık %30'luk bir artış görülmektedir. Çekme dayanımları ve %uzama değerleri karşılaştırıldığında referans numuneye göre çekme dayanımında ortalama %35, uzama değerlerinde ise %38'lik bir artış gözlemlenmiştir. Döküm sıcaklığının belirlenmesi için dört farklı sıcaklıkta yapılan ve 60. saniyede yüksek debi ile soğutulan döküm işlemi sonucu elde edilen numunelerden çekilen mikroyapı görselleri 710°C ve 750 °C referans numuneleri ile Şekil 5.14'te verilmektedir. Şekil 5.14'te, döküm sıcaklığına bağlı olarak farklı morfolojilere sahip iki farklı mikroyapısal bileşen (α -Al ve ötektik Si) gözlemlenmiştir. Nispeten düşük döküm sıcaklıklarında tipik α -Al ve plaka benzeri ötektik Si oluşumu gözlemlenmiştir. 730 ve 750 °C'de ötektik silisyumun modifiye olduğu ve daha ince hale geldiği gözlemlenmiştir.

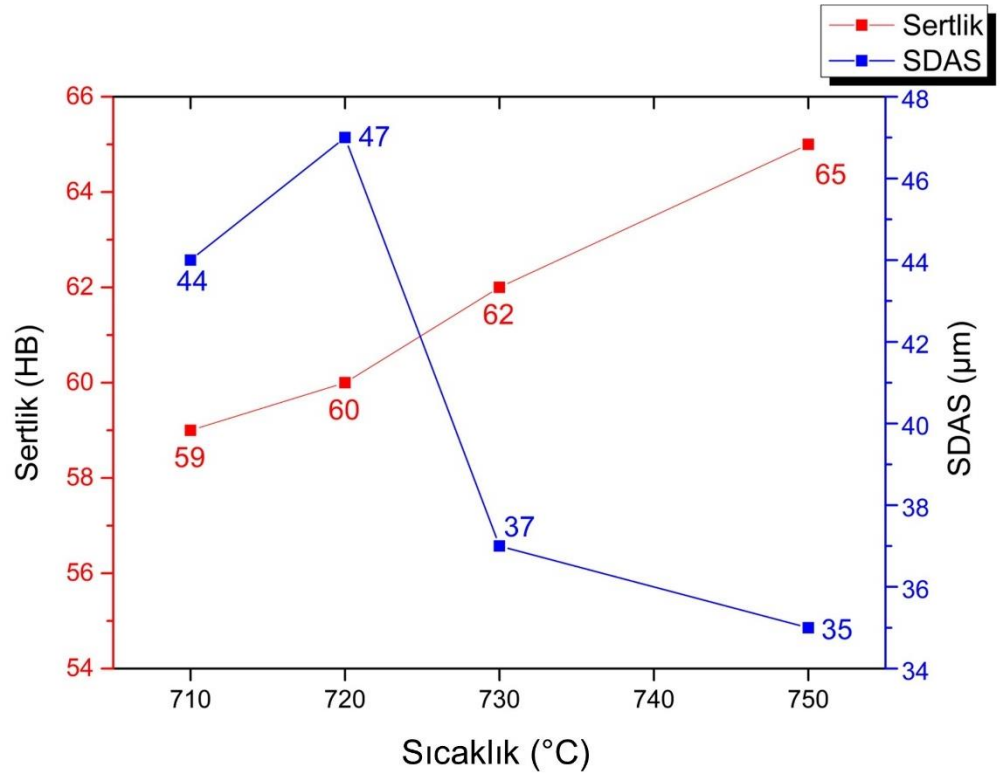
Uygulanan DSS işleminin farklı sıcaklıklar için sertlik ve SDAS değerlerinin değişimine etkisi Şekil 5.15'te verilmektedir. Şekil 5.15'e göre ötektik modifikasyon gözlemlenen numunelerde SDAS değerleri önemli ölçüde azalmış ve bu da sertlik değerlerinde artışa neden olmuştur. Değerler arasında en iyi SDAS ve en yüksek sertlik değerleri 750°C

numunede sırasıyla 35 μm ve 65 HB olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama sertlik değeri 710°C numunesinde gözlenmiştir. Bu çelişki hem SDAS'taki azalmadan hem de ötektik morfolojideki değişiklikten kaynaklanmaktadır.



Şekil 5. 14 Döküm parçaların mikroyapıları a) 710°C referans b) 750°C referans

c) 710°C DSS d) 720°C DSS e) 730°C DSS f) 750°C DSS



Şekil 5. 15 DSS işlemi uygulanan farklı sıcaklıktaki numunelerden ölçülen SDAS ve sertlik değerleri

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda;

- Çalışma kapsamında tasarlanan deneysel üretimde 750 °C 60 s YD numunesi hariç tüm dökümler başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- Ablasyon dökümden türetilmiş DSS işleminin KKD yönteminde etkin olarak çalıştığı bu çalışma sonucunda ortaya konmuştur.
- DSS işleminin KKD işlemine getirdiği ilave yük, işlem sonrasındaki ıslanmış kumun yeniden kullanım öncesi kurutulması gerekliliğidir.
- DSS işlemi A356 alaşımında SDAS ve ötektik Si partiküller arası mesafe değerlerini belirgin bir şekilde düşürmektedir.
- Yeterli kalınlıkta kabuk katılaşmadan erken sürede yüksek akış hızı ile su verilmesi parçaya hasar vermektedir. DSS işlemi öncesi bekleme süresi ve su akış hızı, dökülen alaşımın cinsine, parça geometrisine ve döküm sıcaklığına göre optimize edilmelidir.
- Sanayide uygulanan döküm sıcaklıklarına göre belirlenen deneysel döküm sıcaklıklarından 710 °C için ilgili parça boyutu için tavsiye edilecek DSS öncesi ideal bekleme süresi 60 s iken 750 °C için ise bu süre 90 s olarak tespit edilmiştir.
- Referans numuneye göre SDAS değerlerinde en büyük düşüş 750 °C'de 60 s bekleme süresinden sonra uygulanan yüksek debili DSS işlemi ile elde edilmiştir. Artan bekleme sürelerinde kademeli olarak mikroyapının kabalaştığı görülmektedir.
- Uygulanan ısı analiz sonucu elde edilen soğuma hızlarına göre en büyük toplam soğuma hızı yine 750 °C 60 s numunesinde gözlemlenmiştir.
- DSS işlemi sertlik, çekme dayanımı ve % uzamada kayda değer ölçüde artışlar sağlamaktadır. Bu sonuç parçanın döküm halinde kullanım özelliklerini geliştirmektedir.
- Uygulanan ısıl işlem sonucunda çekme dayanımı ve % uzama değerleri referans numune ile kıyaslandığında sırasıyla ortalama %35 ve %38 oranlarında değişimler gözlemlenmiştir. Ayrıca sertlik değerlerinde de ortalama %30 artış göze çarpmaktadır.

- DSS işlemi ile KKD’de elde edilen Rm ve % uzamadaki iyileşmeler parça özelinde yeterli gelmediği takdirde, katılaşma sırasında meydana gelen hızlı soğumanın etkisiyle, çözeltiye alma tava ve su verme işlemleri uygulanmadan doğrudan yaşlandırma gerçekleştirilebilir.

- [1] J. Grassi, J. Campbell, M. Hartlieb, and F. Major, "The ablation casting process," in *Materials Science Forum*, 2009, vol. 618 619, no. January 2014, pp. 591–594. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.618-619.591.
- [2] D. Weiss, J. Grassi, B. Schultz, and P. Rohatgi, "Ablation of Hybrid Metal Matrix Composites," in *AFS Proceedings 2011*, 2011, pp. 1–7.
- [3] V. Bohlooli, M. S. Mahalli, and S. M. A. Boutorabi, "Effect of ablation casting on microstructure and casting properties of a356 Aluminium casting alloy," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 26, no. 1, pp. 85–91, 2013, doi: 10.1007/s40195-012-0092-6.
- [4] P. Dudek, A. Fajkiel, and T. Reguła, "The research on the ablation casting technology for aluminium alloys," *Solid State Phenomena*, vol. 223, pp. 70–77, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.223.70.
- [5] M. Taghipourian, M. Mohammadaliha, S. M. Boutorabi, and S. H. Mirdamadi, "The effect of waterjet beginning time on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy during the ablation casting process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 238, pp. 89–95, 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.05.004.
- [6] A. Kheirabi, M. Divandari, S. Mohammad, A. Boutorabi, and A. Pribodaghi, "Introduce the CWS method in Ablation Casting by comparison with Traditional Sand Casting in A356 alloy," in *8th International Conference on Materials Engineering and Metallurgy*, 2019, pp. 1–17.
- [7] S. M. A. Boutorabi, P. Torkaman, J. Campbell, and A. Zolfaghari, "Structure and Properties of Carbon Steel Cast by the Ablation Process," *International Journal of Metalcasting*, 2020, doi: 10.1007/s40962-020-00466-7.
- [8] M. Tiryakioğlu, P. D. Eason, and J. Campbell, "Fatigue life of ablation-cast 6061-T6 components," *Materials Science and Engineering A*, vol. 559, pp. 447–452, 2013, doi: 10.1016/j.msea.2012.08.124.

- [9] E. Heidari, S. M. A. Boutorabi, M. T. Honaramooz, and J. Campbell, "Ablation Casting of Thin-Wall Ductile Iron," *International Journal of Metalcasting*, no. September 2020, 2021, doi: 10.1007/s40962-021-00579-7.
- [10] A. Kheirabi, M. Divandari, and S. M. A. Boutorabi, "EFFECT OF THE MODIFIED ABLATION CASTING PROCESS ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF NEAR EUTECTIC Al-Si ALLOY," *International Journal of Metalcasting*, no. May, 2021, doi: 10.1007/s40962-021-00672-x.
- [11] S. Acar and K. A. Guler, "A Preliminary Study Upon the Applicability of the Direct Water Cooling with the Lost Foam Casting Process," *International Journal of Metalcasting*, vol. 15, no. 1, pp. 88–97, 2021, doi: 10.1007/s40962-020-00420-7.
- [12] Wei. Sha and Savko. Malinov, *Fundamentals of Aluminium Metallurgy Production, Processing and Applications (Roger Lumley)*. Woodhead Pub, 2009.
- [13] Cemal ÖKSÜZ, "Yüksek mukavemetli (2024,6061,7075) Alüminyum Alaşımının Jomminy Yöntemi ile Su Verme Duyarlılığı," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1996.
- [14] J. R. Kissell and R. L. Ferry, *Aluminum structures : a guide to their specifications and design*. J. Wiley, 2002.
- [15] Cem MISIRLI, "5083 Kalite Alüminyum Alaşımının Homojenize Edilerek Sertlik Değerlerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi," Yüksek Lisans, Trakya Üniversitesi, Edirne, 2011.
- [16] ASM International Handbook Committee, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials was," *ASM International*, vol. 2, no. ASM international, p. 3470, 1990.
- [17] Furkan SARSILMAZ, "Sürtünme Karışıma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA7075/AA6061 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması," Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2008.
- [18] Ege DEMİRTAŞ, "Ablation Casting Tez," Yüksek Lisans, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2016.

- [19] U. Chadha *et al.*, “Phase Change Materials in Metal Casting Processes : A Critical Review and Future Possibilities,” vol. 2022, 2022.
- [20] K. H. Jürgen Buschow, Merton C. Flemings, Robert W. Cahn, and Bernard Ilshner (print), *Encyclopedia of Materials Science and Technology*, vol. 10. 2008.
- [21] Kurz W. and Fisher D.J., *Fundamentals of solidification*, 3rd ed. 1992.
- [22] T. S. Sudarshan, J.J. Stiglich, and M. Jeandin, *Surface Modification Technologies XV*, vol. 15. 2002.
- [23] J. G. (John G. Kaufman, E. L. Rooy, and American Foundry Society., *Aluminum alloy castings : properties, processes, and applications*. ASM International, 2004.
- [24] J. Campbell, *Complete casting handbook : metal casting processes, metallurgy, techniques and design*.
- [25] J. Campbell, *Castings*, 2nd ed. 2003.
- [26] M. Goenka, C. Nihal, R. Ramanathan, P. Gupta, and A. Parashar, “ScienceDirect Automobile Parts Casting-Methods and Materials Used : A Review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 2525–2531, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.381.
- [27] Woodhead Publishing Limited, *Introduction to aerospace materials*. 2012.
- [28] I. Amhen, N. Y. San, and F. Washington, *The Complete Handbook of Sand Casting*. 1973.
- [29] Theodore Provder, *ACS Symposium Series, Particle Size Distribution Assessment and Characterization*. Washington, DC, 1987.
- [30] Peter Beeley, *Foundry Technology*, 2nd ed. 2001.
- [31] L. Ufrgs *et al.*, *ASM Handbook Volume 15 Casting*, vol. 15. 1992.
- [32] H. Sun and L. Chao, “Analysis of Interfacial Heat Transfer Coefficient of Green Sand Mold Casting for Aluminum and Tin-Lead,” vol. 129, no. April 2007, pp. 595–600, 2013, doi: 10.1115/1.2709975.

- [33] D. Weiss, "Advances in the Sand Casting of Aluminium Alloys," *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, pp. 159–171, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-08-102063-0.00005-9.
- [34] D. Weiss, *Advances in the Sand Casting of Aluminium Alloys*. Elsevier Ltd., 2018. doi: 10.1016/b978-0-08-102063-0.00005-9.
- [35] I. Amhen *et al.*, "Dedication TEE (3 0 M P M HANDBOOK OF 1 SAND CASTIN@ I."
- [36] Q. Han, "Ablation Casting: Solidification Characteristics, Microstructure Formation, and Mechanical Properties," *International Journal of Metalcasting*, no. September 2020, 2021, doi: 10.1007/s40962-020-00544-w.
- [37] D. Sui and Q. Han, "Modeling Ablation Casting," *International Journal of Metalcasting*, no. March, 2021, doi: 10.1007/s40962-021-00603-w.
- [38] S. Puzio, J. Kamińska, M. Angrecki, and K. Major-Gabryś, "The Influence of Inorganic Binder Type on Properties of Self-Hardening Moulding Sands Intended for the Ablation Casting Process," *Journal of Applied Materials Engineering*, vol. 60, no. 4, pp. 99–108, Mar. 2021, doi: 10.35995/jame60040008.
- [39] S. Puzio, J. Kamińska, M. Angrecki, and K. Major-Gabryś, "Effect of the type of inorganic binder on the properties of microwave-hardened moulding sands for ablation casting technology," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 65, no. 4, pp. 1385–1390, 2020, doi: 10.24425/amm.2020.133704.
- [40] N. Mariusz Holtzer, "KIERUNKI ROZWOJU MAS FORMIERSKICH I RDZENIOWYCH ZE SPOIWAMI NIEORGANICZNYMI W ASPEKCIE ZMNIEJSZENIA."
- [41] W. R. Oso´rio, O. Oso´rio, P. R. Goulart, G. A. Santos, C. M. Neto, and A. Garcia, "Effect of Dendritic Arm Spacing on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Al 9 Wt Pct Si and Zn 27 Wt Pct Al Alloys."
- [42] S.-Z. Lu and A. Hellawell, "GROWTH MECHANISMS OF SILICON IN AL-Si ALLOYS," 1985.
- [43] ASM International. Handbook Committee, "Expandable-Mold Casting Processes with Expendable Patterns," in *ASM Handbook - Volume 15 Casting*, 9th ed., vol. 15, J. L. Jorstad, Ed. Ohio: ASM International, 2008, pp. 635–663.

- [44] H. F. Shroyer, "Use of Foam Plastics for Pattern-Making and Its Application to Tooling and Production Castings Mid-Year Meeting," 2018.
- [45] Z. Fan, W. Jiang, F. Liu, and B. Xiao, "Status quo and development trend of lost foam casting technology," *China Foundry*, vol. 11, no. 4, pp. 296–307, 2014.
- [46] K. A. Guler and S. Acar, "Lost Foam Casting of Metallic Parts and Structures," *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, pp. 73–86, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-819726-4.00008-9.
- [47] S. L. Mcfarland Dean, "Experimental And Computational Study Of Fluid Flow And Heat Transfer In The Lost Foam Casting Process," Alabama, Oct. 2005.
- [48] W. Deabes, A. Sheta, K. E. Bouazza, and M. Abdelrahman, "Application of electrical capacitance tomography for imaging conductive materials in industrial processes," *Journal of Sensors*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/4208349.
- [49] J.-H. Kuo, J.-C. Chen, Y.-N. Pan, and W.-S. Hwang, "Mold Filling Analysis in Lost Foam Casting Process for Aluminum Alloys and Its Experimental Validation."
- [50] K. A. Guler, *Lost Foam Casting (Disposable Pattern)*, no. April 2015. Elsevier Ltd., 2016. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.03558-x.
- [51] W. Jiang and Z. Fan, "Novel technologies for the lost foam casting process," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 37–47, 2018, doi: 10.1007/s11465-018-0473-2.

Konferans Bildirileri

1. Tütük İ., Acar S., Güler K.A., (2022). “Investigation of Pouring Temperature for Direct Water -Cooled Aluminum Lost Foam Casting”, 10.Uluslararası Alüminyum Sempozyumu, 3-4 Mart 2022, İSTANBUL.