



T.R.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**DÖKÜM PROSESİNDEKİ KATILAŞMA HIZININ
ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Çiğdem ŞATIRER

Makina Mühendisliği

İzmir

2023

T.R.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**DÖKÜM PROSESİNDEKİ KATILAŞMA HIZININ
ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

91200000359 Çiğdem ŞATIRER

Tez danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aysun Baltacı

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Izmir
2023

Çiğdem Şatırer tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “DÖKÜM PROSESİNDEKİ KATILAŞMA HIZININ ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 21.09.2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Dr.Öğr.Üyesi Aysun Baltacı

Raportör Üye : Doç.Dr. Mehmet Sarıkanat

Üye : Prof.Dr. Kutlay Sever



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “DÖKÜM PROSESİNDEKİ KATILAŞMA HIZININ ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu araştırma tezi çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

13 / 08 / 2023

Çiğdem Şatırer



ÖZET

DÖKÜM PROSESİNDEKİ KATI LAŞMA HIZININ ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ŞATIRER, Çiğdem

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aysun Baltacı

Ağustos 2023, 82 sayfa

Hızla gelişen jant sektöründe teknik beklentiler artış eğilimindedir. Tasarım esnekliği, üretilebilirlik, estetik görünüm, maliyet, korozyon direnci ve geri dönüşüm avantajları sağlama göz önünde bulundurulduğunda Al-Si alaşımli jantlar otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Otomobil jantları karmaşık bir geometriye sahiptir. Estetik görüntülerinin yanında hafif ağırlık, yüksek dayanıklılık ve iyi yorulma ömrü gibi birden fazla mekanik tasarım kriterlerini yerine getirmelidir.

Jantlar; seri üretimine geçmeden önce, numune ve ön seri fazlarında çeşitli doğrulama ve onay testlerinden geçmek zorundadırlar. Jantın kalitesi, otomobilin kalitesi ve sınıfı için önemli bir göstergedir. Ürün tasarım süreçlerinde kullanılan simülasyonlar, imalat maliyetini düşürürken aynı anda ürün yaşam döngüsünü artırmada mekanik dayanımı yorumlama açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Alüminyum alaşımlarının düşük basınçlı dökümünde, proses performansını artırmak amacıyla değişkenler üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Katılma hızı, dökümün mikroyapısının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Daha hızla katılma döküm ürünleri daha homojen mikroyapılara sahip olmaları nedenleriyle daha iyi bir mukavemete ve sünekliğe sahiptir. Döküm alüminyum alaşımlarının mikroyapısı geliştirilerek mekanik performans kontrol altında tutulabilir ve geliştirilebilir.

Geleneksel deneme yanılma yöntemi yerine büyük endüstriyel uygulamalar için hızlı ve güvenilir alternatif yaklaşımlar sağlama nedeniyle tercih edilen bilgisayar destekli döküm simülasyonları, döküm sürecinin dinamik davranışını ortaya koyarak bütün döküm süreçlerini

modelleme yeteneğine sahiptir. Buna bağlı olarak yeni ürün geliştirme paradigmasında günümüzde önemli bir yere sahiptir.

Döküm simülasyonlarıyla daha iyi bir süreç kontrolü sağlanmasıyla, işleme kusurlarının miktarı azaltılabilir ve dayanıklılık değişkenliği kontrol altında tutulabilir. Bu çalışmada, Magma yazılımı kullanılarak döküm prosesindeki katılaşma hızının alüminyum alaşımlı jantların mekanik özelliklerine etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Simülasyon sonuçları; katılaşma hızının, mekanik dayanımın önemli fonksiyonlarından biri olduğunu göstermektedir.

Anahtar sözcükler: Mekanik dayanım, katılaşma hızı, döküm simülasyonu, soğuma hızı.



ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SOLIDIFICATION RATE IN CASTING PROCESS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY WHEELS

ŞATIRER, Çiğdem

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Aysun Baltacı

August 2023, 82 pages

In the rapidly advancing wheel industry, technical expectations are on the rise. Considering design flexibility, manufacturability, aesthetic appearance, cost, corrosion resistance, and recycling advantages, Al-Si alloy wheels are preferred in the automotive sector. Automobile wheels have complex geometries and need to fulfil multiple mechanical design criteria such as lightweight, high durability, and good fatigue life alongside their aesthetic appeal.

Before moving into mass production, wheels must undergo various verification and approval tests in prototype and pre-production phases. The quality of a wheel is a significant indicator of the quality and class of the automobile. Simulations used in product design processes play a crucial role in interpreting mechanical strength to simultaneously reduce manufacturing costs and enhance product lifecycle.

In the low-pressure die casting of aluminum alloys, various studies are conducted on variables to enhance process performance. Solidification rate plays a vital role in determining the microstructure of the casting. Castings that solidify faster have more homogeneous microstructures, resulting in improved strength and ductility. The microstructure of cast aluminum alloys can be controlled and enhanced by developing better mechanical performance.

Computer-aided casting simulations are preferred due to their ability to provide rapid and reliable alternative approaches for large-scale industrial applications, allowing better process control and reducing the variability of defects in materials. These simulations have the

capability to model the dynamic behaviour of the entire casting process, making them an essential part of the modern product development paradigm.

By enabling better process control, these simulations can reduce the amount of processing defects and keep the variability of durability under control. In this study, the aim is to evaluate the impact of solidification rate in the casting process on the mechanical properties of aluminum alloy wheels using the Magma software. Simulation results demonstrate that the solidification rate is a significant factor affecting the mechanical strength, highlighting its importance as a fundamental function.

Keywords: Mechanical strength, solidification rate, casting simulation, cooling rate.





ÖNSÖZ

Otomotiv dünyası, her geçen gün daha hafif, daha dayanıklı ve daha verimli malzemelerin kullanımıyla sürekli olarak yeniden şekillenmektedir. Alüminyum alaşımlı jantlar, bu değişim ve dönüşüme konu olarak karşımıza çıkan en önemli parçalardan biridir. 1980 yılında kurulan CMS Grubu, hafif metal jant üretimi konusunda yerini almış ve günümüzde dünya çapında tanınan bir jant üreticisi haline gelmiştir.

Bu çalışma, CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş. ile gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada bana zaman ayıran ve yardımcı olan CMS Ar-Ge ekibine ve bu çalışmada tezin planlanmasından itibaren bütün sürecin değerlendirilmesi boyunca deneyimleriyle bana yol gösteren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Aysun Baltacı'ya sonsuz teşekkür ederim.

İZMİR

13.08.2023

Çiğdem Şatırer



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK	ii
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	x
ÖNSÖZ.....	xiii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	xv
ŞEKİLLER DİZİNİ	xviii
KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. A356 Alaşım Alüminyum	5
2.2. Alçak Basınçlı Döküm Yöntemiyle Alüminyum Alaşım Jantların Üretimi	7
2.3. Soğuma Hızı ve Katılaşma Hızı İlişkisi	12
2.4. Katılaşma Hızı ve Mekanik Dayanım İlişkisi.....	14
2.4.1. Katılaşma hızı ve dendrit kol uzunluğu (DAS) & ikincil dentrit kol uzunluğu (SDAS) ilişkisi	17
2.5. Katılaşma Hızı ve Mekanik Dayanım İlişkisinin Simülasyonlarla Doğrulanması.....	24

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	31
3.1. 680 °C Başlangıç Döküm Sıcaklığında Simülasyon Sonuçları	33
3.1.1. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için doldurma simülasyonu çıktıları	34
3.1.2. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca sıcaklık değişimi çıktıları	35
3.1.3. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için sıvı oranı (fraction liquid) çıktıları	37
3.1.4. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için SDAS çıktıları	39
3.1.5. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için porozite çıktıları	39
3.1.6. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için çekme mukavemeti ve akma mukavemeti çıktıları	40
3.2. 700 °C Başlangıç Döküm Sıcaklığında Simülasyon Sonuçları	42
3.3. 720 °C Başlangıç Döküm Sıcaklığında Simülasyon Sonuçları	46
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	49
KAYNAKLAR DİZİNİ	52
TEŞEKKÜR	57
ÖZGEÇMİŞ	58



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1. Alüminyum alaşımlı jant görseli	1
2. Alüminyum alaşımlı jant kesiti.	1
3. Alçak basınçlı döküm işleminde kullanılan kalıbın bölümleri.....	8
4. Alçak basınçlı döküm işleminde kullanılan kalıbın şematik gösterimi.....	9
5. Bir jantın yapısındaki makro gözeneklilik kümelerine bir örnek: (a) makro gözeneklilik kümesini gösteren göbek bölgesinin makroskobik bir x-ray görüntüsü; (b) jantın feder bölgesinde makro gözeneklilik görüntüsü; (c) makro gözeneklilik kümesinin iki boyutlu bir x-ray projeksiyonu.....	11
6. Bir jantın federinde bulunan hidrojen bazlı mikro gözeneklilik örnekleri: (a) ~460 µm çap, (b) ~370 µm çap ve (c) ~300 µm çap	12
7. Yönlü olarak katılaştırılmış Al 4,5 wt % Cu alaşımından elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, sayısal model tarafından tahmin edilen gözeneklilik yarıçapındaki varyasyonların soğuma hızının bir fonksiyonu olduğunun ifadesi.....	16
8. Soğutma hızı fonksiyonu olarak farklı ilk hidrojen konsantrasyonları için soğutma hızını dikkate alan gözenek yarıçapı değişimi	16
9. Soğuma hızının ve katılaşma süresinin SDAS üzerindeki etkisi.....	18
10. Soğutma hızının bir fonksiyonu olarak tanecik boyutu ikincil dendrit kol aralığı (SDAS) ve çekme dayanımı (UTS) değişimi.....	19
11. Farklı soğutma hızlarında (a) 2,3 K/sn, (b) 3,4 K/sn, (c) 9,8 K/sn ve (d) 24,1 K/sn alaşımların mikrografları	19

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
12. Soğuma hızının tanecik boyutuyla ilişkisi.....	20
13. Soğuma hızının bir fonksiyonu olarak kırılma sırasında deformasyon diyagramı..	21
14. Soğuma hızına bağlı olarak değişen SDAS diyagramı.....	21
15. Soğuma hızının bir fonksiyonu olarak toplam %5'lik elastik ve plastik deformasyondan sonra elde edilen mukavemet diyagramı	22
16. DAS ve soğuma hızı ilişkisi.....	22
17. Mikrosertlik ve soğuma hızı ilişkisi.....	23
18. Farklı soğutma hızlarında gözeneklerin şekli ve boyutu.....	24
19. Hesaplanan ve deneysel soğuma eğrilerinin karşılaştırılması	25
20. Soğutma hızının gözenek boyutu ve dağılımı üzerindeki etkisi: (a) Yüksek soğutma hızı (T=15,0 K/s); (b) Düşük soğutma hızı (T=2,0 K/sn)	25
21. Doldurma sıcaklığı şeması	26
22. Katılaşma süreci.....	26
23. Model simülasyonunda meydana gelen kusurlar	27
24. Dört kesit kalınlığına sahip A205-T7 kademeli dökümünün şematik görünümü: 2, 0.8, 0.5 ve 0.3 inç.....	28
25. Katılaşma süresi	28
26. Kademeli dökümün katılaşma oranı, toplam gözenekliliği ve mikro gözenekliliği	29
27. Katılaşma başladığında janttaki sıcaklık dağılımı	29

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
28.	Jantın ön yüzeyindeki artık gerilim dağılımları.....30
29.	Çalışma için tasarlanan basamak kalıbın teknik resmi33
30.	Katılma hızının etkisinin değerlendirileceği kesitin kalınlıkları33
31.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için; a) $t=600.5$ ms (8.58%), b) $t=2.2$ s (31.43%), c) $t=6.2$ s (88.57%) anlarında kalıp doluluk oranları.....34
32.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için $t=4.2$ s anında mutlak hız simülasyon sonucu.....35
33.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için başlangıç anında kesit boyunca sıcaklık değişimleri.....36
34.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için katılma tamamlandıktan sonra kesit boyunca sıcaklık değişimleri.....36
35.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için katılma sürecinde sıvı kalan bölgelerin kesit boyunca değişen oranları37
36.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için katılma süreci.....38
37.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca SDAS dağılımı39
38.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca porozite dağılımı40
39.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca çekme dayanımı dağılımı.....41
40.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca akma dayanımı dağılımı...41
41.	Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca çekme ve akma mukavemetinin SDAS ile ilişkisi.....42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
42. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için katılaşma sürecinde sıvı kalan bölgelerin kesit boyunca değişen oranları.....	43
43. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca SDAS dağılımı	43
44. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca porozite dağılımı.....	44
45. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca çekme dayanımı dağılımı	44
46. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca akma dayanımı dağılımı	45
47. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca çekme ve akma mukavemetinin SDAS ile ilişkisi.....	45
48. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için katılaşma sürecinde kesit boyunca sıvı kalan bölgelerin değişen oranları.....	46
49. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca SDAS dağılımı.....	46
50. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca porozite dağılımı	47
51. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca çekme dayanımı dağılımı.....	47
52. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca akma dayanımı dağılımı	47
53. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca çekme ve akma mukavemetinin SDAS ile ilişkisi.....	48



KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
A356	Alüminyum alaşımının ticari adı
Al	Alüminyum
Al-Si	Alüminyum silisyum alaşımı
Cu	Bakır
DAS	Dendrit kol uzunluğu
ECC	Ötektik hücre sayısı
Fe	Demir
Mg	Magnezyum
MPa	Mega Pascal
Ms	Milisaniye
OEM	Orijinal ürün üreticisi
S	Saniye
SDAS	İkincil dentrit kol uzunluğu
Si	Silisyum
Sr	Stronsiyum
T	Zaman
T6	Yapay yaşlandırma yöntemi ile ısıtılma işlemi
Wt	Ağırlık
UTS	Maksimum çekme mukavemeti

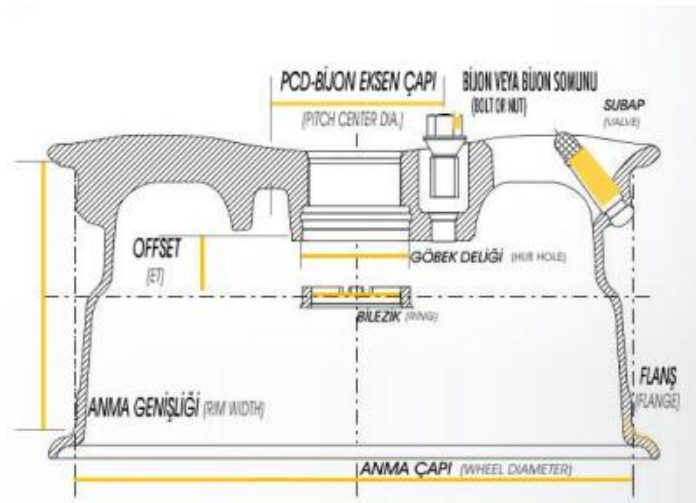


1. GİRİŞ

Jant, tüm araç ağırlığını taşıdığı ve aynı zamanda aracın birincil süspansiyon sistemi olarak hareket ederek/davranarak bir yastıklama etkisi sağladığı için herhangi bir aracın en önemli bileşenidir. Aracın fren sistemini doğrudan etkiler. Jant; tork transferinin sağlanması ve yük dengelemenin yanında, yoldan kaynaklanan darbeleri de sönümlemektedir. Jantın ağırlığı, tasarımı ve ölçüleri otomobilin performansını etkilemektedir. Şekil 1’de, alüminyum alaşımlı jant örneğinin bir görseli yer almaktadır. Şekil 2 ise kesit detaylarının adlandırılmalarının gösterimidir.



Şekil 1. Alüminyum alaşımlı jant görseli (CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş., 2023).



Şekil 2. Alüminyum alaşımlı jant kesiti (CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş., 2023).

Jantın tasarımı kadar seçilen malzeme, malzeme parametreleri ve bu parametreler arasındaki ilişkiler de dikkate alınmalıdır. Üretiminde kullanılan malzemeye göre çelik, alüminyum ve karbon fiber jantlar yoğunluktadır. Alüminyum alaşımlı jantlar, çelik jantlara göre daha hafif oldukları ve daha iyi ısı iletkenliğine sahip oldukları için günümüzde en büyük pazar payına sahiptir.

Günümüzde otomotiv ana sanayi ve yan sanayi üreticilerinin en önemli hedefi düşük yoğunluklu, hafif ve mukavemeti yüksek alaşımlar kullanılarak az yakıt tüketen ve güvenlik seviyesi yüksek parçaları üretmek ve geliştirmektir. Maliyeti, kolay işlenebilirliği, korozyon direncinin yüksek oluşu ve geri dönüşümlü malzeme olması yönünden avantajları düşünüldüğünde alüminyum ön plana çıkmaktadır. Hem kolay işlenebilirlik özelliği sayesinde estetik görünüş açısından avantajlı olması hem de darbe emme özelliğinin yüksek olması nedenleriyle alüminyum alaşımlar tercih edilmektedir (Başer, 2012).

Malzemenin tane boyutları ve bu boyutların kesitleri boyunca dağılımları, intermetalik bileşen miktarı, malzeme içindeki süreksizlik miktarı ve ötektik yapı modifikasyon seviyesi gibi faktörlerin etkilediği döküm kalitesi, iyi mekanik özellikleri elde etmek için kontrol altında tutulmalıdır. Alüminyum alaşımlı jant üretiminde kullanılan alçak basınçlı sabit kalıba döküm metodunun, kum kalıba döküm metoduna göre daha hızlı katılaşma sağlama avantajı sayesinde, alçak basınçlı sabit kalıba döküm metodu daha iyi mekanik dayanım özellikleri gösterir. Alçak basınçlı döküm yöntemi, seri üretim kolaylığı ve maliyet avantajı sağlamasıyla tercih edilmektedir (The Aluminium Automotive Manual, 2002). Aynı zamanda; alçak basınçlı döküm yöntemi yüksek hassasiyet, düşük porozite, az atık ve kaliteli yüzey bitişi gibi avantajları sayesinde tercih edilir (Bonollo et al., 2006). Düşük basınçlı dökümde yüksek basınçlı döküme göre daha düşük basınçlarla çalışıldığı için, kalıp ömrü ve işlem maliyetleri açısından çeşitli avantajlara sahip olması nedenlerine bağlı olarak düşük basınçlı döküm özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir.

Çok ağır jantların kullanımında aracın performans kaybı yaşayacak oluşu ve çok hafif ya da zayıf jantların kullanımındaysa yapısal arıza riski bulunması nedenlerine bağlı olarak, rekabetçi jant tasarımında güç ve ağırlık arasındaki denge kritiktir. Jantın bir güvenlik parçası oluşu, mekanik özelliklerin kontrolünü önemli kılmaktadır. Orijinal ürün üreticilerinin (OEM) şartnamelerinde, parçalardan alınan örneklenmiş test bileşenlerinde elde edile minimum değerlerin yer aldığı mekanik özellik gereklilikleri paylaşılır. Jant üreticileri, seri üretimi

öncesinde proje planına uygun şekilde şartname gerekliliklerini dikkate alarak ürünü ve prosesi tasarlamak ve belirlenen performans testlerini başarıyla tamamlamak zorundadırlar.

Kalite performans test detayları aşağıda detaylı olarak paylaşılmıştır.

- i. Mekanik testler: 13° darbe testi, radyal yorulma testi, 90° darbe testi, ZWARP yorulma testi, çift eksenli dinamik yorulma testi, flanş dik deformasyon testi, dinamik yorulma testi.

Aracın kullanımı sırasında malzemenin yorulması veya jantın bir darbe görmesi durumunda; jant, kazaya sebebiyet vermeyecek dayanıma sahip olmalıdır. Jantların tasarlandıkları araca uygun yorulma ve darbe dayanım karakteristiğine sahip olup olmadıklarını analiz etmek amacıyla mekanik test yöntemlerinden yararlanılır.

- ii. Metalürjik testler: Makroyapı analizi, mikroyapı analizi, optik emisyon kimyasal kompozisyon analizi, charpy darbe testi, sertlik testi, çekme testi.

Jantta hammadde olarak kullanılan alüminyum alaşımın kimyasal kompozisyonu ve döküm sonrası metalürjik özellikleri, jantın emniyetli olmasına etki eden önemli faktörlerdendir. Bu sebeple gerek kimyasal gerekse metalürjik yapılar analiz edilir.

- iii. Renk görsellik testleri: Boya parlaklık ölçümü (glossmetre), boya renk ölçümü (spektrofotometre), boya renk görsel kontrol analizi.

Jant için kullanılacak boyanın parlaklığı ve renk değeri, referans renk plakasına göre, hem görsel olarak hem de teknik ölçümlerle kontrol edilir.

- iv. Boya performans testleri: Boya kalınlık ölçümü, boya yapışma testi, boya sertlik ölçümü, düşük sıcaklığa dayanım testi, tuzlu sis testi, taş darbelerine dayanım testi, iklimlendirme testi, buhar püskürtme testi, CASS (Copper-chloride Accelerated Salt Spray) testi, boyaların kimyasal dayanım testleri, suya daldırma testi.

Jant için kullanılacak boyanın yol ve mevsim koşullarına dayanıklılığı, orijinal ürün üreticileri (OEM) tarafından talep edilen kalite şartnameleri referans alınarak test edilmektedir.

v. Boyutsal ölçümler: Boyutsal ölçüm, yüzey pürüzlülük ölçümü.

Jantların tasarlandıkları boyutsal ölçülere ve yüzey hassasiyet değerlerine olan uygunluğunun güvence altına alınabilmesi için yapılan ölçümlerdir (CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş., 2023).

Mekanik dayanımı yorumlayabilmek için, katılaşma hızının etkisini iyi anlamak gerekmektedir. Katılaşma hızı, bir malzemenin sıvı halden katı hale geçme sürecinin hızını ifade etmektedir. Bu süreç, malzemenin soğumasıyla gerçekleşir. En uygun katılaşma hızı, alaşımın mikroyapısı ve mekanik özellikleri arasında dengeyi en iyi sağlayan hızdır.

Günümüzde zaman ve maliyet kaybını azaltmak adına, bilgisayar destekli mühendislik simülasyon programları yardımıyla ürün doğrulamaları yapılmaktadır.

Döküm alaşımını doldurma ve katılaştırma işleminin sıcaklık alanını ve gerilim alanını simüle edebilen Magma yazılımı, döküm işlemindeki kusurların oluşumunu ve dağılımını etkili bir şekilde tahmin edebilir (MAGMA, 2023). Böylece olası hatalar önceden gözlemlenebilir ve gerekli hazırlık planları yapılabilir. Çıktılar sayesinde, tasarımları optimize edilerek daha az prototipe gerek duyulmasına olanak sağlanır.

Proses kontrolünün daha iyi sağlanması yoluyla işleme kusurlarının miktarının azaltılmasıyla dayanıklılıktaki değişkenlik azaltılabilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Alüminyum alaşım jant üretiminde, üretilmiş aynı tasarıma sahip ürünlerin mekanik dayanımlarının kıyaslanabilmesinde döküm prosesindeki katılma hızı parametresinin iyi anlaşılması gerekir.

2.1. A356 Alaşım Alüminyum

Mükemmel dökülebilirlik, iyi işlenebilirlik, uygun yüzey kalitesi, düşük özgül ağırlık ve gaz çözünürlüğünün düşüklüğü özellikleriyle alüminyum alaşımları yaygın kullanım alanına sahiptir. Ayrıca, alüminyum alaşımları hafifliğinin yanı sıra düşük erime sıcaklığı, hidrojen haricinde diğer gazların ihmal edilebilir düzeyde eriyebilmesi ve iyi döküm yüzeyine sahip olması gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler, özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın bir kullanım alanı oluşturur. Al-Si alaşımlarına magnezyum (Mg) eklenmesi, ısıl işlem sonrası mukavemet artışını sağlar. Al-Si alaşımlarına Mg eklenerek birçok farklı süneklik ve dayanım kombinasyonu elde edilebilir. Bu alaşım sistemleri, yüksek dayanımın yanı sıra yüksek süneklik özelliğine sahip olduğu için özellikle otomotiv endüstrisinde, jant üretiminde tercih edilmektedirler. Al-Si alaşımlarının mekanik ve metalürjik özellikleri; tane arındırma prosesi, alaşım bileşimi ve oranları, besleme hızı ve katılma hızı gibi faktörlere bağlıdır (The Aluminium Automotive Manual, 2002).

Artan uygulama ve ürün sayısı, alüminyum alaşımlarının döküm endüstrisindeki başarısının en iyi kanıtıdır. Alüminyum alaşımlarının kullanımına ilişkin bilinen avantajlardan olan hafif ağırlık, iyi mekanik özellikler ve iyi korozyon direnci; yeni uygulamaların ve tasarımların geliştirilmesine de itici güç sağlar (Bonollo et al., 2006).

Döküm alüminyum-A356 alaşımı, en gelişmiş alüminyum alaşımlarından biridir. Bu şekilde adlandırılmasının arkasında düşük yoğunluğa sahip oluşunun ve mükemmel dökülebilirlik özellikleri sayesinde havacılık ve uzay uçuşu gibi birçok endüstriyel uygulamada ve otomotiv uygulamalarında yaygın olarak kullanılması yer alır (Zhang et al., 2008).

Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yakıt verimliliğini artırma ve çevresel düzenlemeleri karşılama gereksinimi, Al alaşımlarının araştırma ve geliştirilmesini yönlendiren sürekli artan bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkar.

Genellikle çeşitli döküm işlemleri ve son ısıl işlemler yoluyla üretilen motor ve şasi gibi otomotiv bileşenlerinde yaygın olarak kullanılan tipik bir Al-Si serisi alaşımı olan A356'nın mükemmel dökülebilirlik ve mekanik dayanım özelliklerine sahip olması; bu alaşımı, ağırlık azaltma yoluyla enerji verimliliği ile ilgili çevresel sorunları etkin bir şekilde ele almak için üstün bir malzeme yapmaktadır (Lee, 2013).

Otomotiv endüstrisi, çelik ve dökme demirden yapılan birçok bileşen için hafif alüminyum alaşım döküm parçaların artan kullanımına doğru ilerlemektedir. Örnekler arasında silindir kafaları, motor blokları, süspansiyon parçaları, fren parçaları ve jantlar bulunur. Jant örneği dikkate alındığında, dökme alüminyum alaşımları estetik görünüm ve tasarım esnekliğinde gelişmiş özellikler sunar (Zhang et al., 2005).

Otomobil jantları karmaşık bir geometriye sahiptir. Hafif ağırlıklar, yüksek dayanıklılıklar, iyi yorulma ömürleri ve görsel olarak estetik olmaları gibi birden fazla tasarım kriterini yerine getirmelidir. Otomobillerde yakıt verimliliği için süspansiyon sistemi dışındaki dönen bileşenlerin ağırlığının düşük tutulması kritiktir; bu nedenle jantlar için şu anki tercih malzemesi dökme alüminyum alaşımlarıdır. Ancak, katılaşma sırasında oluşan gözenekler, artık gerilmeler ve hizmet yükleriyle birleşerek bu kritik parçanın yorulma ömrünü azaltabilir. A356 alüminyum alaşımı ile dökülen ve T6 işlemi uygulanan jantlar, bu kriterleri yerine getirir. Bu tür jantlar genellikle alçak basınçlı döküm ile üretilir, ardından T6 işlemi öncesinde kaba işleme tabi tutulur. Isıl işlem yapıldıktan sonra, son işleme işlemleri boyutsal gereksinimleri karşılamak için yapılır ve istenen renk ve yüzey bitimini vermek için çok aşamalı bir boya işlemi kullanılır. Her bir işlem adımı (döküm, ısıl işlem ve kaba/son işleme), özellikle yorulma ömrü açısından parçanın hizmet içi performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Döküm sürecindeki katılaşma davranışı, başlangıç mikroyapısını ve kusur dağılımlarını tanımlar. Isıl işlem sırasında kısmen homojenleşen mikrosegregasyon, akma dayanımını azaltabilir ve bu da yorulma ömrünü azaltabilir. Yüzeye yakın veya yüzeyde oluşan gözenekler, nihai bileşende çatlak başlatıcıları olarak işlev görebilir (Li et al., 2007a). Gözeneklerin boyutları, jantın yorulma performansı üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir (Li et al., 2007b).

Alaşımların dayanıklılığı ve sertliği genellikle mikroyapılarına bağlı olduğundan, alüminyum A356 alaşımının mekanik özelliklerini artırmak için dökümlerin mikroyapısını rafine etmek (inceltmek/arındırmak) önemlidir (Yang et al., 2005; Liao et al., 2002).

Mikro gözenekler ve mikrovoidler gibi döküm kusurlarının oluşumu, geleneksel döküm işlemleri sırasında kaçınılmazdır ve bu tür kusurlar döküm parçalarının mekanik özelliklerini düşürerek kalite açısından geniş sapmalara neden olmaktadır (Lee, 2013).

Birçok endüstriyel uygulamada yüksek düzeyde mekanik özellikler gereklidir, bu nedenle bu alayımın performansı birçok mikro mekanik araştırmanın konusu olmasında etkin rol oynamaktadır (Yang et al., 2005; Gokhale et al., 2005). İşlem kontrolünün daha iyi sağlanması yoluyla işleme kusurlarının miktarının azaltılmasıyla dayanıklılıktaki değişkenlik azaltılabilir (Gokhale et al., 2005).

2.2. Alçak Basınçlı Döküm Yöntemiyle Alüminyum Alaşımli Jantların Üretimi

Montaj işlemlerini ve bağlantı noktalarını azaltarak daha az hata riski ve daha yüksek üretim verimliliği sağlayan alçak basınç dökümü, karmaşık parçaların tek bir döküm işlemiyle üretilmesine olanak tanımaktadır.

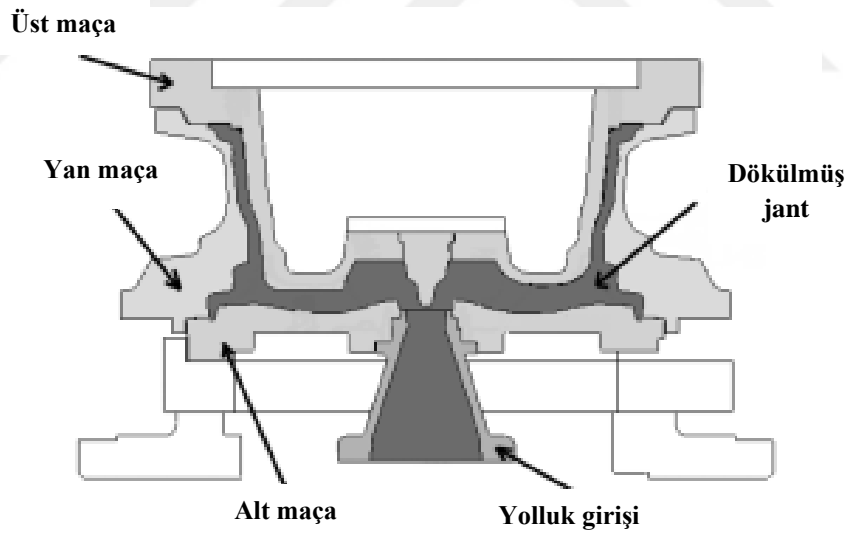
Alçak basınç dökümü, karmaşık şekilli ve yüksek kaliteli döküm parçalarının seri üretiminde tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Topçuoğlu vd., 2014). Alçak basınçlı döküm, yüksek basınç döküm (yüksek basınçlı döküm) ve yerçekimi dökümünün (kumlama dökümü) arasında bir yer tutan, etkili bir metal döküm prosesidir. Bu yöntemle, endüstride genellikle otomotiv, havacılık, savunma, elektrik ve elektronik gibi sektörlerde kullanılan parçalar üretilmektedir.

Döküm malzemelerde iyi mekanik özellikleri elde etmek için yüksek kalitede döküm yapmak önemlidir. Döküm kalitesi, malzeme içindeki süreksizlik miktarı, tane boyutları ve bu boyutların kesit boyunca dağılımı, ötektik yapı modifikasyon seviyesi ve intermetalik bileşen miktarı gibi faktörlerle tanımlanmaktadır. Alüminyum jant üretiminde kullanılan alçak basınçlı sabit kalıba döküm metodu, kum kalıba döküm metodundan daha hızlı katılaşıma sağlamaktadır, bu nedenle ötektik modifikasyon daha etkili bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu sebeple, alçak basınçlı sabit kalıba döküm metodu, kum kalıba döküm yöntemiyle üretilen ürünlere kıyasla daha iyi mekanik özellikler sergilemektedir. Bu yöntem, seri üretim kolaylığı ve maliyet avantajı sağlamaktadır (The Aluminium Automotive Manual, 2002). Alçak basınçlı döküm yöntemi yüksek hassasiyet, düşük porozite, az atık ve kaliteli yüzey bitişi gibi avantajları sayesinde tercih edilmektedir.

Alüminyum alaşımları için alçak basınçlı döküm yöntemi yüksek verimlilik, operasyonel parametrelerin mükemmel kontrolü, iyi metalürjik ve teknolojik kalite gibi birçok avantaja sahiptir (Bonollo et al., 2006). Özellikle otomotiv sektöründe, jant üretiminde alüminyum alçak basınçlı döküm prosesi yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alçak basınç döküm yöntemi, sıvı madenin yüzeyine kontrollü bir şekilde basınç uygulaması ile kalıbın altında bulunan hava basıncı kontrollü bir pota içinde yer alan sıvı madenin riser tüp olarak adlandırılan dikey yolluk boyunca yükselerek kalıbı doldurmasına dayalı bir döküm yöntemidir.

Yüksek kaliteli jantları düşük maliyetle etkin bir şekilde üretebilme yeteneğine sahip olması nedeniyle, alüminyum alaşımlı jantların en yaygın üretimi alçak basınçlı döküm işlemiyle başlar. Tipik bir alçak basınçlı dökümü; döküm makinesi ve elektrikle ısıtılan bir depolama fırını üzerinde bulunan iki kalıp boşluğu içeren bir kalıp montajından oluşmaktadır. Her kalıp boşluğu geometrik olarak karmaşık bir yapıya sahiptir. Şekil 3'te alt maça, iki yan maça ve üst maça olmak üzere 4 bölümden oluşan bir örneği yer almaktadır (Zhang et al., 2005).

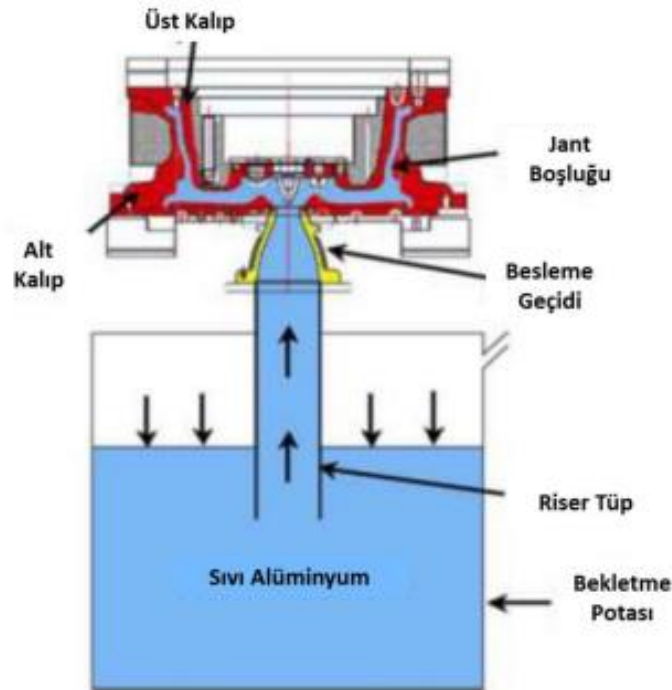


Şekil 3. Alçak basınçlı döküm işleminde kullanılan kalıbın bölümleri (Zhang et al., 2005).

Şekil 4'te şematik olarak gösterildiği gibi bir veya daha fazla kalıp parçasını içeren bir kalıp montajı, elektrikle ısıtılan bir fırının üzerinde bulunan ve erimiş metal rezervuarı içeren bir fırını içermektedir. Döküm işlemi döngüsel olarak gerçekleşmektedir. Döküm döngüsü, kalıp kapatıldığında, döküm boşluğunu oluşturarak başlamaktadır. Fazla basınç, depolama fırınında bulunan sıvı alüminyum kalıp boşluğuna birleşim borusu yardımıyla itmektedir.

Basınç yardımıyla sıvı metalin kalıp içindeki tüm boşlukları tam olarak doldurması sağlanmaktadır. Alüminyum ısı, kalıba ve ardından çevresindeki ortama veya önceden belirlenmiş soğutma döngüleri ile kalıptan geçen soğutma ortamına (hava veya su) transfer edilerek döküm katılaşmaktadır (Shi, 2012).

Katılaşma tamamlandıktan sonra, yan kalıplar açılır ve üst kalıp dikey olarak yukarı kaldırılır. Jant, üst kalıba termal büzülme nedeniyle sabitlenir ve kısa bir süre sonra üst kalıp altına yerleştirilmiş bir transfer tepsiye atılır. Ardından kalıp kapanır ve döngü tekrar başlar. Katılaşma sırasında soğutma hızlarının kontrolü, ürün kalitesi için önemlidir. Alt kalıpta, döküm döngüsü boyunca iç kanallardan hava zorlanarak soğutma artırılabilir. Üst kalıpta ise soğutma, dış yüzeyin farklı bölgelerine yönlendirilen hava jetleriyle kontrol edilebilir. Yan kalıplarda, soğutma hızını döküm koşullarına göre yavaşlatmak veya hava soğutması eklemek gibi yöntemler kullanılabilir (Zhang et al., 2005).



Şekil 4. Alçak basınçlı döküm işleminde kullanılan kalıbın şematik gösterimi (Topçuoğlu vd., 2014).

Döküm işleminden sonra, dökümler genellikle ham işlenir, ısıl işlem görür, bitirilir ve boyanır. Döküm sırasında ilerleyici katılaşma sağlanamazsa, sıvı metal bölgeleri katı metalle çevrilebilir. Bu, katıdan sıvıya faz değişimi sırasında meydana gelen hacim büzülmesini telafi etmek için gereken sıvı metal akışını keser. Bu sıvı metal cepleri makro porozite oluşumuna

neden olur, bu durum da makro porozitelerin konumlarına ve boyutlarına bağılı olarak döküm kusurlarına yol açabilir (Shi, 2012).

Otomotiv jantları, araçta kritik bir güvenlik bileşenidir ve bu nedenle teknolojik özellikler konusunda sıkı gereksinimleri karşılamalıdır. Alüminyum jantların alçak basınçlı döküm tekniğiyle üretim sürecindeki döküm hataları, bileşenin hem statik hem de döngüsel direncini azaltmada yüksek etkiye sahip olduğundan doğru bir şekilde göz önünde bulundurulmalıdır. Poroziteler gibi döküm hataları yorulma çatlak oluşumuna neden olabileceği gibi yorulma ömrünü de ciddi şekilde etkiler (Tebaldini et al., 2017).

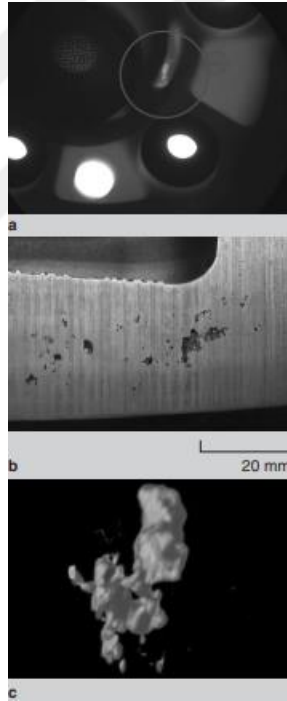
Ürünlerin karmaşık geometriye sahip olduğu ve ince kesitli olduğu döküm süreçlerinde, sıvı madenin soğumadan kalıbın tamamen doldurulması için metal akışı kritiktir. Döküm akışkanlığı, sıvı madenin belirlenen işlem koşullarında bir kalıbı ne kadar etkili bir şekilde doldurabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, üretimde akışkanlık testleri sıkça kullanılır. Aynı şekilde, kullanılan kalıpların sıvı madenle temas ettiği yüzeyindeki kaplamalar hem sıvı madenin akışını desteklemeli hem de dökümden sonra elde edilen nihai ürünün kalıp yüzeyinden deformasyon olmadan ayrılmasını sağlamalıdır. Akışkanlık testleri ile yüzey pürüzlülüğü testleri bir arada değerlendirildiğinde, daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olan kalıp kaplama malzemelerinin sıvı maden akışının daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Süreç gereksinimlerine göre, özellikle kalıp sıcaklıkları ve kalıp kesiti dikkate alınarak sürece uygun kaplama malzemesi seçilmelidir. Ardından bu gereksinimleri destekleyecek şekilde uygulama yapılmalıdır (Topçuoğlu vd., 2014).

Bir güvenlik parçası olarak jant için çekme, darbe ve yorulma direnci açısından son derece sıkı kontroller gereklidir. Aynı zamanda tasarım unsuru olarak da kullanılan jantlarda estetik görünüm de çok önemlidir. Darbe direnci ve yorulma dayanıklılığı gibi performansların doğrulanması amacıyla gerçek bileşenler üzerinde özgül testler yapılır, böylece jantın standart kullanım sırasında uygulanan farklı türdeki gerilmeleri simüle edilebilir (Tebaldini et al., 2017).

Yorulma testlerinin yanı sıra, darbe testleri de genellikle seri üretim aşamasında hasarı değerlendirmek ve ağır çalışma koşullarında başarısızlık ve çatlama olasılığını ortadan kaldırmak için yapılır. Darbe performansı; jantın kesit modülü, yapısal rijitliği, uzama ve darbe direnci gibi malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle malzemenin mikroyapısı ve

homojenliği, aynı zamanda gözeneklilik ve oksit gibi kusurlar göz önünde bulundurulmalıdır (Zhang et al., 2005).

Herhangi bir üretim sürecindeki kusurlar, o süreçte var olan toleranslara bağlı olarak değişkenlik gösterir. Üretim sürecinin bir özelliği olarak; varlığında, ürünün mevcut montajı karşılayamamasına neden olduğu zaman bir kusur haline gelir. Mekanik kriterleri karşılayamama durumunda, jantın ve kalıp parçalarının yeniden tasarlanmasına yol açar; bu da son derece maliyetli bir süreçtir. Döküm işleminin birçok özelliği, jantın kalite kontrol standardını karşılayamamasına yol açabilir. Buna örnek olarak, büyük gözeneklilik ve mikro gözeneklilik verilebilir. Büzülme porozitesi ya da makro porozite, katıdan sıvıya hal dönüşümüyle ilişkili hacimsel büzülmenin dengelemesi için yeterli miktarda sıvı madenin beslenmediği bölgelerde oluşur. Şekil 5'te, jantın göbek ve feder bölgesinde makro porozite kümelerinin bir örneği yer almaktadır.

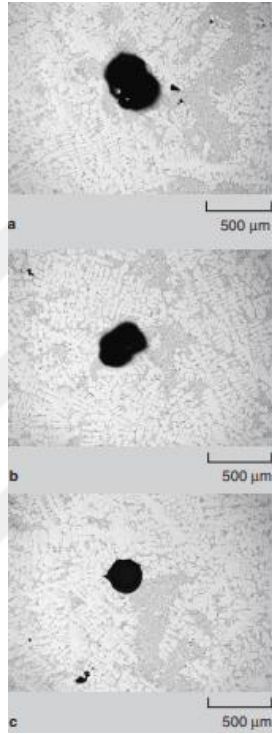


Şekil 5. Bir jantın yapısındaki makro gözeneklilik kümelerine bir örnek: (a) makro gözeneklilik kümesini gösteren göbek bölgesinin makroskobik bir x-ray görüntüsü; (b) jantın feder bölgesinde makro gözeneklilik görüntüsü; (c) makro gözeneklilik kümesinin iki boyutlu bir x-ray projeksiyonu (Zhang et al., 2005).

Yönlü katılaşmanın kaybedilmesi sonucunda sıvının katı tarafından sarmalanmasıyla oluşan makro porozite; yük taşıma, yorulma ve darbe performansını büyük ölçüde etkiler. Alçak basınçlı döküm proseslerinde bilgisayar tabanlı simülasyonlar kullanılmasıyla; kalıpların uygun

bir şekilde tasarlanmasına, yönlü katılaşmanın sağlanmasına ve böylece makro gözenekliliğin önlenmesine olanak tanınır. Jant döküm proseslerinde, özellikle kontrol altına alınması zor olan ve hidrojen bazlı gözeneklilik olarak adlandırılan mikro porozite ise, çap olarak nispeten küçük ölçeklidir ($< \sim 300 \mu\text{m}$) (Zhang et al., 2005).

Şekil 6'da, bir jantın federinde bulunan hidrojen bazlı mikro gözeneklilik örnekleri yer almaktadır.



Şekil 6. Bir jantın federinde bulunan hidrojen bazlı mikro gözeneklilik örnekleri: (a) $\sim 460 \mu\text{m}$ çap, (b) $\sim 370 \mu\text{m}$ çap ve (c) $\sim 300 \mu\text{m}$ çap (Zhang et al., 2005).

2.3. Soğuma Hızı ve Katılaşma Hızı İlişkisi

Soğuma oranı, eriyiğin katı hale geçmesi için gereken süreyle ilişkilidir. Mikroyapıdaki değişiklikler, erimiş metalin farklı soğuma hızları tarafından tetiklenmektedir. Yüksek bir soğuma hızı ve bununla ilişkili kısa bir katılaşma süresi, daha ince bir mikroyapının oluşmasına, daha fazla çözünen çözünürlüğü elde edilmesine olanak tanımaktadır. Alüminyum alaşımlarının hızlı katılaşması, mevcut alüminyum alaşımlarına mukavemet veya yorulma gibi mekanik özelliklerde iyileştirme sağlayarak önemli bir katma değer sunmaktadır. Alüminyumun özelliklerini iyileştirmenin yolları arasında alaşım elementlerinin içeriğinin

arttırılması, alaşımın homojenliğinin ve mikro veya nano kristal yapıların geliştirilmesi yer almaktadır. Eriyiğin farklı soğuma hızları, mikroyapıdaki değişikliklere neden olmaktadır. Soğuma hızı ne kadar yüksek olursa, mikroyapı o kadar ince ve böylece mekanik özellikler o kadar iyi olur (Katgerman and Dom, 2004).

Soğuma hızı, katılma mekanizmasını ve kritik katılma oranı değerini etkileyen temel faktörlerden biridir (Çolak ve Kayıkçı, 2009).

Soğuma hızı, sıcaklık gradyanını ve katılma hızını etkileyebilme özelliğine sahiptir. Dökümlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde en önemli etkisi olan değişkenlerden biridir (Dobrzański et al., 2007; Hemanth et al., 2000; Zhang et al., 2007). Soğutma, döküm ürününün kalitesini belirleyen önemli faktörlerden biridir.

Soğutma hızını arttırmak katılma süresini azaltmaktadır (Hosseini et al., 2013). Katılma sırasındaki soğuma hızı yorulma ömrünü etkilemektedir (Zhang et al., 2000). Soğuma hızı, bir maddenin sıcaklığının ne kadar hızlı düştüğünü ifade ederken; katılma hızı, bir maddenin sıvı fazdan katı faza geçiş hızını ifade eder. Sıvıdan katı hale dönüşme sürecinde katılma meydana gelmektedir. Katılma hızı, bu dönüşümün ne kadar hızlı gerçekleştiğini belirlemektedir. Daha hızlı bir katılma hızı, daha çabuk katılan malzeme anlamına gelmektedir.

Artan soğuma hızıyla; katılmış yapılar önemli ölçüde rafine edilmektedir ve elementlerin katı çözünürlüğü artmaktadır. Ek olarak, ikinci faz parçacıklarının içeriği ve elementel mikrosegregasyonu azalmaktadır (Tang et al., 2019).

Soğuma hızı arttıkça dendrit kolu aralığı azalır ve mikro sertlik ile dayanıklılık buna paralel olarak artar (Zhang et al., 2008). Soğuma hızının alüminyum alaşımının katılma davranışına etkisi incelendiğinde, soğutma hızındaki artışın ikincil ara metal fazın arındırılmasına neden olduğu görülmektedir (Dutta and Rettenmayr, 2000).

A356 kum döküm alaşımının iletkenlik özellikleri üzerinde soğutma hızının etkisine baktığımızda, ısı ve elektrik iletkenliklerinin soğutma hızlarının artışıyla aynı anda iyileştiğini görürüz. Mikroyapı değerlendirildiğinde ise, soğutma hızı artışıyla büzülme kusurlarının ve gözenek kusurlarının azaldığı sonucu ortaya çıkmaktadır (Jeon and Bae, 2019).

Soğutma hızının artması, döküm halindeki alaşımların mukavemetini ve uzama özelliğini artırmaya yardımcı olmaktadır. Soğutma hızının artması, T6 işlem görmüş alaşımların mekanik özelliklerini, özellikle uzama ve akma dayanımı özelliklerini, döküm halindeki alaşımların özelliklerine göre daha belirgin bir şekilde iyileştirir. Soğutma hızı dendritlerin ortalama ikincil dendrit kol aralığının azalmasında etkilidir (Tang et al., 2019). Katılaşma sırasında soğutma hızına bağlı olan ikincil dendrit kol aralığı, mikroyapıyı doğrudan etkileyen faktörlerden biridir.

2.4. Katılaşma Hızı ve Mekanik Dayanım İlişkisi

Katı mekaniğinde, malzeme sertliği; deformasyona karşı direnç olarak tanımlanmaktadır. Mikroyapı ölçeği küçüldükçe, mekanik dayanım özellikleri artmaktadır (Zhang et al., 2008).

Eriyik halde bulunan metallerin ve alaşımların, üretim sırasında soğutulduklarında katılaşmaları beklenmektedir. Katılaşma süreci; ortaya çıkan mikro yapıyı ve dolayısıyla mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Katılaşma sonucunda oluşan iç yapı parça ömrü boyunca etkili olduğu için döküm kalitesini arttırmak adına katılaşma sürecinin çok iyi bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir (Smith, 2001).

Katılaşma süreci, başlangıçta hızlı soğuyan ince kesitlerde başlamaktadır ve bu sırada oluşan hacim azalması nedeniyle daha önce katılaşmamış olan kalın kesitlerdeki sıvı kalan bölgeleri beslemektedir. İyi bir kalıp tasarımı, katılaşmanın kalın kesitlerden ince kesitlere doğru kademeli olarak ilerlemesini sağlamalı ve son olarak katılaşan bölgelerin dışı açık olan yolluk ve besleyicilerde kalmasını garanti etmelidir (Aran, 1999). Katılaşma sırasında boşluksuz bir döküm elde edebilmek için metal yeterince beslenmelidir.

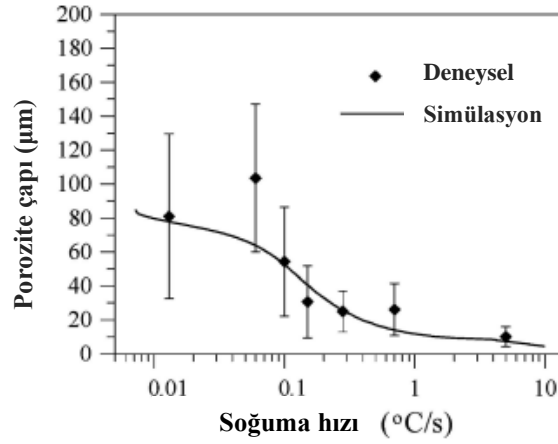
Metalürjik ve mikro mekanik yönlerden döküm alaşımlarının mukavemetini kontrol eden birçok faktör bulunmaktadır. Mukavemet yorumlanırken, katılaşma işlemi değişkenlerinin ilgili faktörler arasında önem düzeyinin yüksek olduğu bilinmektedir (Goulart et al., 2006). Genellikle bir metalin tane boyutunu azalttıkça mukavemetinin arttığı görülmektedir. Hall-Petch denklemi, akma dayanımının tane çapının karekökünün tersine orantılı olduğunu gösterir (Hall, 1951). Bununla birlikte, dökme metaller için mukavemetin azalan tane boyutuyla arttığını her zaman söyleyemeyiz. Yalnızca küçük tanelerin üretimiyle mikro gözenek miktarının, ikinci fazın hacim yüzdesinin veya dendrit aralığının artmadığı koşullarda; tane boyutunun küçültülmesiyle mukavemetin artacağını söyleyebiliriz (Osorio and Garcia, 2002).

Tane morfolojisi, katılma sırasındaki soğutma hızına bağı olarak değişkenlik gösterir. Katılma hızı, alaşımın mikroyapısı ve mekanik dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha hızlı katılma hızları, alaşımın mikroyapısında ince tane boyutları ve homojen bir yapı oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, alaşımın mekanik dayanıklılığının artmasına katkı sağlamaktadır (Zhang et al., 2008). Öte yandan, daha yavaş katılma hızları ile elde edilen döküm örneklerinde tane boyutları daha büyük ve düzensiz olmaktadır ve bu durum, alaşımın mikroyapısında boşluklar ve yabancı fazlar oluşmasına yol açabilir. Dolayısıyla, böyle durumlarda mekanik dayanıklılık olumsuz etkilenmektedir.

Geleneksel döküm teknikleriyle karşılaştırıldığında, hızla katılaştırılan döküm ürünlerinin daha ince taneler olması ve homojen mikroyapılara sahip olmaları nedenleriyle çok iyi bir mukavemete ve sünekliğine sahiptir. Döküm alüminyum alaşımlarının mikroyapısı geliştirilerek, yüksek sıcaklıkta mekanik performansın artırılabilceği görüşü mevcuttur (Mohandass et al., 2014).

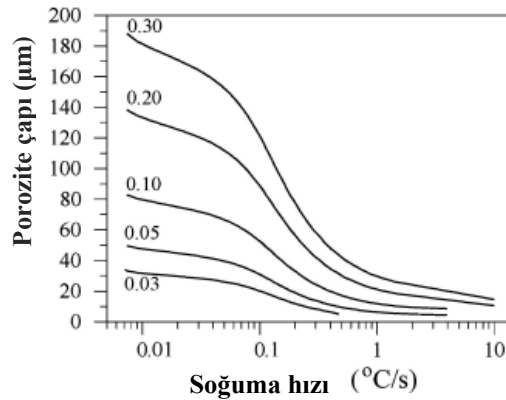
Gözenekliliğin mekanik özelliklere olumsuz etkisi, gözeneklerdeki gerilim konsantrasyonu ve yük taşıma alanının azalması nedeniyle ortaya çıkar. Artan gözenekliliğin başlıca etkisi, azalmış tokluk ve çekme mukavemetidir. İkinci fazın dağılımının kontrolü, bazı alaşımların mekanik davranışını optimize etmek için son derece önemlidir. Örneğin, bazı Al-Cu alaşımlarının tam potansiyeli, döküm sonrası ikinci fazın tamamen çözüme geçirilmesi ve ince bir şekilde yeniden çöktildiği noktada gerçekleşmeyecektir. Bu çözümlü elde etmek için başlangıçta çözünür ikinci fazın yeterince ince bir dağılımının bulunması gerekmektedir (Osorio and Garcia, 2002).

Mikro porozite, alaşımların yüksek sıcaklıkta katılması sırasında oluşan gözeneklerdir. Bu gözenekler, sıvı metalin yeterince beslenememesi, dendritik yapıların arasındaki akışın zorluğu, gazların sıvı metaldeki yüksek içeriği ve katı fazda düşük gaz çözünürlüğü gibi faktörlerin bir kombinasyonu nedenleriyle oluşur. Mikro poroziteler, soğutma hızının bir fonksiyonu olarak gözenek yarıçapındaki varyasyona karşılık gelmektedir. Kritik boyuttan büyük bir mikro porozite, gerilim oluşturarak erken çatlaklara neden olabilir (Melo, 2005). Şekil 7'de porozite yarıçapının soğutma hızına göre değişim grafiği yer almaktadır.



Şekil 7. Yönlü olarak katılaştırılmış Al 4,5 wt % Cu alaşımından elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, sayısal model tarafından tahmin edilen gözeneklilik yarıçapındaki varyasyonların soğuma hızının bir fonksiyonu olduğunun ifadesi (Melo, 2005).

Gözenek oluşumu için en önemli gazlardan biri hidrojendir. Tek başına düşük hidrojen içerikleri barındırmanın, gözenek bulundurmaya uygun dayanıma sahip dökümleri garanti etmediği; ancak hidrojen içeriğinin artan gözeneklilik seviyelerine yol açabileceği belirtilmektedir (Akhtar et al., 2009). Bu nedenle, hidrojenin alaşımların gözenek oluşumuna neden olan faktörler arasında yer aldığı ve gözenek oluşumunu önlemek için hidrojen konsantrasyonunun kontrol edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Belirli bir soğutma hızı için, hidrojen miktarı arttıkça gözenek boyutları ve hacim oranı artmaktadır. Ek olarak; aynı termal koşullar ve aynı alaşım için, hidrojen miktarı arttıkça gözenek boyutlarının arttığı söylenebilir. Bu durum, hidrojen konsantrasyonundaki artışın gaz basıncını artırması nedeniyle gerçekleşmektedir (Melo, 2005). Şekil 8'de belirli soğutma hızları için, hidrojen konsantrasyonunun etkisinden kaynaklı porozite yarıçapı değişikliği grafiği yer almaktadır.



Şekil 8. Soğutma hızı fonksiyonu olarak farklı ilk hidrojen konsantrasyonları için soğutma hızını dikkate alan gözenek yarıçapı değişimi (Melo, 2005).

2.4.1. Katılma hızı ve dendrit kol uzunluğu (DAS) & ikincil dendrit kol uzunluğu (SDAS) ilişkisi

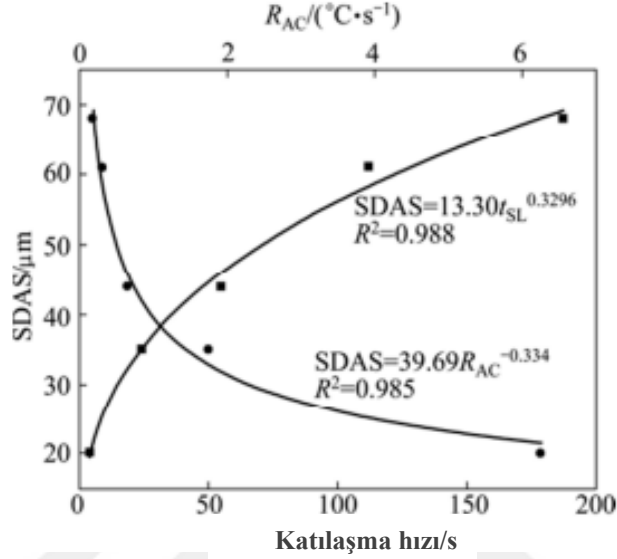
Metalik alaşımlarda bulunan dendritik yapıların birincil ve ikincil dendrit kolu aralıklarına bağlı olarak nihai ürünlerin mekanik özellikleri değişebilir (Melo, 2005).

Dendrit kol aralığının azaltılmasıyla mekanik özelliklerin iyileşeceği görölmektedir. DAS incelemesi, tane boyutuna kıyasla mekanik dayanımın yorumlanmasında daha önemlidir. DAS'ın iyileştirilmesi, mikrosegregasyonun daha kısa periyotlu olmasına yol açar. DAS ve katılma süresi arasında neredeyse lineer bir ilişki olduğu gösterilmiştir. Bir Al-%9 wt Si alaşımında katılma süresi 10 ile 100 saniye arasında arttığında DAS değerinin arttığı görölmüştür. Çekme mukavemeti, DAS'ın azalmasıyla doğrusal bir şekilde artmaktadır. Ancak akma mukavemeti, DAS'ın azalmasıyla belirgin bir iyileşme göstermemektedir (Goulart et al., 2006).

Döküm prosesi yüksek hacimli üretimler için oldukça rekabetçi olsa da, işlem parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesiyle gözeneklilik kontrol edilmezse mekanik özellikleri etkileyebilir. Dendrit kol aralığının (DAS), ikincil dendrit kol aralığının (SDAS), gözenekliliğin ve tane boyutunun azaltılması ve döküm mikroyapısının homojenliğinin artırılmasıyla mekanik özelliklerde gelişme sağlanabilmektedir. SDAS değerinin ve gözenekliliğin azaltılmasıyla mekanik özelliklerin iyileştirildiği görölmektedir (İrfan et al., 2012). Mikroporozitelerin dağılımı DAS değerinin azalmasıyla daha düzenli hale gelmektedir (Zhang et al., 2008).

Daha yüksek soğutma hızlarında, daha küçük boyutta daha fazla dendrit oluşur (Hosseini et al., 2013). Ayrıca, ikincil dendrit kol aralığı soğutma hızına çok duyarlıdır ve bir çalışmadaki çıktılarına göre; soğutma hızını 0.19'dan 6.25 °C/s'ye artırmak, SDAS değerini 68 µm'den 20 µm'ye düşürücü ve birincil dendritlerin hacim fraksiyonunu yaklaşık %5 azaltıcı etki yapmıştır. Bu durum da genişletilmiş madde beslemesi nedeniyle büzölme porozitesinin daha düşük ve daha homojen bir dağılımını sağlar. Ek olarak, yüksek soğutma hızlarının, ötektik silikonun lifli dallanmış morfolojisini değiştirmeye neden olduğu bulunmuştur. Yüksek soğutma hızları; Sr ile modifiye edilmiş alaşımlarda sadece ötektik silikону rafine etmekle kalmaz, aynı zamanda mekanik özellikler üzerinde daha büyük etkilere sahip olan ara metal fazları da rafine eder. SDAS değerinin soğuma hızıyla güçlü bir ilişkisi olduğunu kanıtlayan şekil 9'da görüleceği

gibi, SDAS'ın soğuma hızı ve yerel katılma süresiyle ilişkisi değeri $R^2=0,98$ olan iyi bir belirleme katsayısı ile sunulmaktadır. Bu durum, SDAS'ı teorik olarak da öngörmedeki güvenilirliğini kanıtlamaktadır (Chen et al., 2014).

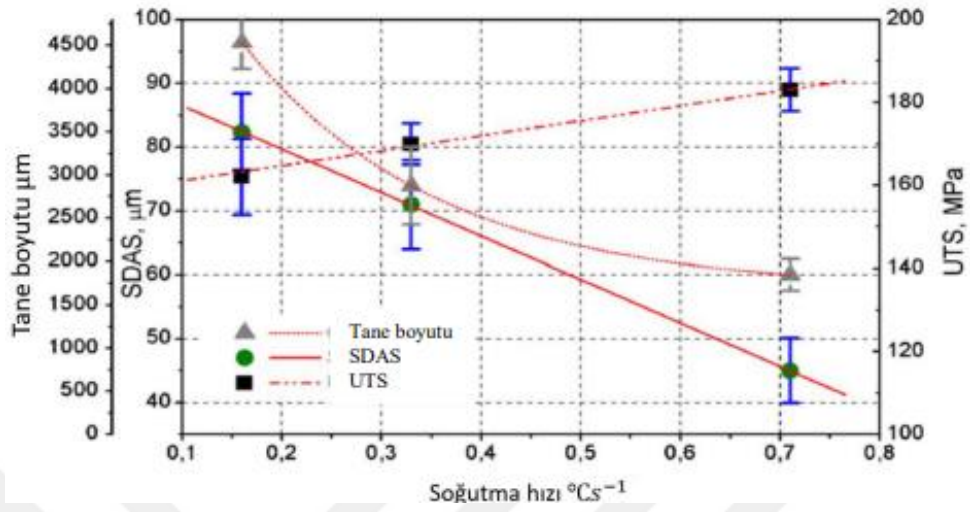


Şekil 9. Soğuma hızının ve katılma süresinin SDAS üzerindeki etkisi (Chen et al., 2014).

Dendrit kol uzunluğu (DAS), alüminyum alaşımlarının katılma sürecinde oluşan mikroyapının önemli bir özelliğidir. DAS, alaşımın soğuma hızına bağlı olarak değişebilir. Yani, katılma hızı, alaşımın mikroyapısını ve dolayısıyla DAS değerini etkiler. DAS ile soğuma hızı arasında ters bir ilişki olduğu belirtilmektedir (Zhang et al., 2008; Dutta and Rettenmayr, 2000). DAS değeri, alaşımın mikroyapısı üzerinde doğrudan etkili olup, daha küçük DAS değerleri genellikle daha ince ve homojen bir mikroyapıyı gösterirken (Zhang et al., 2008), daha büyük DAS değerleri daha kaba bir mikroyapıya işaret eder. Çünkü daha hızlı soğuma hızları, alaşımın sıvıdan katıya dönüşüm sürecini hızlandırır. Bu hızlandırılmış süreç, alaşımın mikroyapısının daha ince ve homojen olmasına yol açar, böylece daha küçük DAS değerlerini ortaya çıkarır. Daha yavaş soğuma hızları ise alaşımın katılma sürecini yavaşlatır ve daha kaba mikroyapının oluşmasına neden olur, böylece daha büyük DAS değerlerini ortaya çıkarır. Daha ince ve homojen mikroyapı, alaşımın mekanik dayanıklılığını artırabilirken, daha kaba mikroyapı mekanik dayanıklılığı olumsuz etkileyebilir. Bu nedenlerle, katılma hızı, alaşımın mikroyapısını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür.

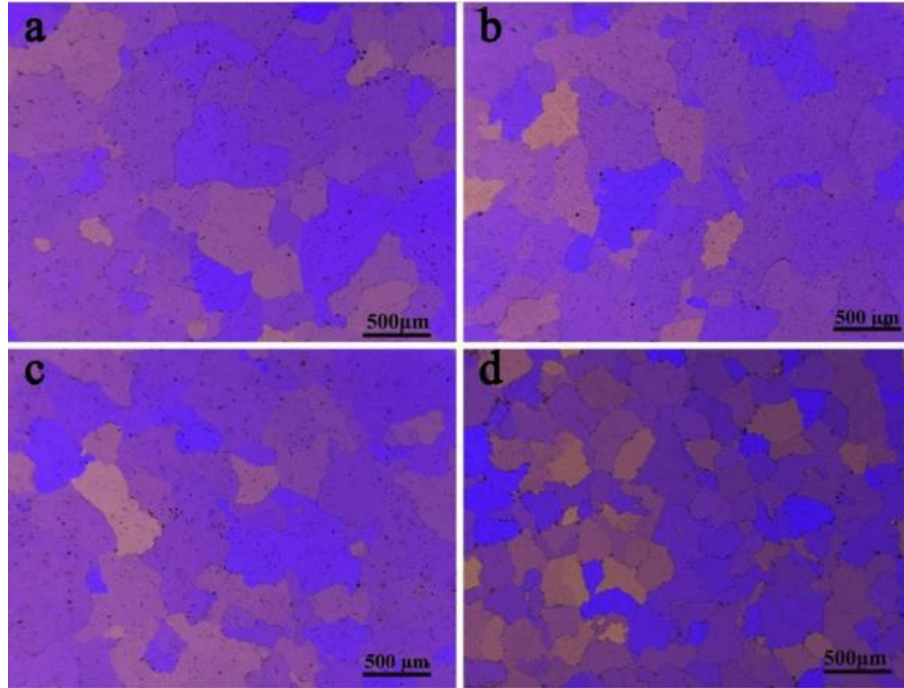
Soğutma hızındaki artış, tane boyutlarında ve SDAS değerlerinde azalmaya neden olmaktadır (Dobrzański et al., 2007). Şekil 10'da AlSi7Cu2 alaşımının soğuma hızının bir

fonksiyonu olarak tanecik boyutu ve ikincil dendrit kol aralığı (SDAS) değişimi yer almaktadır.



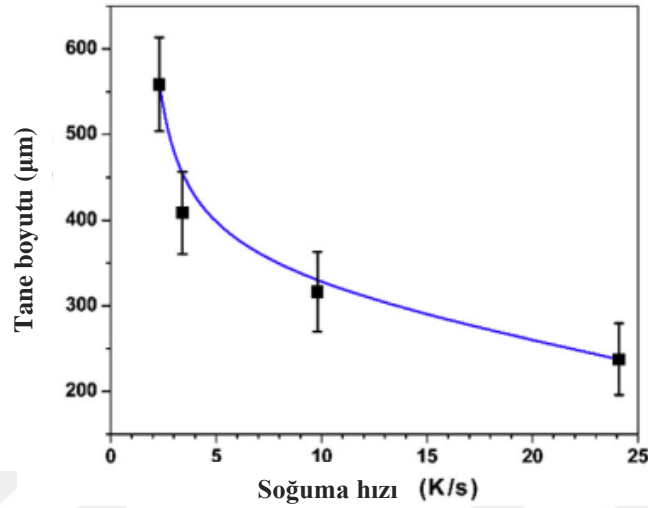
Şekil 10. Soğutma hızının bir fonksiyonu olarak tanecik boyutu ikincil dendrit kol aralığı (SDAS) ve çekme dayanımı (UTS) değişimi (Dobrzański et al., 2007).

Bir diğer örnek olarak, Şekil 11’de alaşımların farklı soğutma hızlarında değişen mikrofları yer almaktadır.



Şekil 11. Farklı soğutma hızlarında (a) 2,3 K/sn, (b) 3,4 K/sn, (c) 9,8 K/sn ve (d) 24,1 K/sn alaşımların mikrografları (Tang et al., 2019).

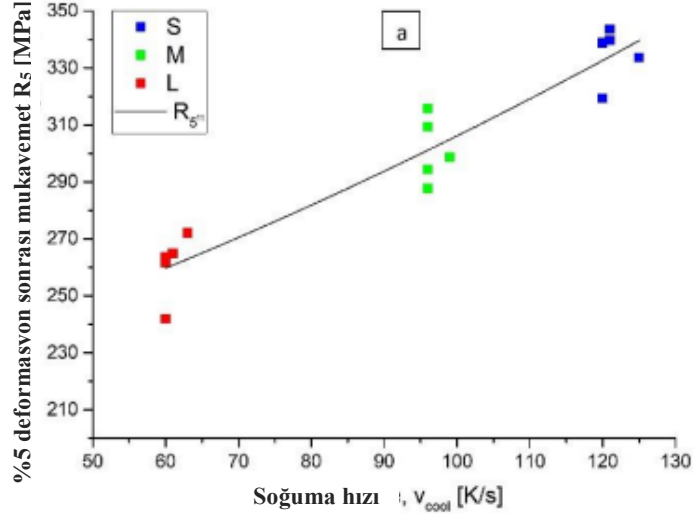
Şekil 12’de görülebileceği gibi, soğuma hızının artmasıyla tane boyutları önemli ölçüde azalmaktadır. İnce taneli alaşımlar için, dislokasyonlar daha fazla tane içinde hareket edebilir, bu durum da deformasyonu daha üniform hale getirir. Bu nedenle, stres konsantrasyonunun oluşması kolay değildir. Dolayısıyla süneklik artar. Ek olarak, tanelerin rafine edilmesi/arındırılması ile dağılımın daha homojen hale gelmesi de sünekliğin artmasına katkıda bulunmaktadır (Tang et al., 2019).



Şekil 12. Soğuma hızının tanecik boyutuyla ilişkisi (Tang et al., 2019).

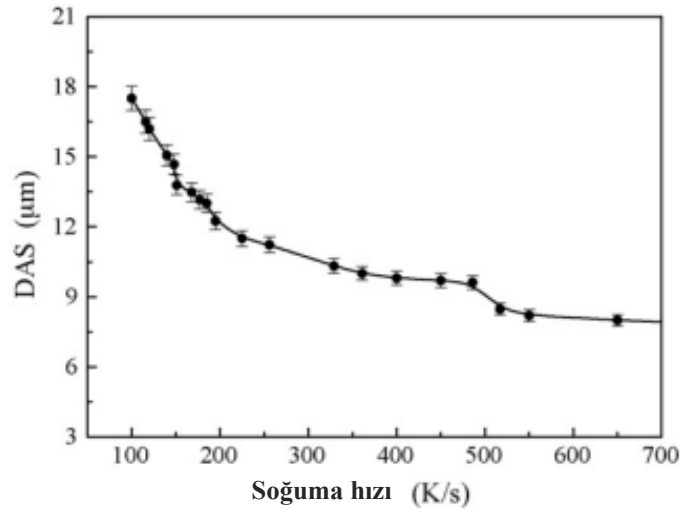
Katılaşma miktarı; mukavemet, sertlik, işlenebilirlik ile ilgili mekanik özellikleri kontrol eden mikroyapıyı yönlendirmektedir (Malik et al., 2020).

Mekanik özellikler, mikroyapısal bileşenlerin boyutuna veya soğuma hızlarına ve katılaşma parametrelerine doğrudan bağlıdır. Mikroyapısal incelemelerin ve basma testlerinin yapıldığı numunelerde, daha yüksek soğutma hızlarında katılaşan numunelerin daha yüksek dayanımlar sergilediği ve dolayısıyla daha kırılğan bir yapıya sahip oldukları görülmüştür. Ek olarak; yapılan simülasyonlara göre, kalıp sıcaklığının; dökümün soğuma hızı, katılaşma süresi ve termal modülü üzerinde önemli bir etkisi vardır. İkincil dendrit kol aralığı, soğuma hızının doğrudan bir sonucu olan mikroyapısal özelliklerden biridir. SDAS ölçümlerinin basma (sıkıştırma) testlerinden elde edilen mekanik özelliklerle karşılaştırılması sonucunda, ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin soğutma hızının artmasıyla azaldığı ve mekanik özelliklerin buna uygun şekilde arttığı görülmektedir. Şekil 14’ten anlaşılacağı gibi, ikincil dendrit kol aralığının (SDAS), soğuma hızı ile doğrudan ilişkilendirildiği görülmüştür. Soğuma hızının yaklaşık olarak 60 K/s ile 120 K/s arasında arttırıldığında, SDAS değerinin ortalama

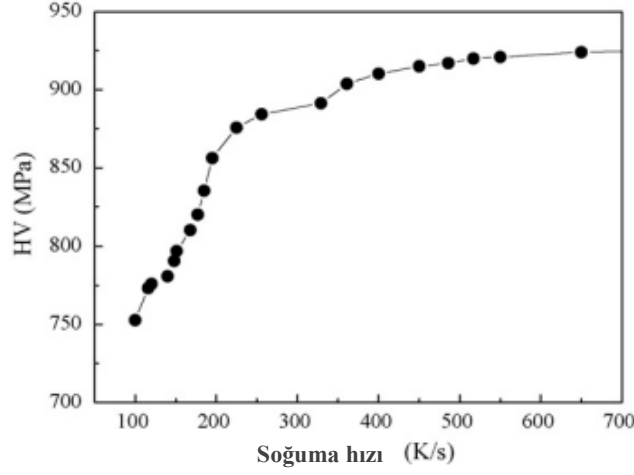


Şekil 15. Soğuma hızının bir fonksiyonu olarak toplam %5'lik elastik ve plastik deformasyondan sonra elde edilen mukavemet diyagramı (Žbontar et al., 2021).

A356'nın DAS ile soğutma hızı arasındaki ilişkisi teorik olarak da sonuçla uyumlu olduğu görülmüştür. Mikro sertlik, DAS'ın azaldığı durumda yani soğutma hızı arttığında artmaktadır. Bunun nedeni olarak, soğutma hızı artışıyla mikroyapının iyileşmesi olduğu düşünülmektedir. Şekil 16'da görüleceği üzere; DAS, soğutma hızıyla ters bir ilişkiye sahiptir. Genellikle hızlı bir soğutma hızı mikroyapıyı arındırmaktadır ve alaşım elementlerinin katı çözeltideki çözünürlüklerini arttırmaktadır. Soğutma hızı arttıkça, DAS azalır ve mikro sertlik ile dayanıklılık buna paralel olarak artar. Şekil 16 ile Şekil 17 beraber incelendiğinde, sertlik değerinin DAS'ın artmasıyla azaldığı sonucu çıkarılabilmektedir (Zhang et al., 2008).



Şekil 16. DAS ve soğuma hızı ilişkisi (Zhang et al., 2008).

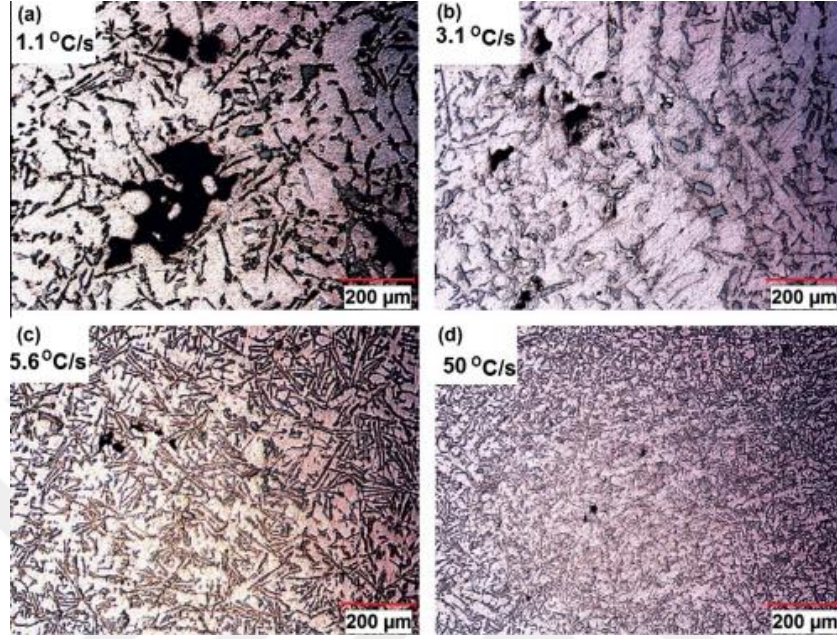


Şekil 17. Mikrosertlik ve soğuma hızı ilişkisi (Zhang et al., 2008).

Soğuma hızı, döküm alaşımlarının mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkileyen en önemli değişkenlerden biridir. Nihai çekme dayanımı, malzemenin dendrit kol aralığını (DAS) belirleyen soğutma hızına büyük ölçüde bağlıdır. Nihai çekme dayanımı DAS arttıkça azalırken ve ötektik hücre sayısı (ECC) arttıkça arttığı bulunmuştur (Hemanth et al., 2000).

Yüksek soğutma hızı, tane boyutunu azaltır, büzülme porozitesini azaltır ve porozitenin daha homojen dağılmasına neden olur. Soğutma hızının artmasıyla birlikte dendritler arası porozitelerin içeriği ve boyutu azalır, genel olarak porozite yüzdesinde düşüş görülür. Başka bir deyişle, daha yüksek soğutma hızında daha küçük boyutlu dendritler oluşur. Daha küçük dendritler de döküm ürününün büzülme porozitesini azaltmaktadır. Ayrıca, daha yüksek soğutma hızlarında dendritler arası bölgeler daha küçüktür, çünkü SDAS daha küçüktür (Hosseini et al., 2013). Bu nedenle gözenek büyümesi sınırlıdır. Azalan katılaşma süresiyle, hidrojenin katılaştan dendritten sıvıya yayılması için daha az zaman kalmaktadır. Bu nedenle, gaz gözenek büyüme hızı kısıtlanmış olur (Conley et al., 2000). Şekil 18’de, porozite boyutunun ve yüzdesinin soğutma hızıyla değişimi yer almaktadır. Daha yüksek soğutma hızlarında, dendritler arası bölgeler daha küçüktür. Soğutma hızı arttıkça dendritler ve tane sınırları arasındaki ayrışma azalmaktadır. Bu nedenle, çözünmeyen elementlerin miktarı azalmış olur. İkincil dendrit kolları arasındaki büzülme porozitesinin içeriği, bu bölgelerin nasıl beslendiğine bağlıdır. Dendritler arası bölgelerin beslenebilirliğinin artmasıyla porozite yüzdesi azalmaktadır. Ayrıca, erimiş metaldeki hidrojen atomlarının içeriği ve bunların katılaşma sürecinde salınımı, gaz porozitesinin oluşumu için önemli faktörlerdir. Eğer erimiş metal, dendritler arası bölgelerde akabiliyorsa porozitenin boyutu ve miktarı azalır. Bunun yanı sıra,

yüksek soğutma hızında, hidrojen atomlarının katı örgüden kaçıp moleküler hale dönüşmesi için yeterli zaman yoktur. Bu tür hatalar genellikle katılaştırmanın sonunda oluştuğundan, daha ince bir mikroyapı bu hataların dağılımını iyileştirmektedir (Hosseini et al., 2013).



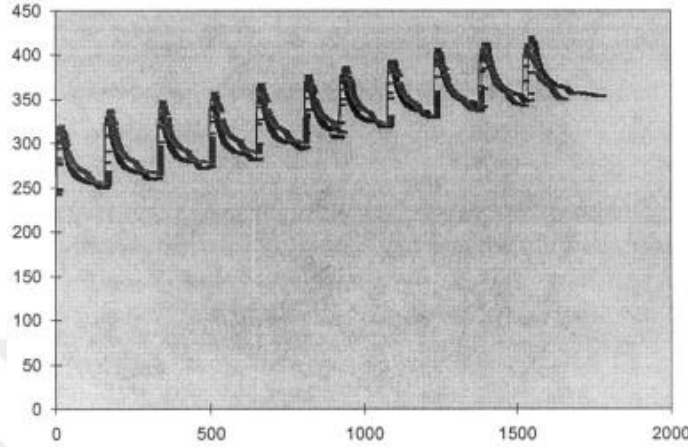
Şekil 18. Farklı soğuma hızlarında gözeneklerin şekli ve boyutu (Hosseini et al., 2013).

2.5. Katılma Hızı ve Mekanik Dayanım İlişkisinin Simülasyonlarla Doğrulanması

Dökümlerin belirli yerlerinde hapsolmuş gaz ve/veya büzülme gözeneklerinin varlığı yorulma ömrünü etkilemektedir. Bu mikro mekanik kusurlar, işleme koşullarına bağlı olarak bir dökümün hemen hemen her yerinde bulunabilir (Conley et al., 2000). Kusurların dökümlerinin yorulma ömrü üzerindeki eğilimleri belirlemek adına ilgili hatanın alanı ve serbest yüzeyden uzaklığı önemli faktörlerdendir (Seniw et al., 1997). Dökümün merkezinde yer alan yüksek düzeyde gözeneklilik, mekanik özellikleri veya yorulma performansını etkilemeyebilirken, bir yüzeye yakın daha küçük, izole edilmiş bir gözenek, önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, proses değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak bir dökümdeki mikro gözenekliliğin boyutunu, konumunu ve dağılımını öngörmek için kapsamlı bir model geliştirmek önemlidir.

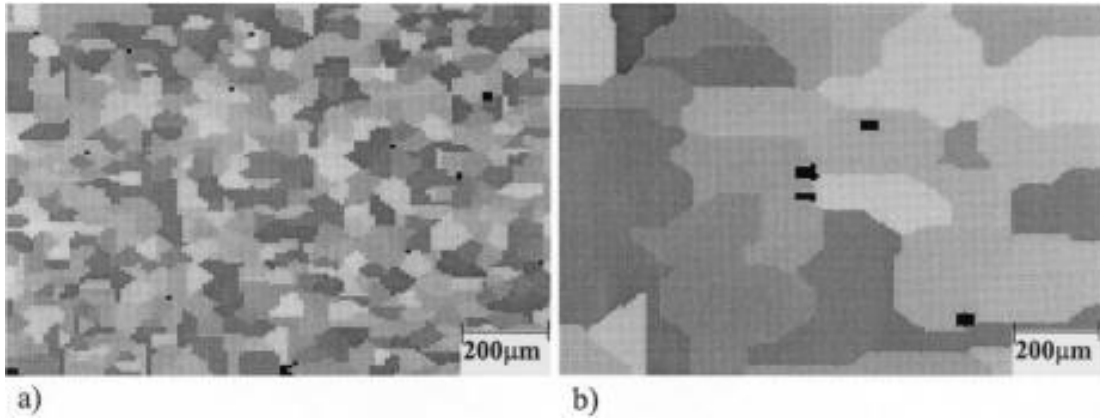
Ürün tasarımının erken aşamasında, döküm parçalarının statik ve dinamik mekanik performanslarını değerlendirmek için simülasyondan yararlanılabilir. Gözeneklilik öngörülleri

yapmak için, Magmasoft kullanılarak katılaşma sırasında farklı zaman adımlarında dökümdeki sıcaklık dağılımının elde edildiği bir çalışmada; Şekil 19'dan anlaşılacağı üzere simüle edilen ve deneysel olarak ölçülen değerler arasındaki mükemmel bir uyum bulunmaktadır (Conley et al., 2000).



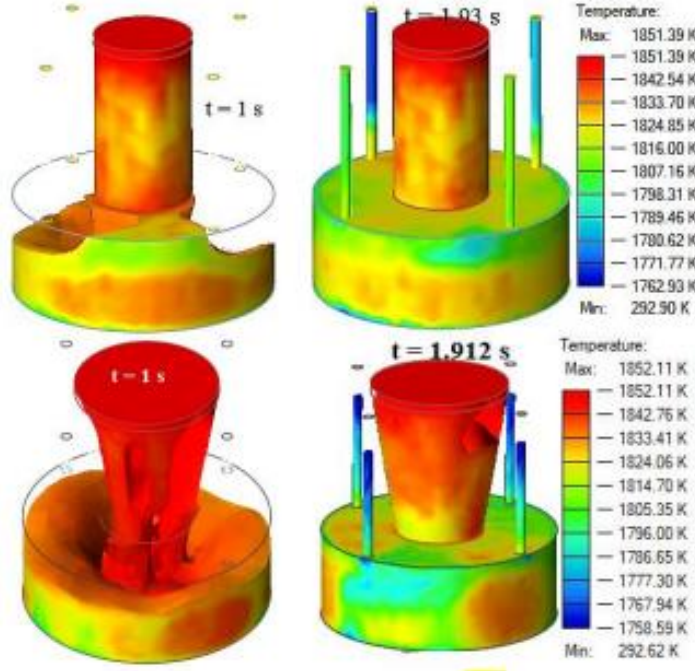
Şekil 19. Hesaplanan ve deneysel soğuma eğrilerinin karşılaştırılması (Conley et al., 2000).

Şekil 20'de, soğuma hızının gözeneklerin boyutlarına ve dağılımına etkisi yer almaktadır.



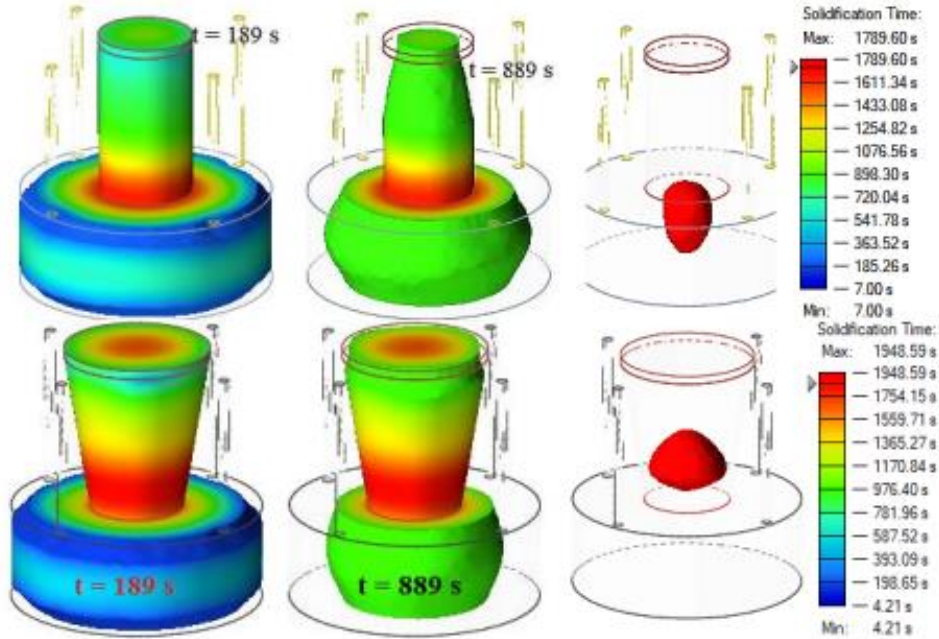
Şekil 20. Soğutma hızının gözenek boyutu ve dağılımı üzerindeki etkisi: (a) Yüksek soğutma hızı (T: =15,0 K/s); (b) Düşük soğutma hızı (T: =2,0 K/sn) (Conley et al., 2000).

Bilgisayar destekli döküm tasarımı ve simülasyon yazılımının döküm sürecine kullanılmasının temel amacı, dolun ve katılaşma süreçlerinde ısı transferi, akışkan akışı, mikroyapı oluşumu gibi detayların ayrıntılara dayalı modellerle tahmin edilmesi yoluyla döküm kalitesi hakkında en fazla veriyi sunmaktır. Kalıp dolun sürecinde, doldurma sıcaklığı değişimlerinin simülasyon sonuç örneği Şekil 21'de gösterilmiştir (Malik et al., 2020).



Şekil 21. Doldurma sıcaklığı şeması (Malik et al., 2020).

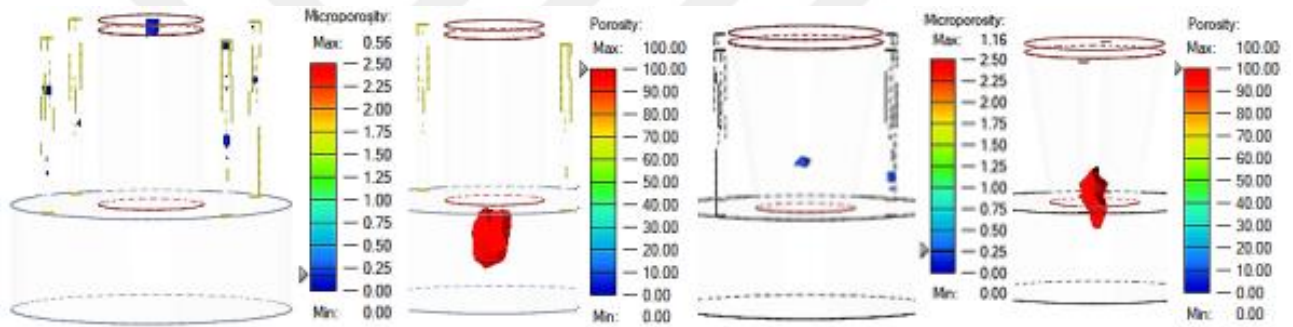
Şekil 22, katılaşma analizi sonuçlarını göstermektedir. Sağdaki renk skalası, katılaşma süresini ifade etmektedir. Şeffaf çerçeve ise katılaşan metali göstermektedir. Dört küçük riserin ilk olarak katılaştığı ve ardından malzemenin geri kalanının döküm bileşen merkezine doğru ilerleyerek yavaşça katılaştığı gözlemlenmektedir (Malik et al., 2020).



Şekil 22. Katılaşma süreci (Malik et al., 2020).

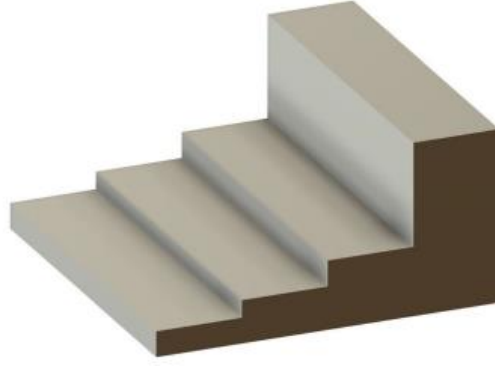
Katılma süresi $t = 889$ s olduğunda, döküm bileşenin merkezine kadar olan kısmı halka şeklindeki çevresine doğru ilerlemeye başlamıştır. Tüm katılaşmayı gözlemlediğimizde, döküm bileşenin ilerleyen katılma ile iyi bir şekilde tarif edildiği görülmektedir. Simülasyon; kalıp doldurma ve katılaştırma süreçlerini bir renk çubuğunda analiz etme ve görselleştirme, kritik konumları belirleme ve mikro gözenekler gibi döküm kusurlarını belirleme esnekliğine sahiptir (Malik et al., 2020).

Meydana gelen döküm kusurları, erimiş metalin besleme ve yolluk sisteminin tasarımıyla ilişkilidir. Metalin büzülmesi, bu kusurların oluşmasının başka bir nedenidir. Katılma süreci devam ederken döküm beslenmelidir. Katılan döküm bölümünün eriyen metal ile beslenmesi kesildiğinde, boşluklar veya mikro poroziteler oluşmaktadır (Malik et al., 2020). Mikro porozitelerin oluşumu dayanıklılık özelliklerini azaltmaktadır (Shi, 2012).

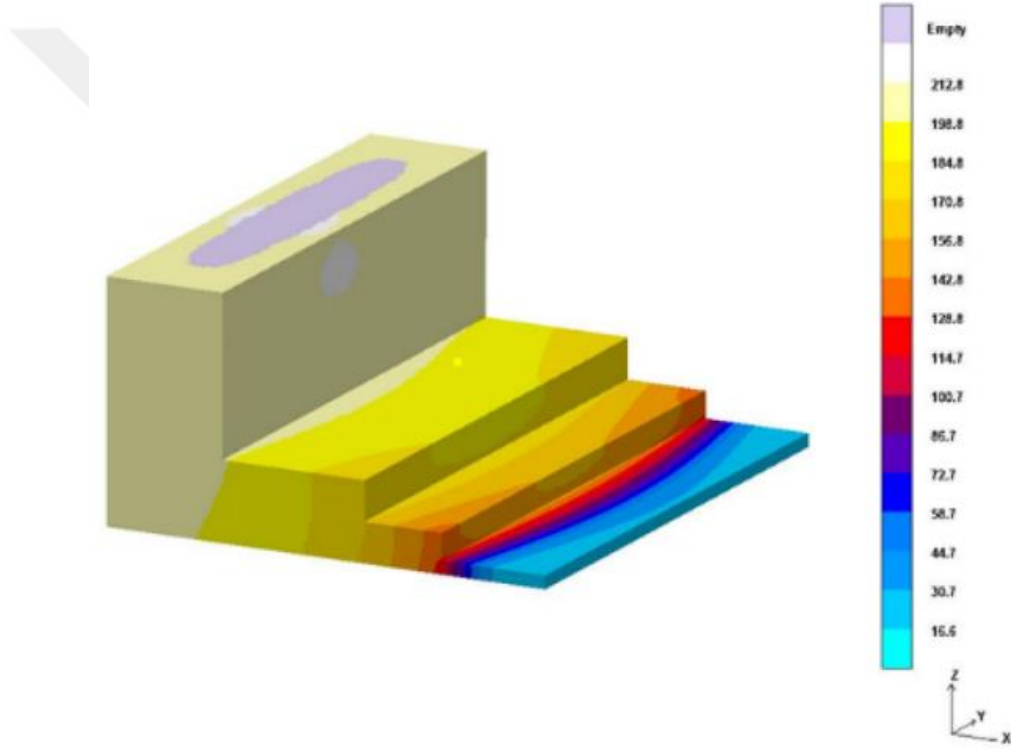


Şekil 23. Model simülasyonunda meydana gelen kusurlar (Malik et al., 2020).

A205'in tane boyutunun, ikinci faz morfolojisinin, sertliğinin ve korozyon direncinin katılma süresinin bir fonksiyonu olarak incelendiği bir çalışmada; ilgili döküm süreci Magmasoft adlı bir ticari yazılım kullanılarak simüle edilmiştir. Dökümde adım adım katılma süresi ve hızı, soğutma hızı ve mikro poroziteyi öngörmek için simülasyondan yararlanılmıştır. Simülasyon sürecinden çıkarılan sonuçlara göre, daha fazla kalınlığın daha uzun katılma süresine ve daha fazla mikro poroziteye neden olduğu görülmektedir. Simülasyona başlamadan, kademeli döküm modelinin bir CAD modeli hazırlanmıştır. Bileşenlerin boyutları belirlenmiş ve verilen veri tabanında malzeme A205 olarak seçilmiştir. Geometri tamamlandıktan sonra, ağ oluşturulmuştur. Dört kesit kalınlığına sahip A205-T7 kademeli döküm modelinin şematik görünümü Şekil 24'te yer almaktadır. Katılma işlemi sırasında, katılma süresini etkileyen farklı renklerle değişen sıcaklıkları temsil eden üç boyutlu akış modeli Şekil 25'te gösterilmektedir (Kordijazi et al., 2021).

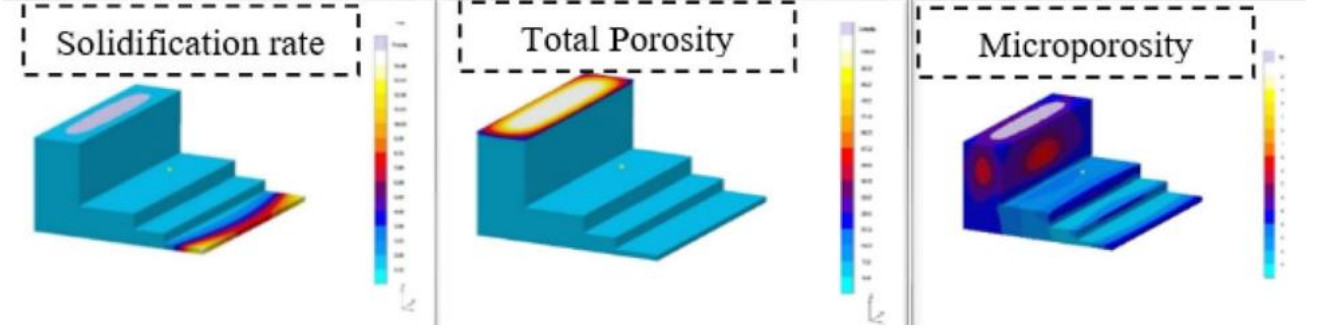


Şekil 24. Dört kesit kalınlığına sahip A205-T7 kademeli dökümünün şematik görünümü: 2, 0.8, 0.5 ve 0.3 inç (Kordijazi et al., 2021).



Şekil 25. Katılaşma süresi (Kordijazi et al., 2021).

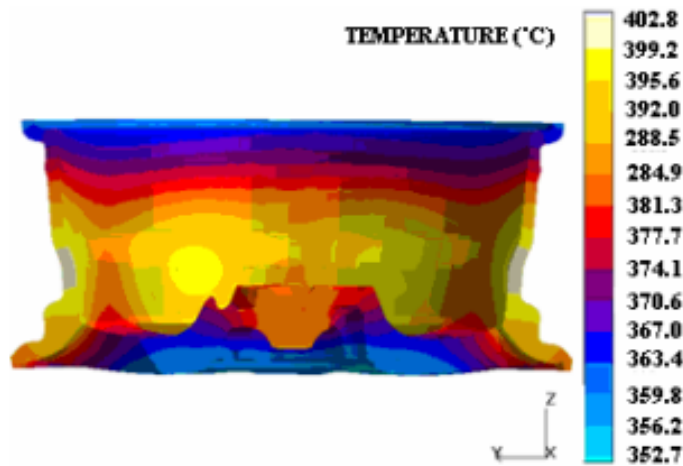
Şekil 26’da yüzeyde öngörülen katılaşma oranı, toplam gözenekliliği ve mikro gözenekliliği gösteren simülasyon sonuçları yer almaktadır. Kesit kalınlığındaki artışla gözenekliliğin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum da katılaşma süresindeki artışın yapıda daha fazla gözenekliliğe yol açtığını göstermektedir. 0.3, 0.5, 0.8 ve 2 inç boyutlarındaki kesitlerin mikro gözeneklilik oranları sırasıyla %0.0457, %0.400, %0.752 ve %1.457 olarak hesaplanmıştır. İlgili kalıp tasarımında yapılan önceki ölçümler, bu çalışmadaki süreç simülasyon analizinde tahmin edilen sonuçlarla doğrulanmıştır (Kordijazi et al., 2021).



Şekil 26. Kademeli dökümün katılaşma oranı, toplam gözenekliliği ve mikro gözenekliliği (Kordijazi et al., 2021).

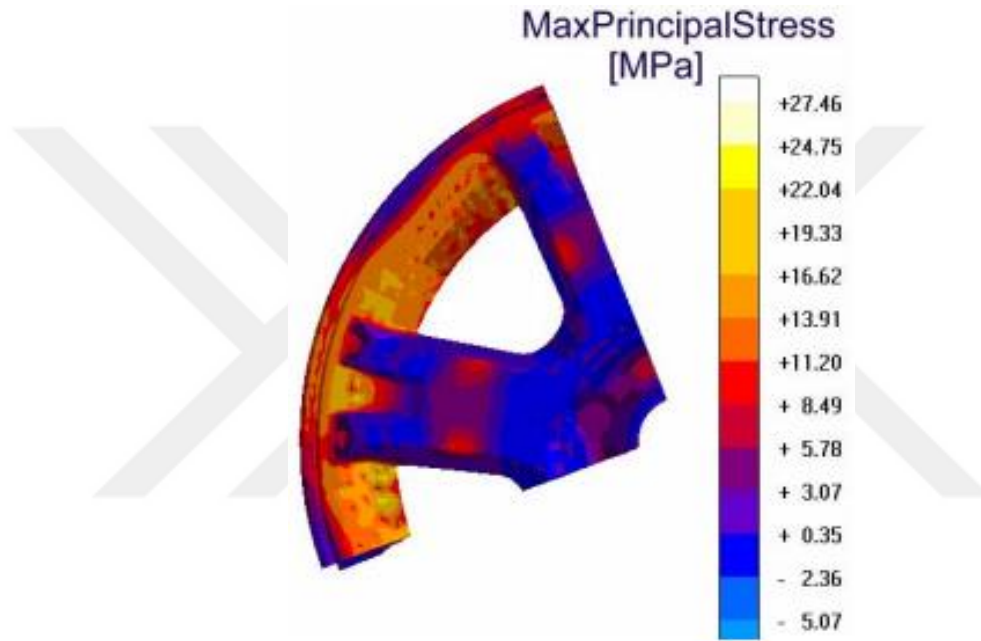
Jant yüzey sınırları ile jant federlerinde farklı sıcaklık değerleri gözlemlenmektedir. Uç bölgeler, orta bölgelere göre daha hızlı bir şekilde ısı kaybedeceği için daha hızlı katılaşmaktadır. Bu değişken termal gradyanların bir sonucu olarak, mekanik özelliklerde ve artık gerilimlerde değişiklikler meydana gelmesini bekleriz. Soğutma hızı, jantın yüzeyi ile merkezi arasındaki soğuma sıcaklığı farkını büyük ölçüde oluşturduğu için DAS uzunluğunu etkilemektedir. Daha hızlı soğuma daha küçük dendrit kol uzaklıklarına (DAS) ve daha küçük tanelere yol açmaktadır. Daha yavaş soğumanın, daha büyük tanelere yol açmasıyla; bu tanelerin daha düşük mukavemet, daha düşük sertlik ve daha düşük süneklik özelliklerine sahip olması beklenmektedir. Ek olarak, metal katılaşması metal büzülmesi ile ilişkili olduğundan jantın farklı bölgelerinde farklı zamanlarda katılaşma başlarsa, büyük ölçüde çarpılma ve termal gerilmeler meydana gelmektedir.

Şekil 27, jantın kalıptan çıkarıldığı andaki sıcaklıklarını göstermektedir.



Şekil 27. Katılaşma başladığında janttaki sıcaklık dağılımı (Colosio and Santos, 2008).

Kalınlıkların değişkenlik göstermesi, artık gerilmeler üzerinde büyük etkiye sahiptir. Jantın yapısında, jantın federleri bağlantıyı sağlayan kritik bölgelerdir ve genellikle süspansiyon, fren ve direksiyon bileşenlerinden gelen tüm yükleri karşılamaları gerekmektedir. Bu nedenle, jant federi görevi ve yapısı gereği genellikle yorulma problemlerinin kaynağıdır. Simülasyon sonuçlarında; tasarım aşamasında dikkate alınması gereken, kritik bölgelerde yer alan belirgin bir çekme artık gerilimi varlığını göstermektedir. Jantın ön yüzeyden alınan görüntüsünü içeren Şekil 28'de görüldüğü gibi, jant federlerinde çekme artık gerilmesi saptanmaktadır (Colosio and Santos, 2008).



Şekil 28. Jantın ön yüzeyindeki artık gerilim dağılımları (Colosio and Santos, 2008).

Artık/kalıntı gerilmeler, hem bileşenleri tasarlarken hem de bunların üretim süreci rotalarını planlarken önemli bir husustur. Artık gerilim alanlarının, kullanılan imalat sürecinden bağımsız olarak yorulma çatlak büyümesi üzerinde önemli bir etkisi olduğundan yorulma direncinin yorumlanmasında önemli bir faktördür. Çekme dayanımları yorulma ömürleri üzerinde olumsuz etki yaparken, sıkıştırma artık/kalıntı gerilmeleri faydalı olabilir. Artık gerilim alanını çatlak büyümesi üzerinde açıkça etki yapacağı gibi, çatlakların da artık gerilim alanı üzerinde eşit derecede bir etkisi olacaktır. Otomotiv bileşenlerinin gerilim durumu doğru bir şekilde karakterize edilip potansiyel olarak zararlı artık gerilmelerin kaynakları ve katkı mekanizmaları iyi anlaşıldığında, üretim süreçleri değiştirilip optimize edilebilir ve böylece yüksek kaliteli bileşenler rekabetçi bir maliyetle üretilebilir.

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Jant, tüm araç ağırlığını taşıyan bir güvenlik parçasıdır. Jantın ağırlığı, tasarımı ve ölçüleri otomobilin performansını etkilemektedir. Jantı tasarlarırken seçilen malzeme, malzeme parametreleri ve bu parametreler arasındaki ilişkiler de dikkate alınmalıdır.

Otomotiv sektörü, ağırlığın kritik olduğu sektörden biridir. Rekabetçi jant tasarımında, güç ve ağırlık arasındaki denge kritiktir. Çok ağır jantların kullanımında, araç performans kaybı yaşayacaktır. Çok hafif ya da zayıf jantların kullanımında ise yapısal arıza riski vardır.

Orijinal ürün üreticilerinin (OEM) şartnamelerinde, parçalardan alınan örneklenmiş test bileşenlerinde elde edilen minimum değerlerin yer aldığı mekanik özellik gereklilikleri (örneğin DAS) paylaşılır. DAS'ın iyi değerlendirilebilmesi için birden fazla ölçümü gerekmektedir. Mekanik dayanım kontrollerinde kaydedilen ölçümün karşılığı, en azından belirtilen minimum değere eşit olmalıdır.

Otomotiv jantları, yeterli bir metal besleme ve soğutma sistemi içeren karmaşık kalıplarda üretilen büyük ve karmaşık bir parça olarak kabul edilir. Metalik kalıbın türü ve işlem parametreleri, nihai sonuçlarda önemli rol oynar.

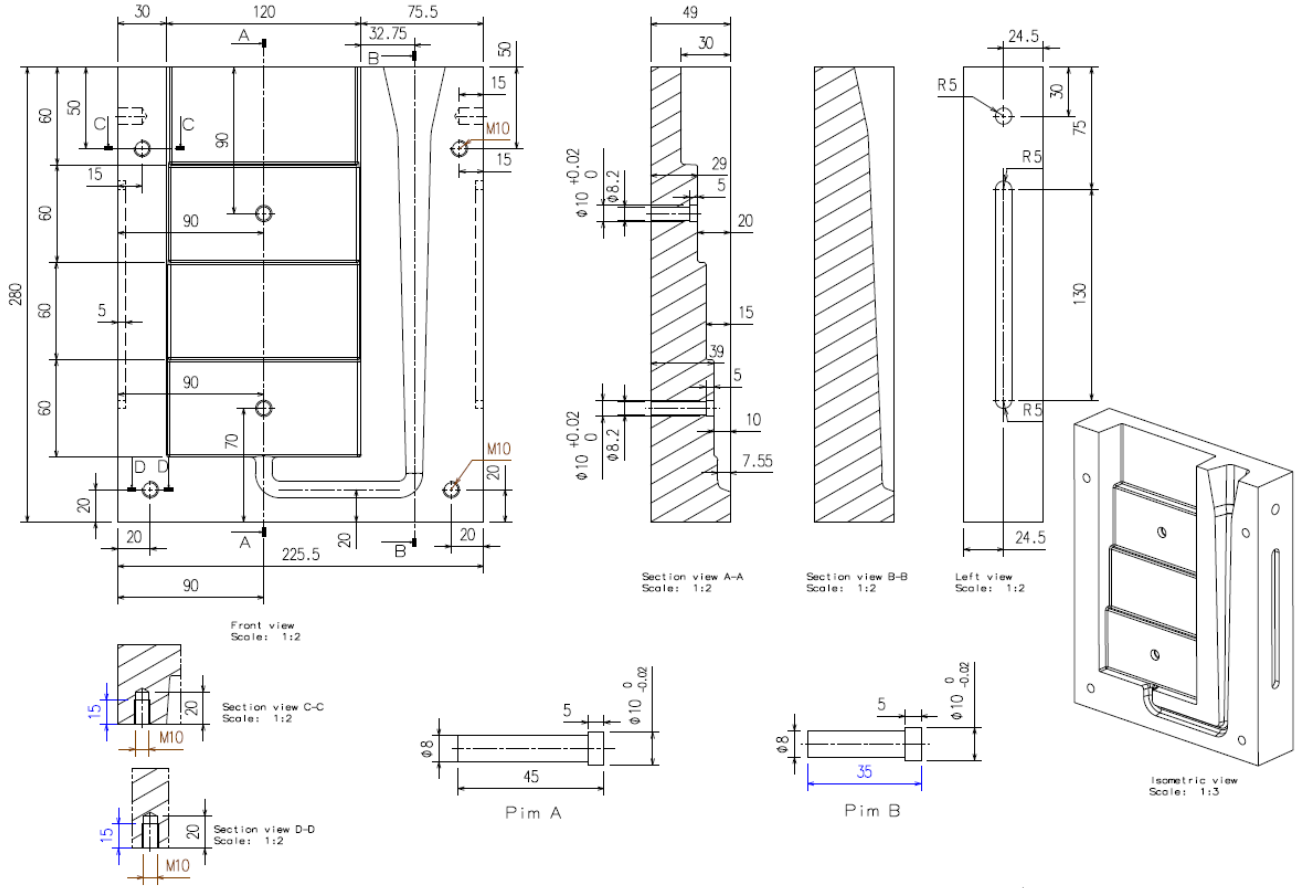
Alüminyum alaşımlı jantlar; sürüş güvenliği, stabilite ve çekiş üzerinde büyük etkisi olan, otomobilin önemli güvenlik parçalarıdır. Son kullanıcılarda kalite, güvenilirlik ve yüksek performans konularındaki beklentiler nedeniyle, ana sanayi otomotiv üreticilerinde; kalite problemlerinin azaltılması, jantların belirtilen garanti sürelerini karşılama, garanti iadeleri ve garanti onarım maliyetlerinin azaltılması yönünde artan talepler bulunmaktadır. Jantlar; seri üretimine geçmeden önce, numune ve ön seri fazlarında çeşitli doğrulama ve onay testlerinden geçmek zorundadırlar. Jant kalitesi, otomobilin kalitesi ve sınıfı için önemli bir göstergedir. Ürün tasarım süreçlerinde kullanılan simülasyonlar, imalat maliyetini düşürürken aynı anda ürün yaşam döngüsünü artırmada mekanik dayanımı yorumlama açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Günümüzde ürün geliştirme paradigması, geleneksel deneme yanılma yöntemi yerine büyük endüstriyel uygulamalar için hızlı ve güvenilir alternatif yaklaşımlar sağlama nedeniyle bilgisayar destekli döküm tasarımına ve simülasyon paketi kullanımı yönünde ilerlemektedir.

Bilgisayar destekli döküm simülasyonları, döküm sürecinin dinamik davranışını ortaya koyarak bütün döküm süreçlerini modelleme yeteneğine sahip olduğu için yeni ürün geliştirme paradigmasında önemli bir yere sahiptir. Döküm kalitesini iyileştirmek için sistemin doğru tasarımı ve proses parametrelerinin kontrol altında tutulması esastır. Uygun kalıbın tasarımı ve döküm prosesi için uygun parametrelerin elde edilmesi konularında maliyet ve zaman kaybına neden olmamak için döküm simülasyonları geliştirilmektedir. Simülasyon programları olası hata noktalarının tahmin edilmesine olanak tanır. Bu çalışmanın bir amacı da döküm sürecinde simülasyon kullanılarak, oluşabilecek kusurların yerlerinin ve yoğunluklarının belirlenmesiyle elde edilecek sonuçlara göre optimizasyon yapılmasıdır.

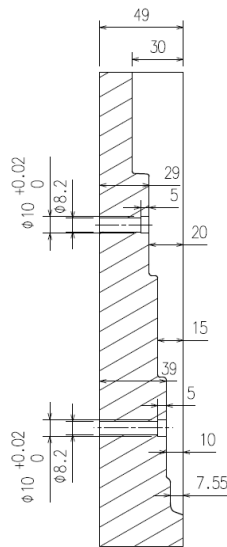
Alüminyum alaşımlı jantların boyutları alüminyum alaşımının karakteristik özelliklerinden olan tasarım esnekliği nedeniyle geniş bir aralıkta değişkenlik göstermektedir. Jantın karmaşık geometriye sahip olması nedeniyle katılaşma sürecinde farklı sıcaklık değerleri gözlemlenmektedir. Kesiti ince olan bölgeler kesiti kalın olan bölgelere göre daha hızlı bir şekilde ısı kaybedeceği için daha hızlı katılaşmaktadır. Bu değişken termal gradyanların bir sonucu olarak, mekanik özelliklerde değişiklikler meydana gelmektedir. Bu çalışmada basamak kalıp tasarlanmasının ve kullanılmasının nedeni, aynı kalıp üzerinde farklı katılaşma hızlarının mekanik dayanım üzerindeki etkisinin aynı anda değerlendirilerek gözlemlenmesidir.

Döküm sürecinde katılaşma hızının mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla kalıp doldurma ve katılaşma süreci Magmasoft adlı bir ticari yazılım kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyona başlamadan, kademeli döküm modelinin bir CAD modeli hazırlanmıştır. Bileşenlerin boyutları belirlenmiştir ve ardından kalıp malzemesi olarak piyasada 2344 olarak bilinen x40crmov5-1 çeliği seçilmiştir. Geometri tamamlandıktan sonra, ağ oluşturulmuştur. Bu çalışma için tasarlanan farklı kesit kalınlıklarına sahip basamak kalıbın teknik resmi Şekil 29'da yer almaktadır. Döküm kalitesini analiz etmek için sıvı metalin dolmuş mutlak hızı ve sıcaklık değişimi açısından doldurma ve katılaşma süreçlerine odaklanan simülasyonlarda, başlangıç döküm sıcaklıkları olarak 680 °C, 700 °C ve 720 °C değerleri seçilmiştir. Katılaşma hızının mekanik özelliklere olan etkileri Magmasoft yardımıyla her başlangıç döküm sıcaklığı için ayrı ayrı simüle edilerek elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

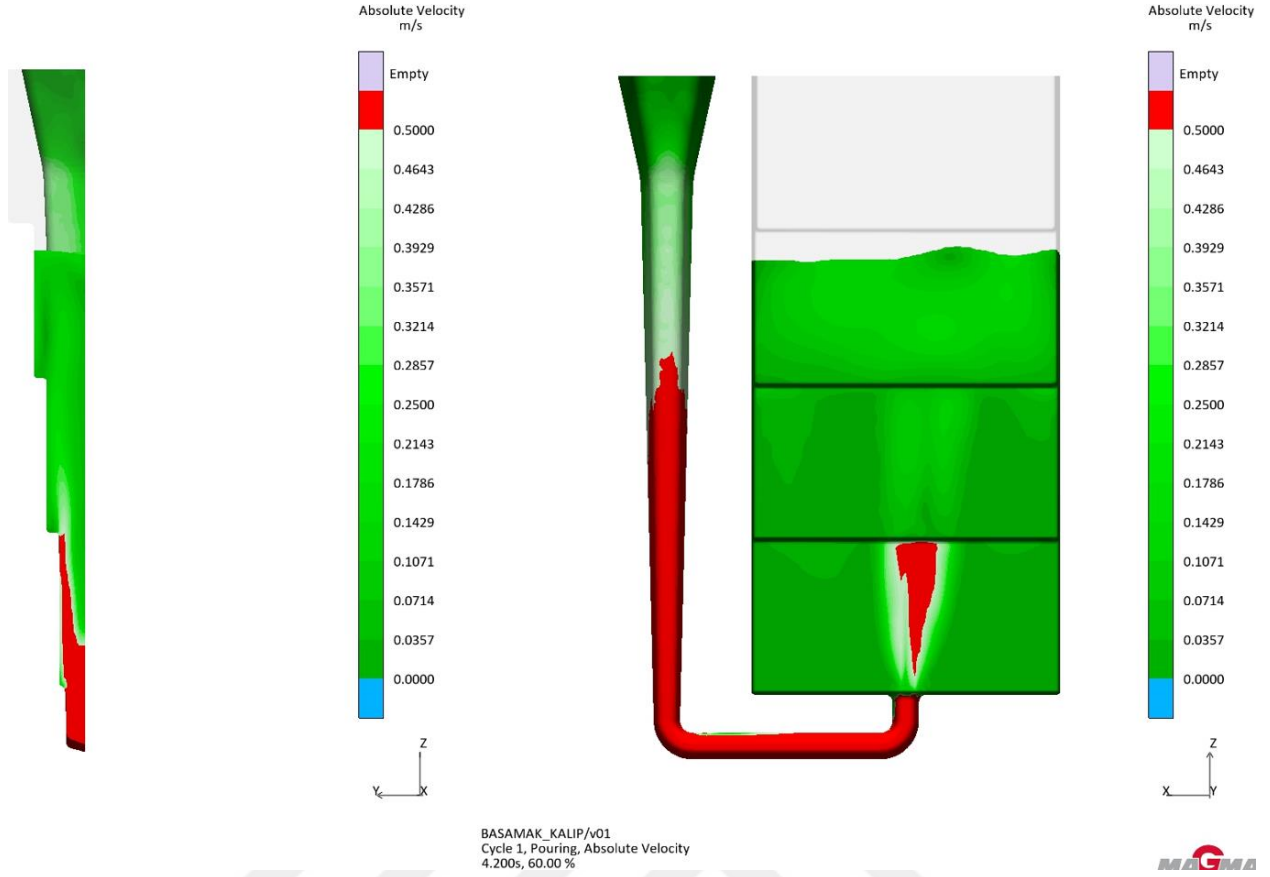


Şekil 29. Çalışma için tasarlanan basamak kalıbın teknik resmi.

Şekil 30'da katılma hızının mekanik özelliklere etkisinin inceleneceği kesitin ayrıntılı ölçüleri gösterilmektedir.



Şekil 30. Katılma hızının etkisinin değerlendirileceği kesitin kalınlıkları.

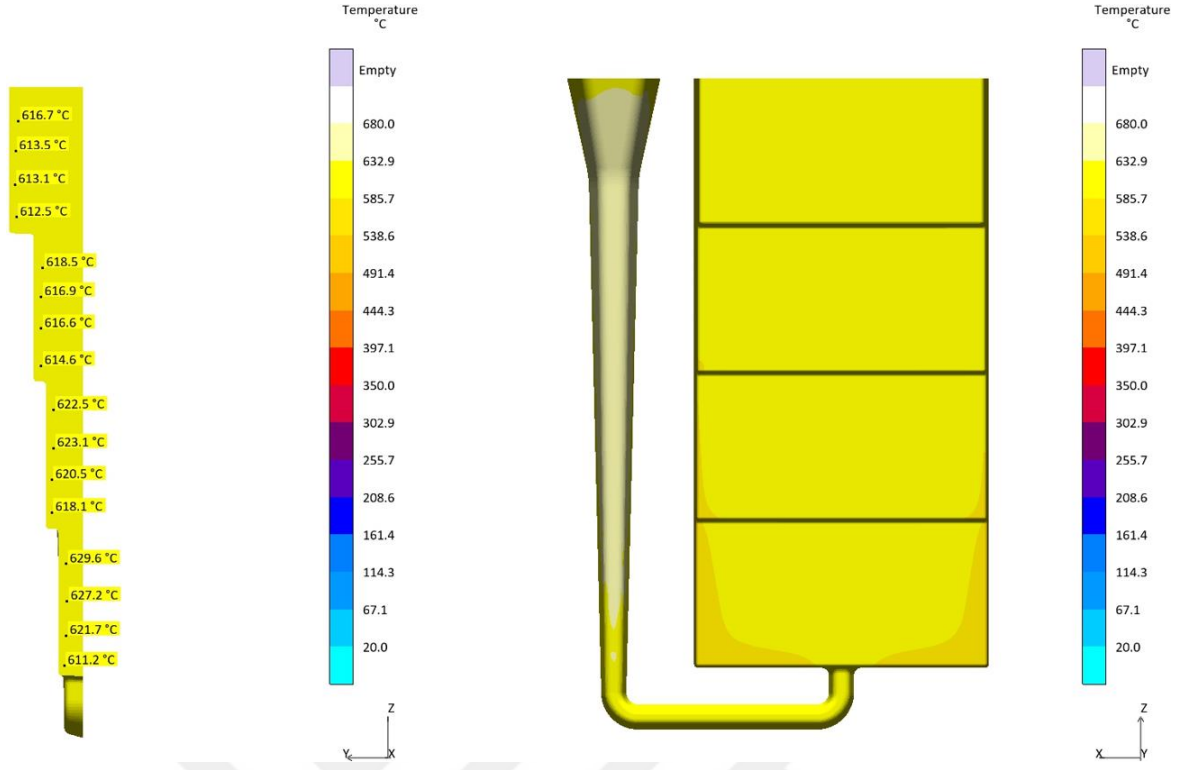


Şekil 32. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için t=4.2 s anında mutlak hız simülasyon sonucu.

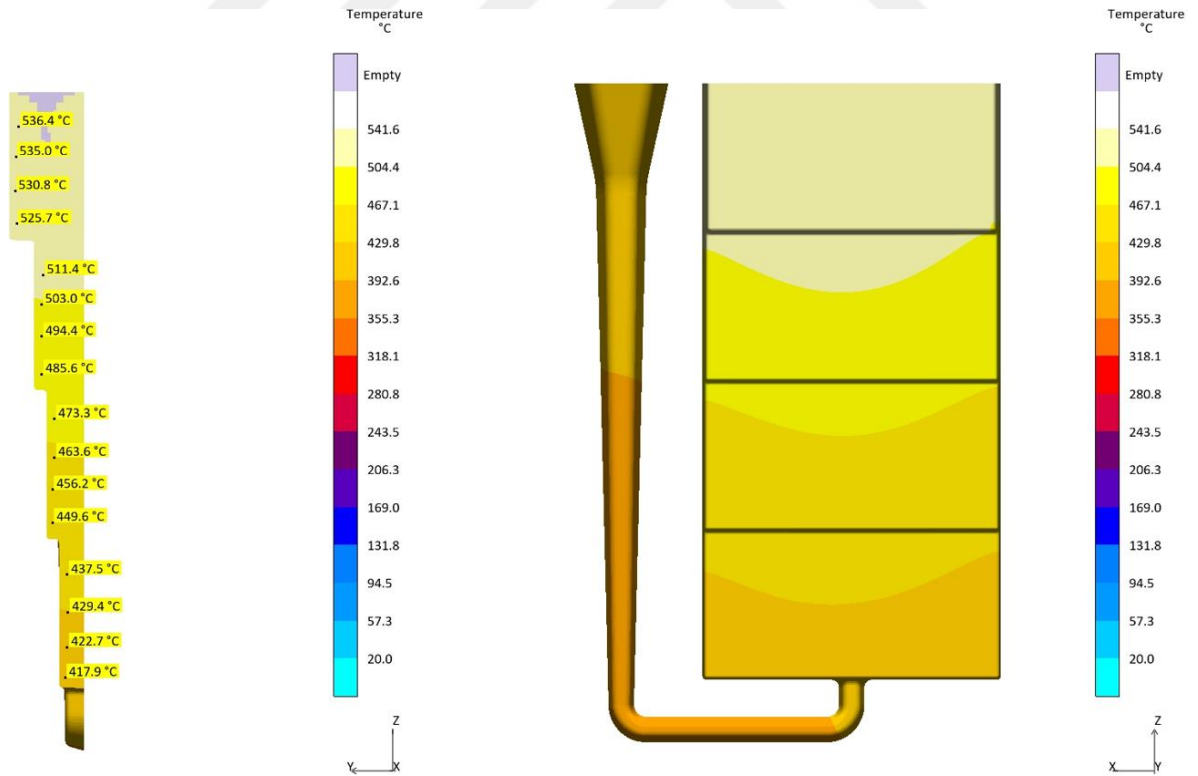
3.1.2. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca sıcaklık değişimi çıktıları

Sıvı madenle bütün kalıp doldurularak dökümün tamamlanmasının ardından katılaşma süreci başlamaktadır.

680 °C başlangıç döküm sıcaklığıyla döküm işlemi tamamlandığında elde edilen dökümün kesit boyunca değişen sıcaklık alan haritası Şekil 33'te yer almaktadır. Kesit boyunca sıcaklık değişimi Şekil 33'ün sağında yer alan renk skalasından faydalanılarak yorumlanabilmektedir. Katılaşma sürecinin başlangıç anında, başlangıç sıcaklık değerinin 680 °C olduğu renk skalasında görülmektedir. Katılaşma tamamlandıktan sonra, kesit boyunca sıcaklık değişimini gösteren simülasyon sonucu Şekil 34'te yer almaktadır. Kesit kalınlaştıkça, parçanın daha geç soğuduğu görülmektedir. Şekil 34'ten anlaşılacağı üzere, ince kesitli bölgelerdeki soğumanın kalın kesitli bölgelerden daha hızlı gerçekleştiği sonucu elde edilmektedir.



Şekil 33. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için başlangıç anında kesit boyunca sıcaklık değişimleri.

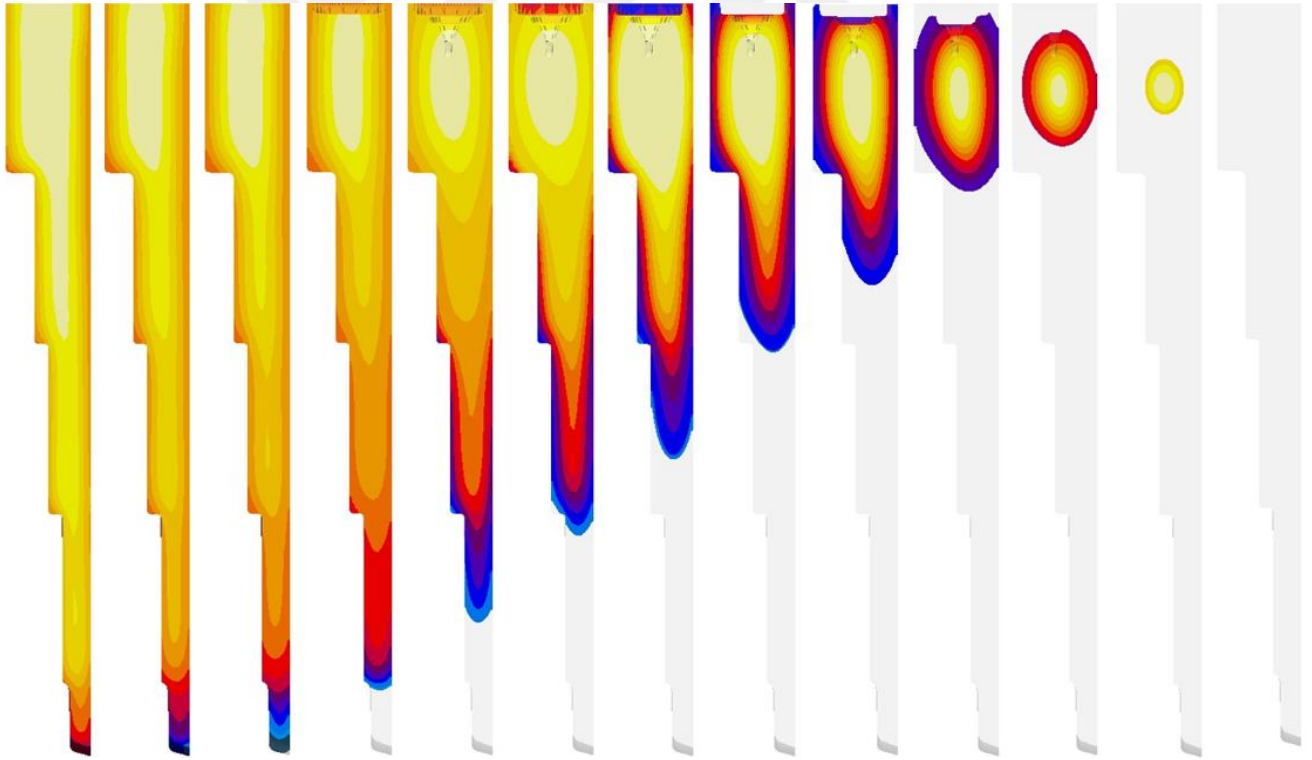


Şekil 34. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için katılaşma tamamlandıktan sonra kesit boyunca sıcaklık değişimleri.

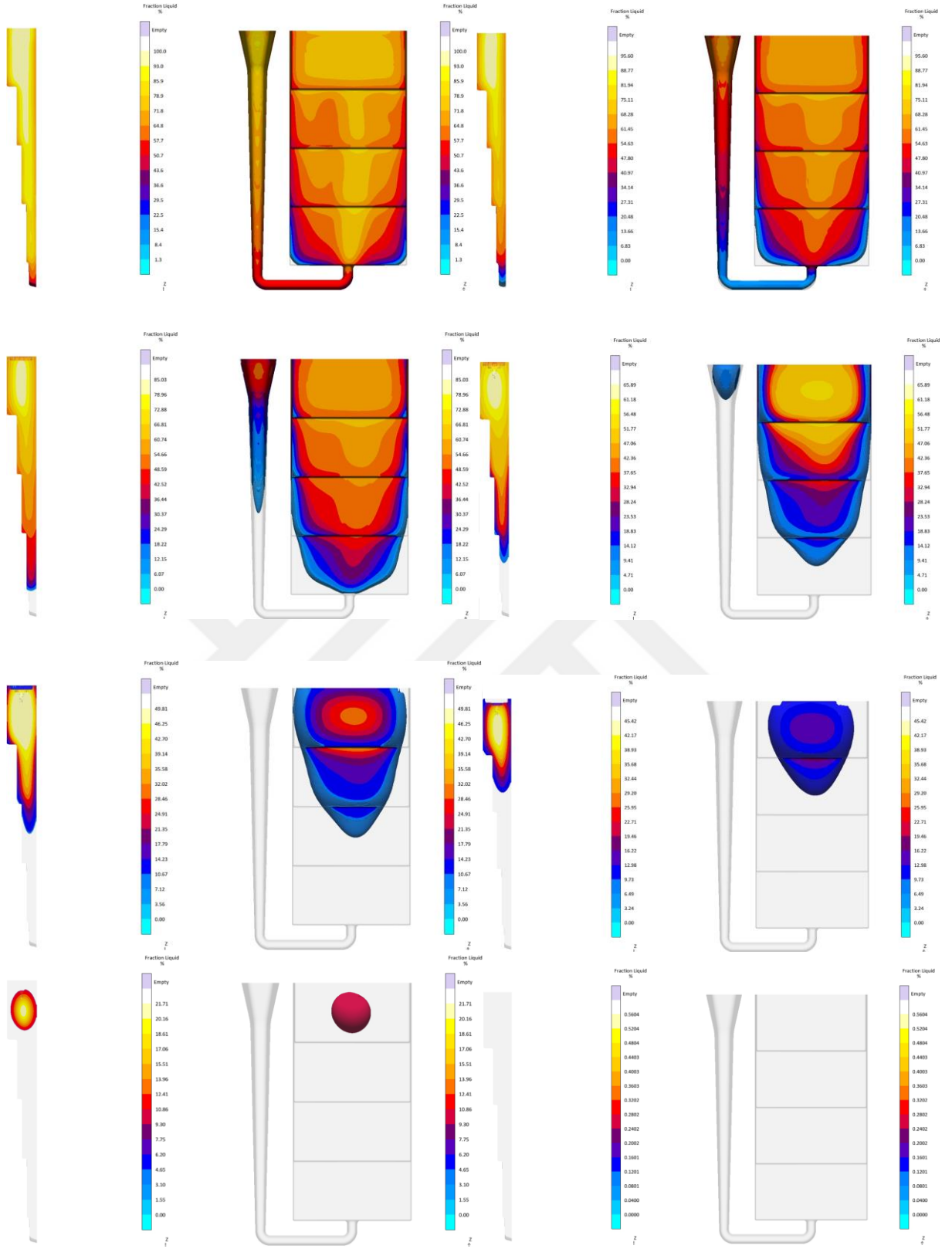
3.1.3. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için sıvı oranı (fraction liquid) çıktıları

Sıvı oranı (fraction liquid) sonucu, parçanın katılaşma sırasında sıvı kalan bölgelerinin oranını ifade etmektedir (Işık vd., 2020).

Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C seçilen set için kalıbın sıvı madenle dolumu tamamlandıktan sonra başlayan katılaşma sürecinde, sıvı kalan bölgelerin oranlarını gösteren belirli aralıklarda seçilmiş simülasyon sonuçları Şekil 35'te ve Şekil 36'da yer almaktadır. Beyaz renk, katılaşma sürecinin tamamlandığını ifade etmektedir. Renk skalasından yararlanılarak çıktılar yorumlandığında, ince kesitin önce katılaştığı ve ardından malzemenin geri kalanının yavaşça döküm parçasının merkezine doğru ilerleyerek katılaştığını gözlemlemek mümkündür. Böylece kesit kalınlığı arttıkça katılaşma sürecinin uzadığı sonucu desteklenir niteliktedir. Zaman geçtikçe katılaşan bölgeler artacağı için şekillerde beyaz renk ile ifade edilen alanların artış gösterdiği görülmektedir.



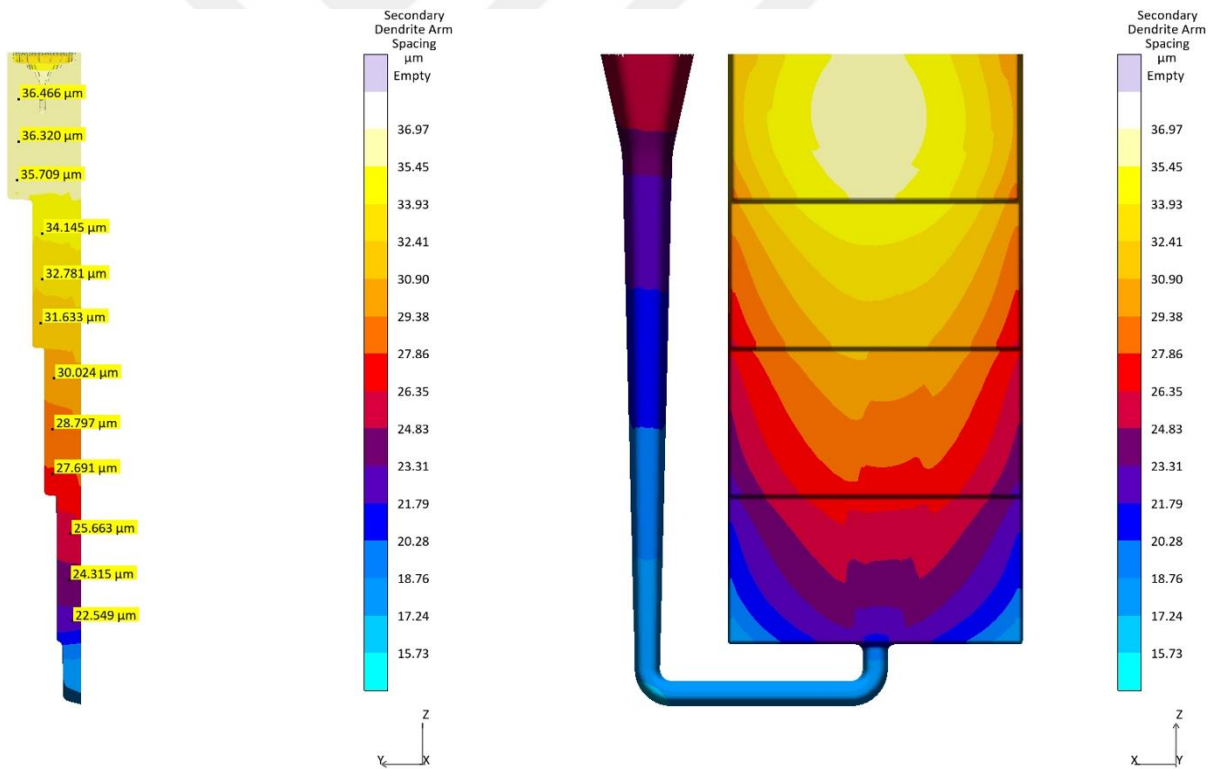
Şekil 35. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için katılaşma sürecinde sıvı kalan bölgelerin kesit boyunca değişen oranları.



Şekil 36. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için katılaşma süreci.

3.1.4. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için SDAS çıktıları

Mekanik özellikler, katılma hızına ve dolayısıyla katılma hızıyla doğrudan ilişkili olan mikroyapısal bileşenlerin boyutuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Alüminyum alaşımlarının katılma sürecinde oluşan mikroyapının önemli bir özelliği olan dendritik yapıların kol aralıklarına bağlı olarak nihai ürünlerin mekanik özellikler etkilenmektedir. Şekilde başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için katılma hızı arttıkça değişen SDAS değerlerini gösteren simülasyon sonucu, SDAS ile katılma hızı arasındaki teorik sonuçlarla uyumludur. Kesit incelidikçe katılma hızı artacağından, SDAS değeri azalmaktadır. Katılma hızının artmasıyla, mekanik dayanım özellikleri de bu durumu destekler nitelikte artacaktır. SDAS azaldıkça dökümün mikroyapısı homojenleşeceğinden, daha hızlı katılan bölgeler daha iyi mekanik mukavemet sergileyecektir. Katılma tamamlandığında, kesit incelidikçe katılma hızının artmasıyla azalan SDAS'ın dağılımı Şekil 37'de yer almaktadır.

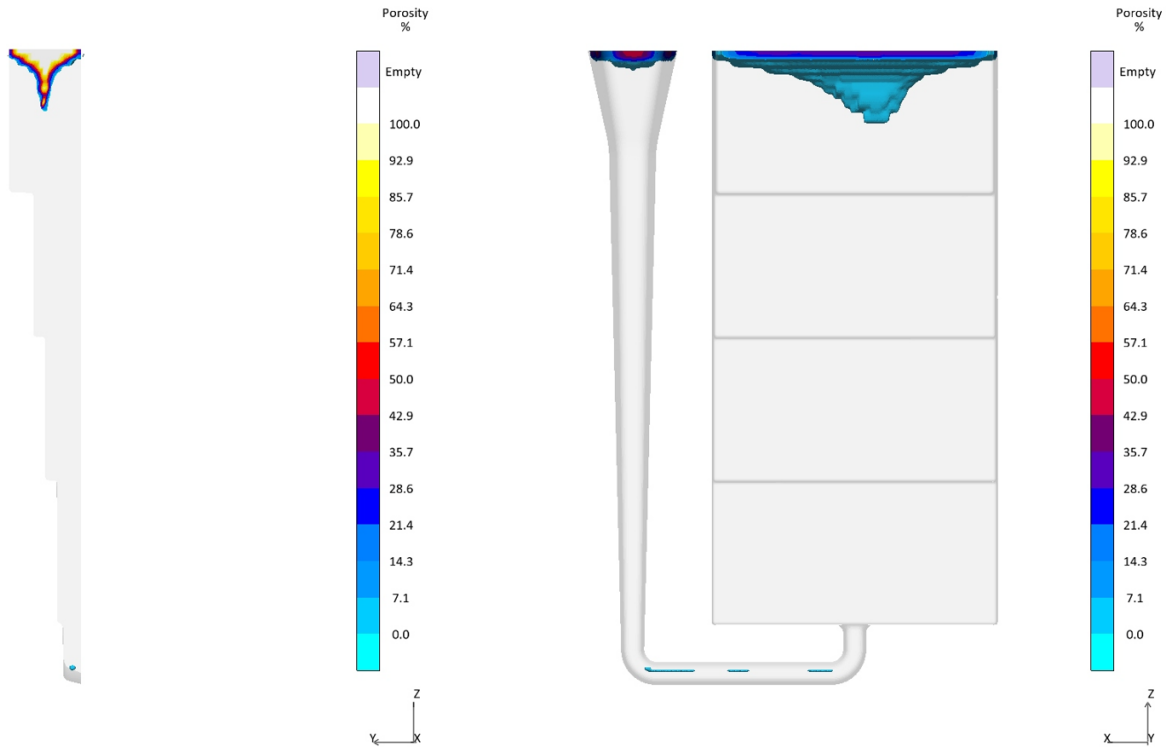


Şekil 37. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca SDAS dağılımı.

3.1.5. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için porozite çıktıları

Döküm gerilmeleri genellikle katılma büzülmesi ve termal büzülme kısıtlaması nedenleriyle oluşmaktadır. Genellikle dökümün katılmasının devam ettiği bölgede

yoğunlaşırlar. Katılaşma büzülmesi, eriyiğin yüksekliğinde bir azalma olarak kendini gösterir (Yue et al., 2021). Daha yüksek bir soğutma hızında katılaşmada; dendrit kol aralığı (DAS) azaldığında taneler arası bölgeler de azalacağından, gözenek büyümesi kısıtlanmış olur. Böylece genel olarak porozite yüzdesinde düşüş görülmektedir. Katılaşma hızı arttıkça, porozitenin daha homojen dağılmasına neden olacağından büzülme porozitesini azaltır. Soğuma sırasında hacim azalacağından, büzülme porozitesini engellemek için sıvı metal yeterince beslenmelidir. Beyaz bölgeler, katılaştıran alanları ifade etmektedir. Kesitin ince olduğu alanlar önce katılaşacağı için, alüminyum katılaşırken hacimsel bir küçülme meydana gelmektedir. Şekil 38’de katılaşma tamamlandığında meydana gelen katılaşma büzülmesi yer almaktadır. En üstte mavi renkle belirtilen alan, hacmen boş bölgeleri temsil etmektedir.



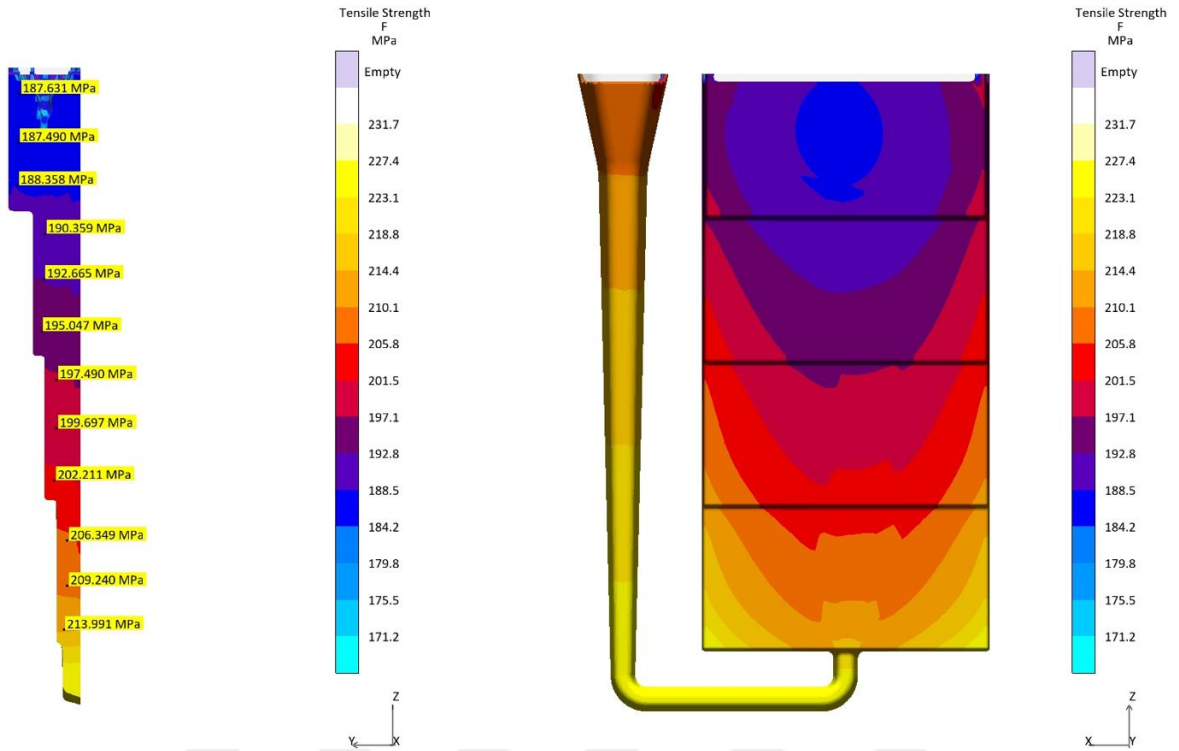
Şekil 38. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca porozite dağılımı.

3.1.6. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için çekme mukavemeti ve akma mukavemeti çıktıları

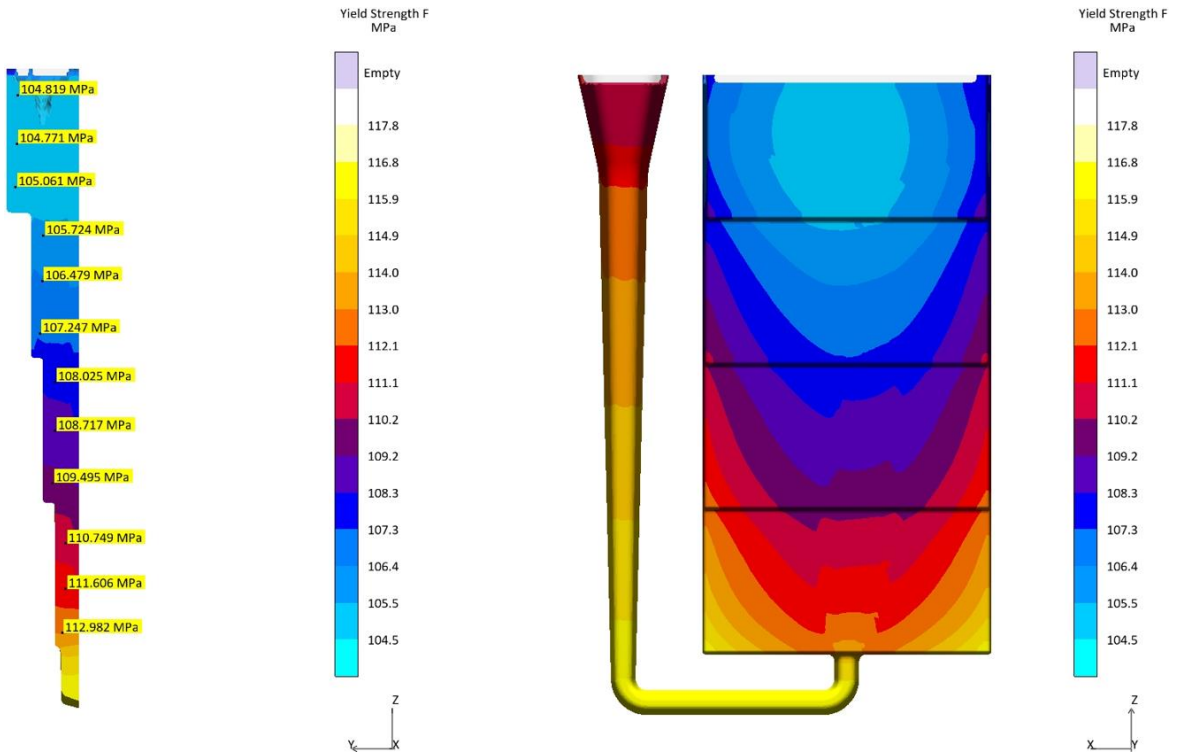
Katılaşma miktarı, mekanik özellikleri kontrol eden mikroyapıyı yönlendirmektedir.

Hızlı katılaştıran bölgeler daha iyi mukavemet özelliği göstermektedir. Kesitin ince olduğu yerlerde, kesitin kalın olduğu yerlere göre göreceli olarak daha iyi mukavemet değerlerine

ulaşmaktadır. Şekil 39 ve Şekil 40'ta kesit incelidikçe artan katılaşma hızıyla bağlantılı olarak artan mukavemet değerlerinin dağılımları gösterilmektedir.

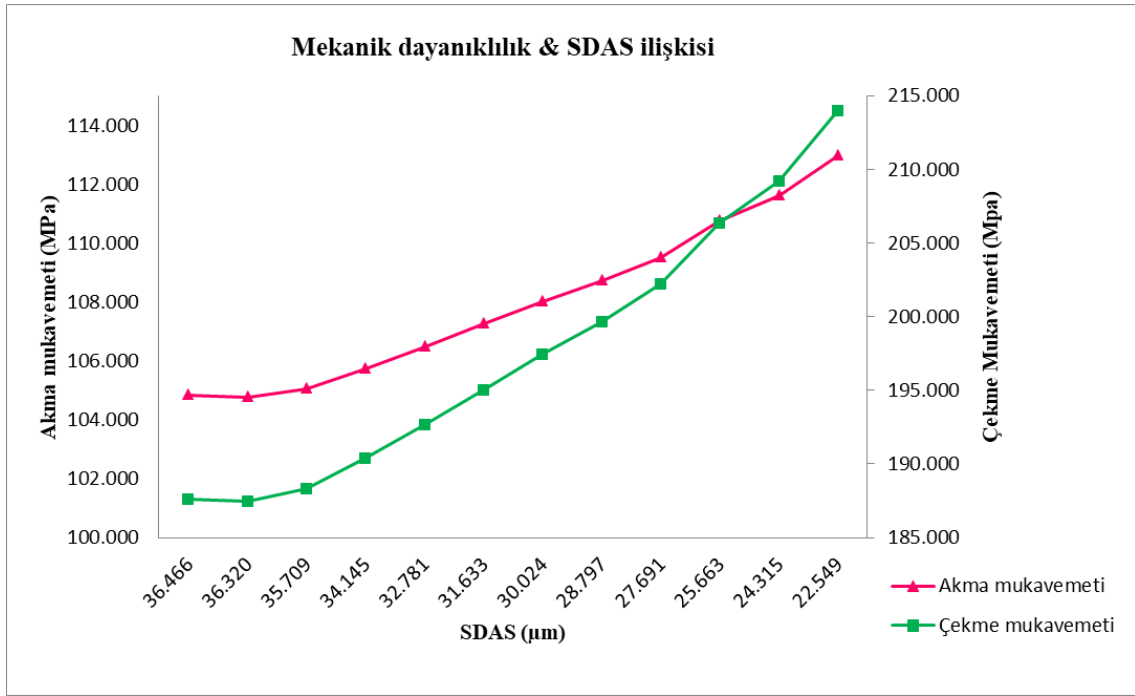


Şekil 39. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca çekme dayanımı dağılımı.



Şekil 40. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca akma dayanımı dağılımı.

Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca çekme ve akma mukavemetinin SDAS ile ilişkisini gösteren grafik Şekil 41’de yer almaktadır.

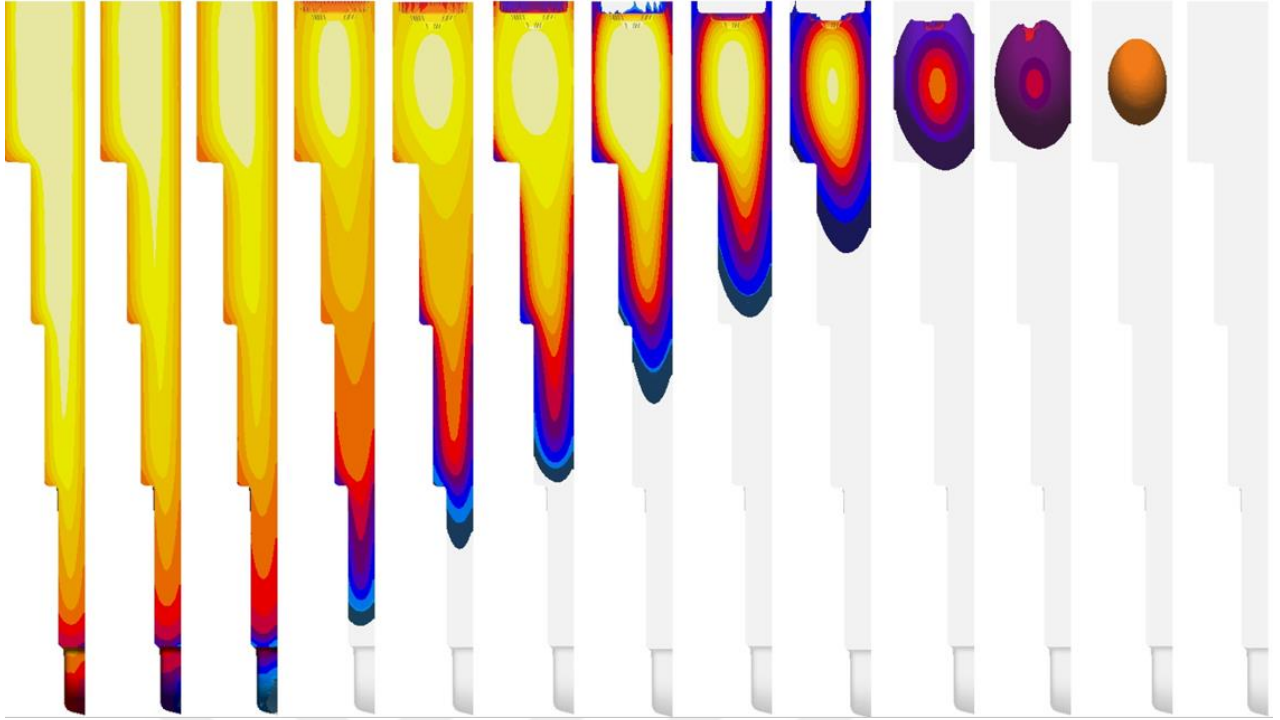


Şekil 41. Başlangıç döküm sıcaklığı 680 °C olan set için kesit boyunca çekme ve akma mukavemetinin SDAS ile ilişkisi.

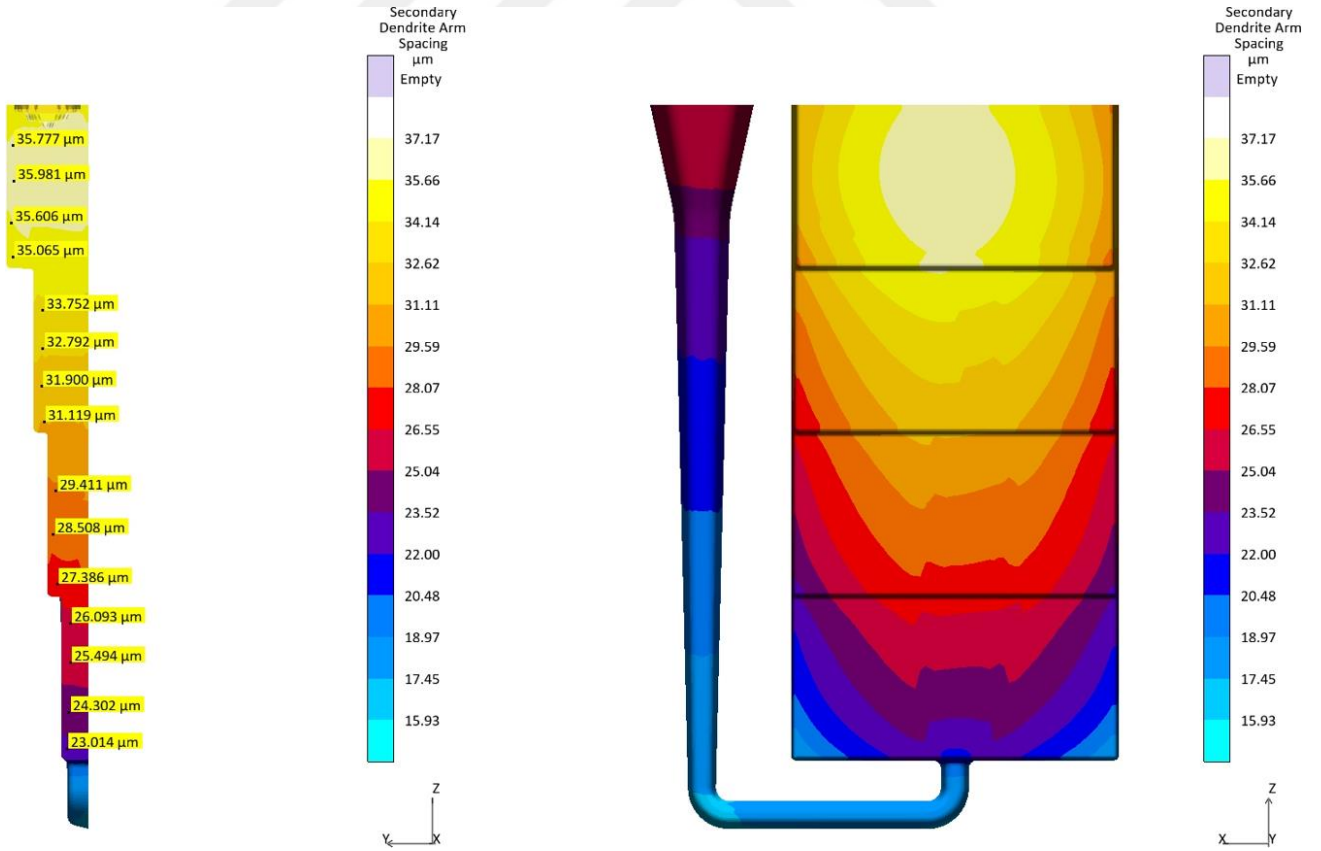
3.2. 700 °C Başlangıç Döküm Sıcaklığında Simülasyon Sonuçları

Başlangıç döküm sıcaklığı olarak 700 °C seçilen set için kalıbın sıvı madenle dolumu tamamlandıktan sonra başlayan katılaşma sürecinde elde edilen çıktılar, başlangıç döküm sıcaklığı olarak 680 °C seçilen set çıktılarını destekler niteliktedir.

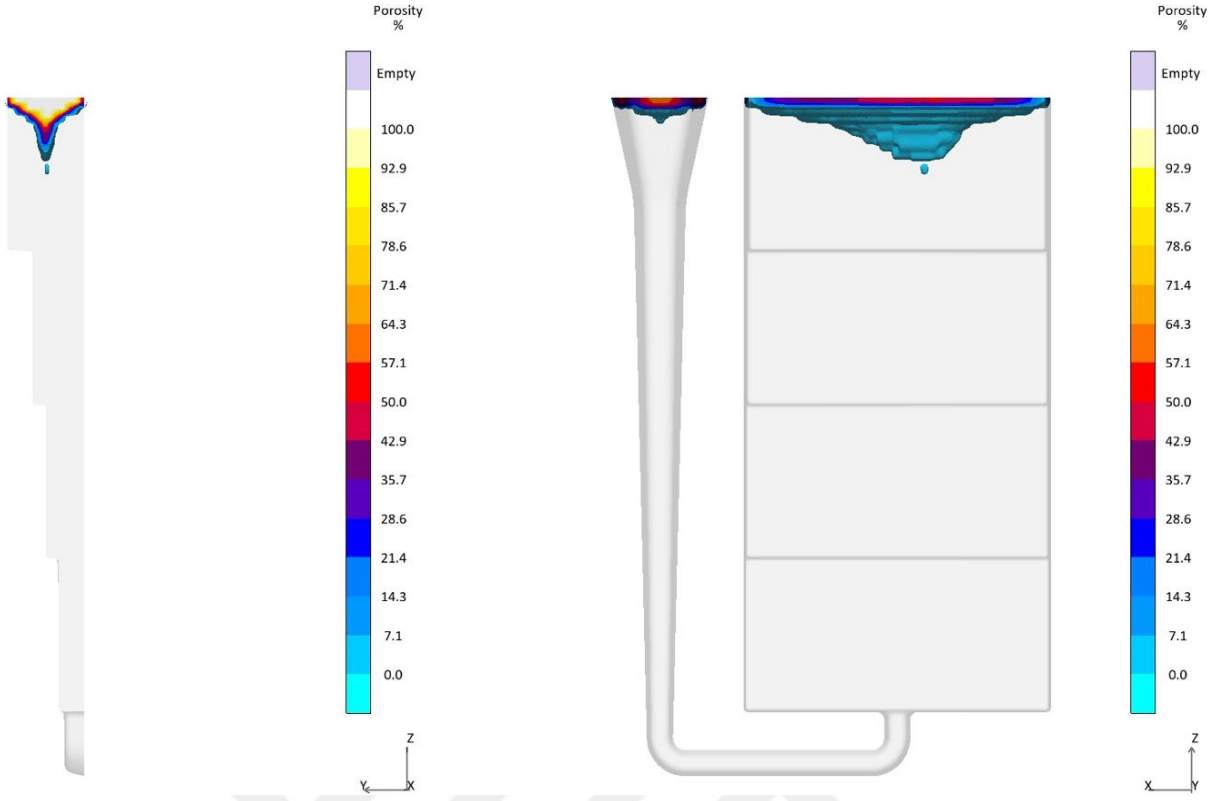
Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C seçilen set için kalıbın sıvı madenle dolumu tamamlandıktan sonra başlayan katılaşma sürecinde, sıvı kalan bölgelerinin oranlarını gösteren belirli aralıklarda seçilmiş simülasyon sonuçları Şekil 42’de yer almaktadır. Katılaşma sürecinin tamamlandığını ifade eden beyaz rengin, kesitin ince olduğu alanlardan başlayıp zaman geçtikçe kesitin kalın olduğu alanlara doğru artış gösterdiği görülmektedir. Şekil 43’ten yararlanılarak, kesit incelidikçe gerçekleşen daha hızlı katılaşmaya bağlı olarak SDAS değerinin azalacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Şekil 45 ve 46’da, incelen kesitte katılaşma hızı arttıkça artma eğilimi gösteren çekme ve akma mukavemeti dağılımları elde edilmiştir.



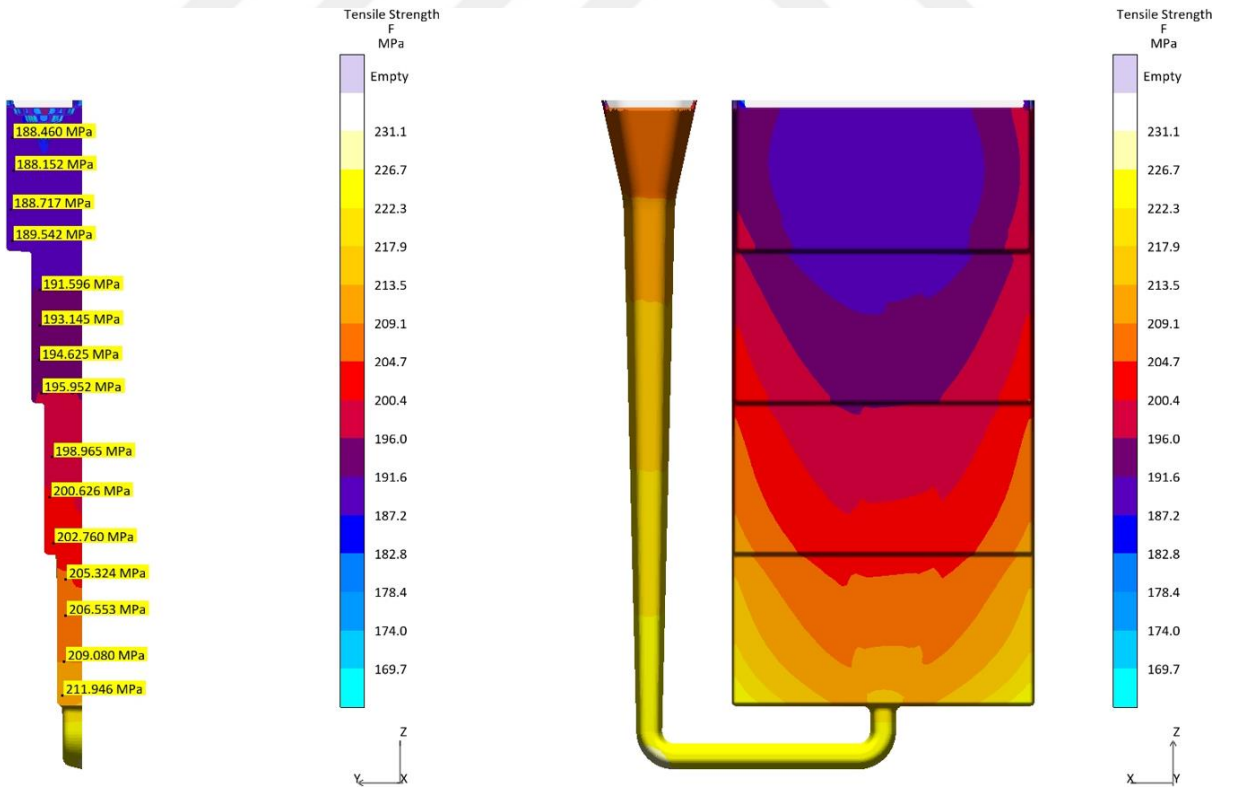
Şekil 42. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için katılma sürecinde sıvı kalan bölgelerin kesit boyunca değişen oranları.



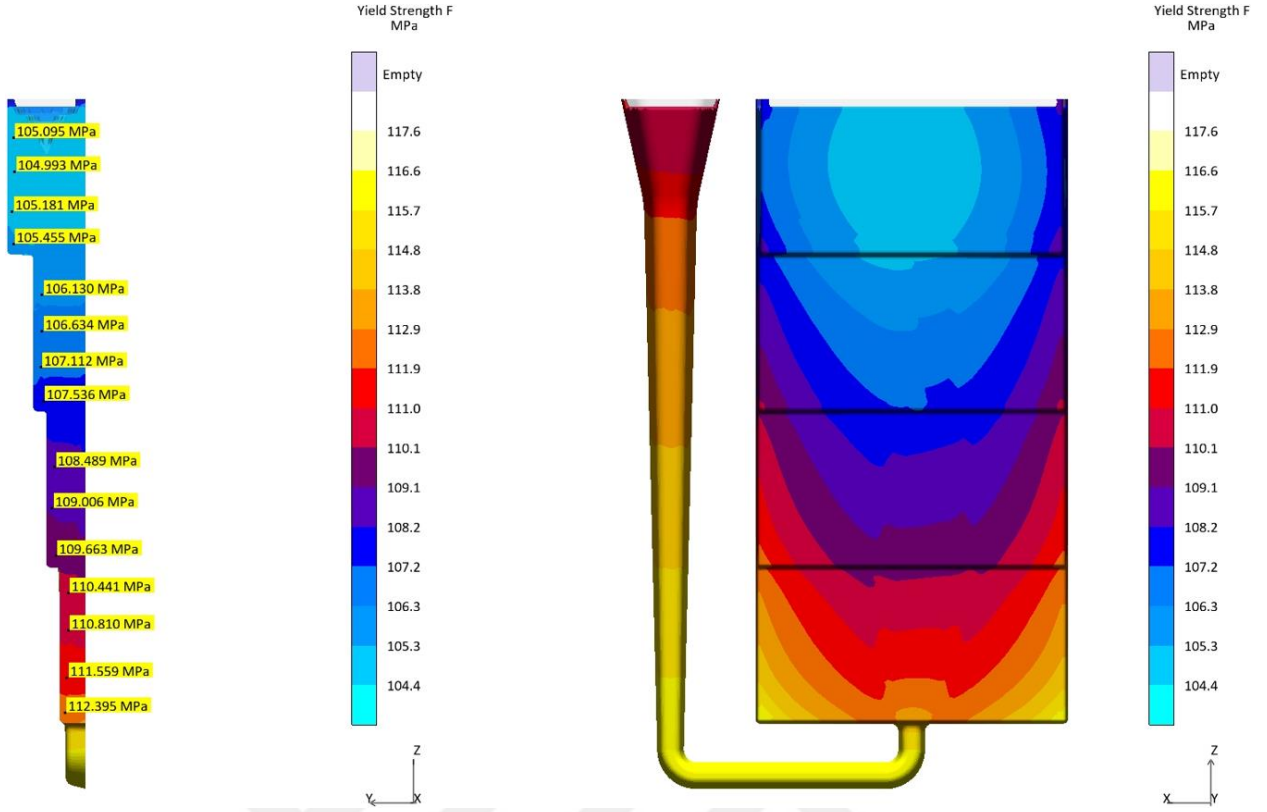
Şekil 43. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca SDAS dağılımı.



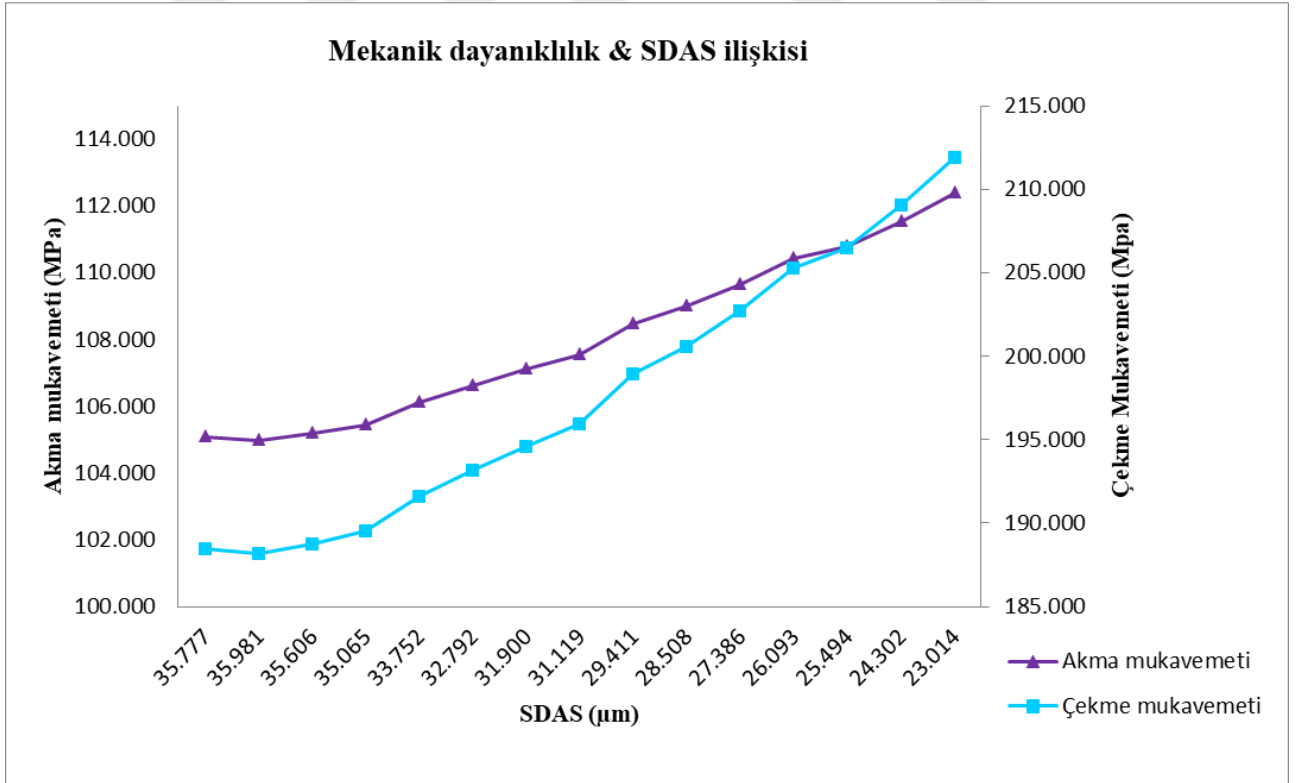
Şekil 44. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca porozite dağılımı.



Şekil 45. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca çekme dayanımı dağılımı.

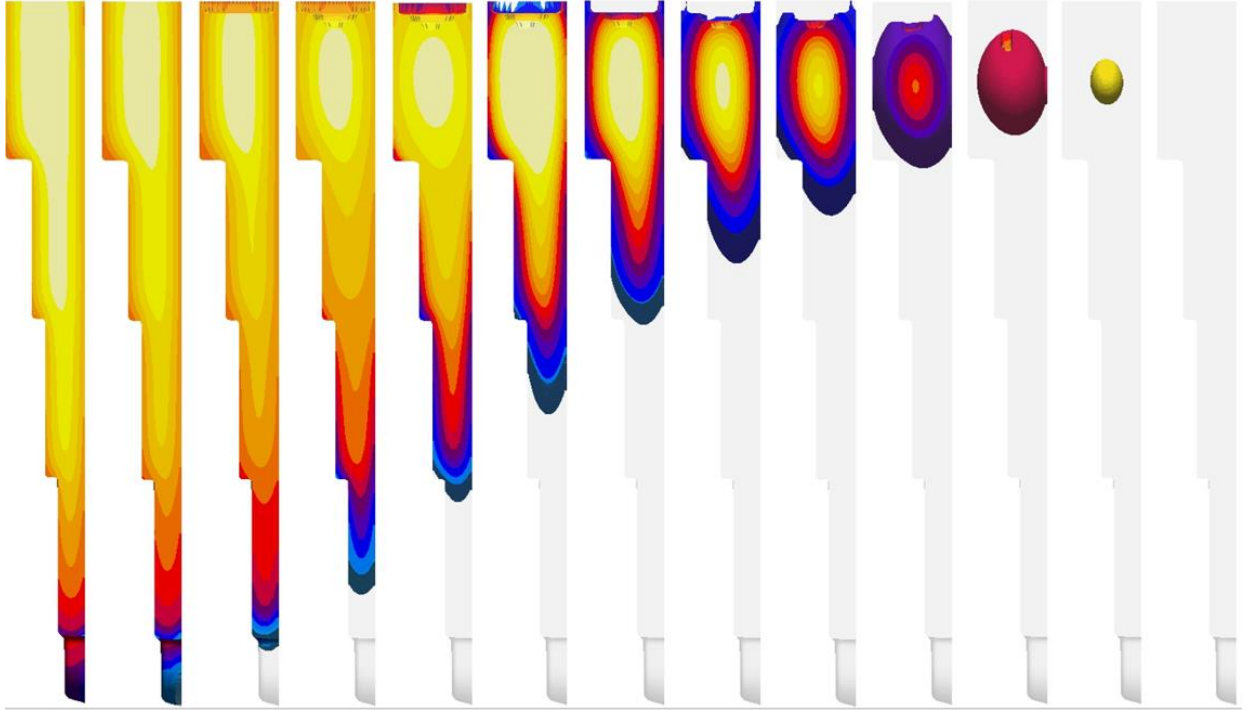


Şekil 46. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca akma dayanımı dağılımı.

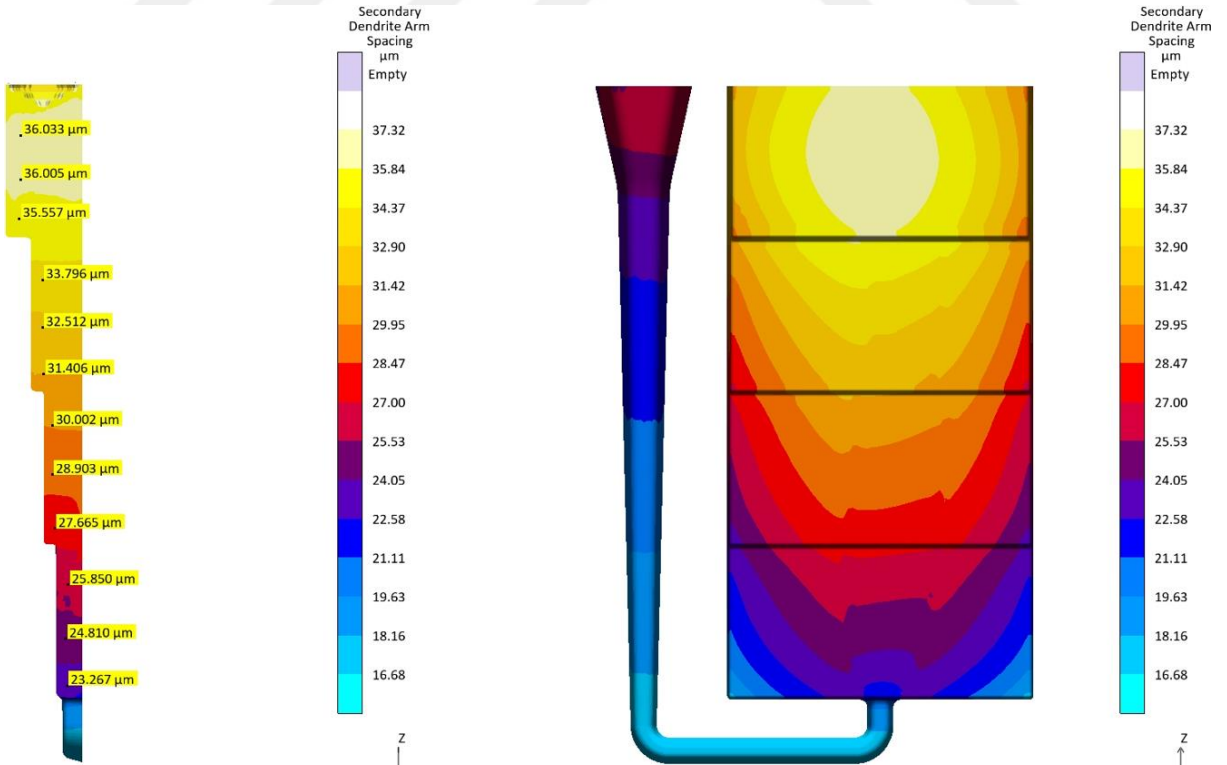


Şekil 47. Başlangıç döküm sıcaklığı 700 °C olan set için kesit boyunca çekme ve akma mukavemetinin SDAS ile ilişkisi.

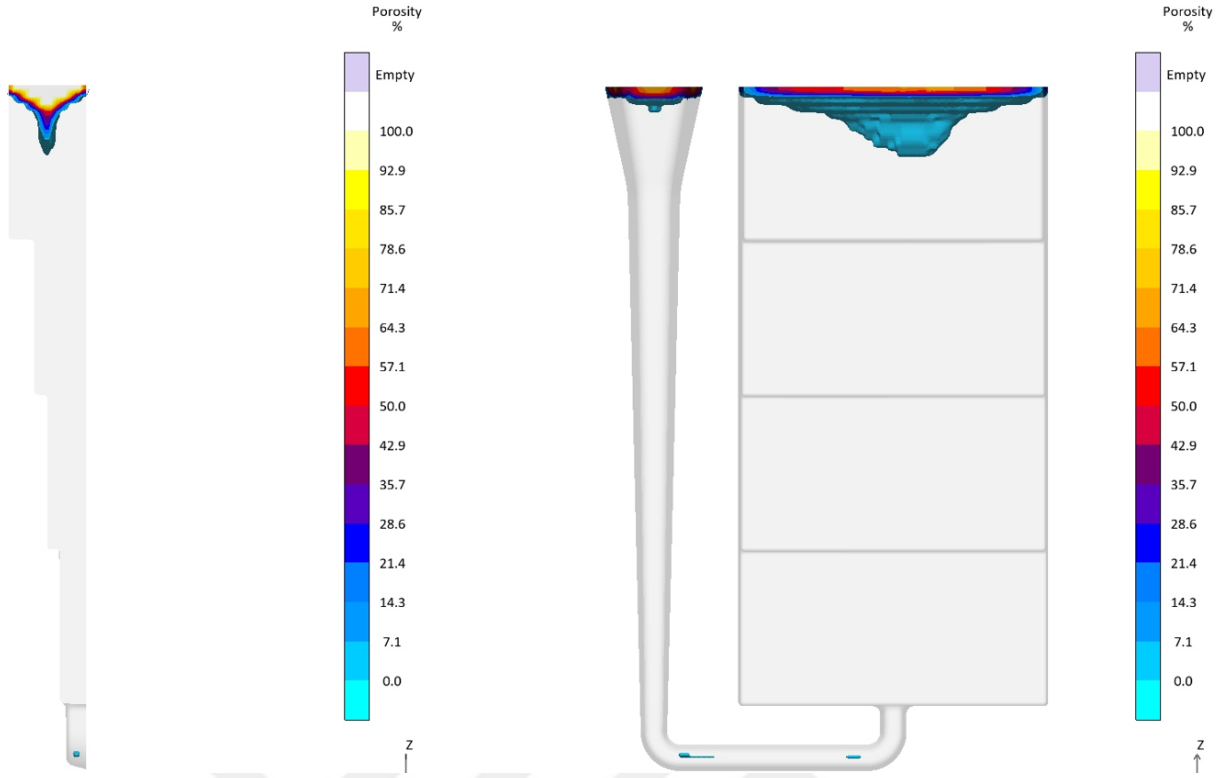
3.3. 720 °C Başlangıç Döküm Sıcaklığında Simülasyon Sonuçları



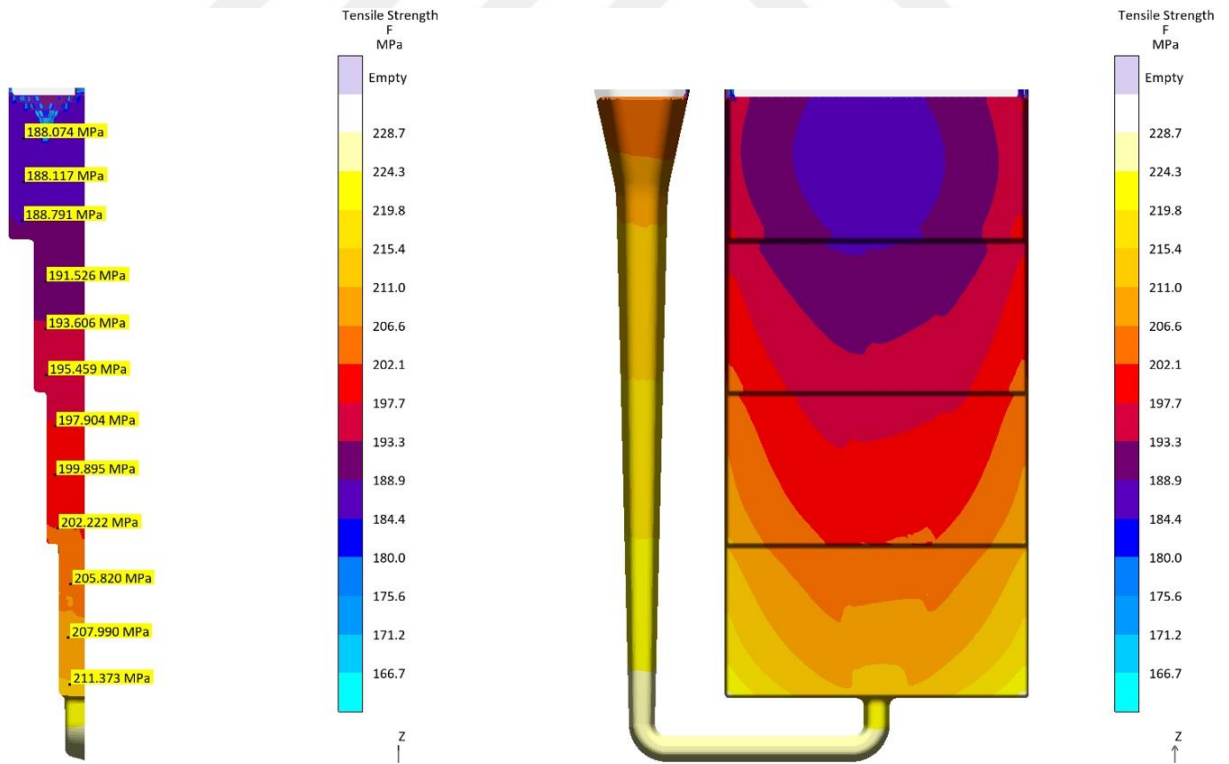
Şekil 48. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için katılaşma sürecinde kesit boyunca sıvı kalan bölgelerin değişen oranları.



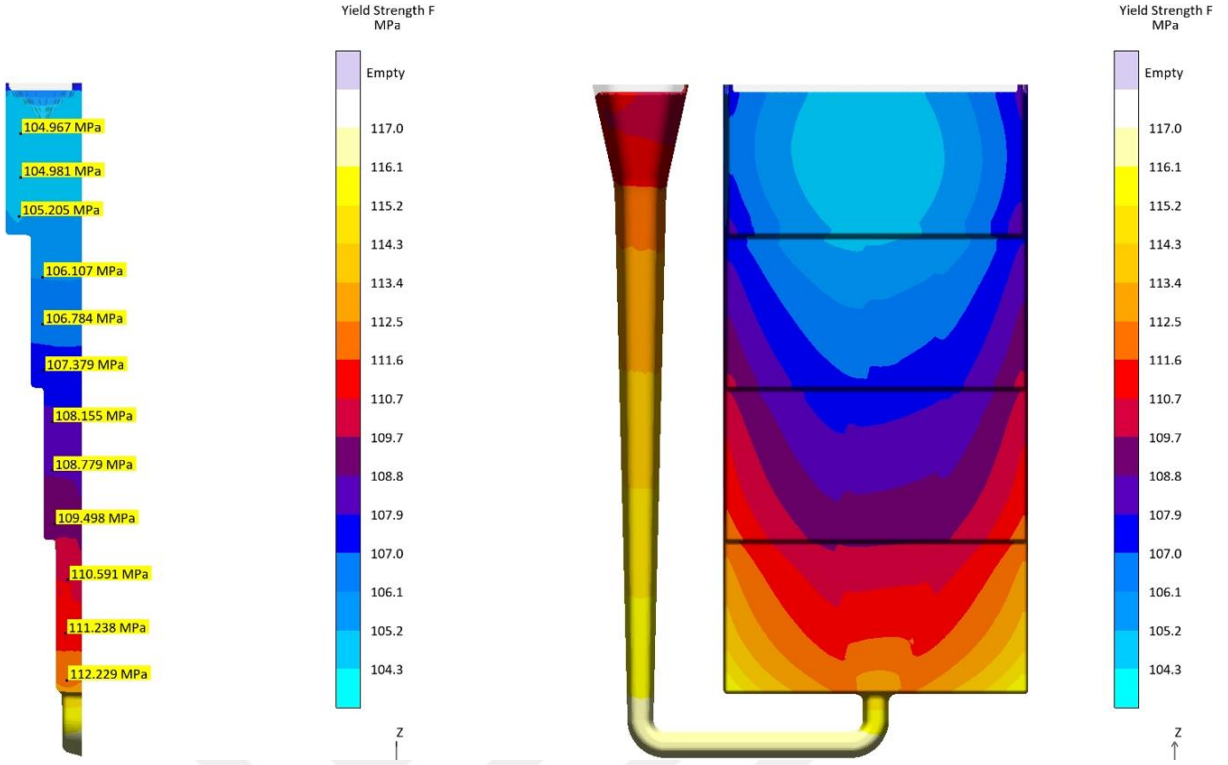
Şekil 49. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca SDAS dağılımı.



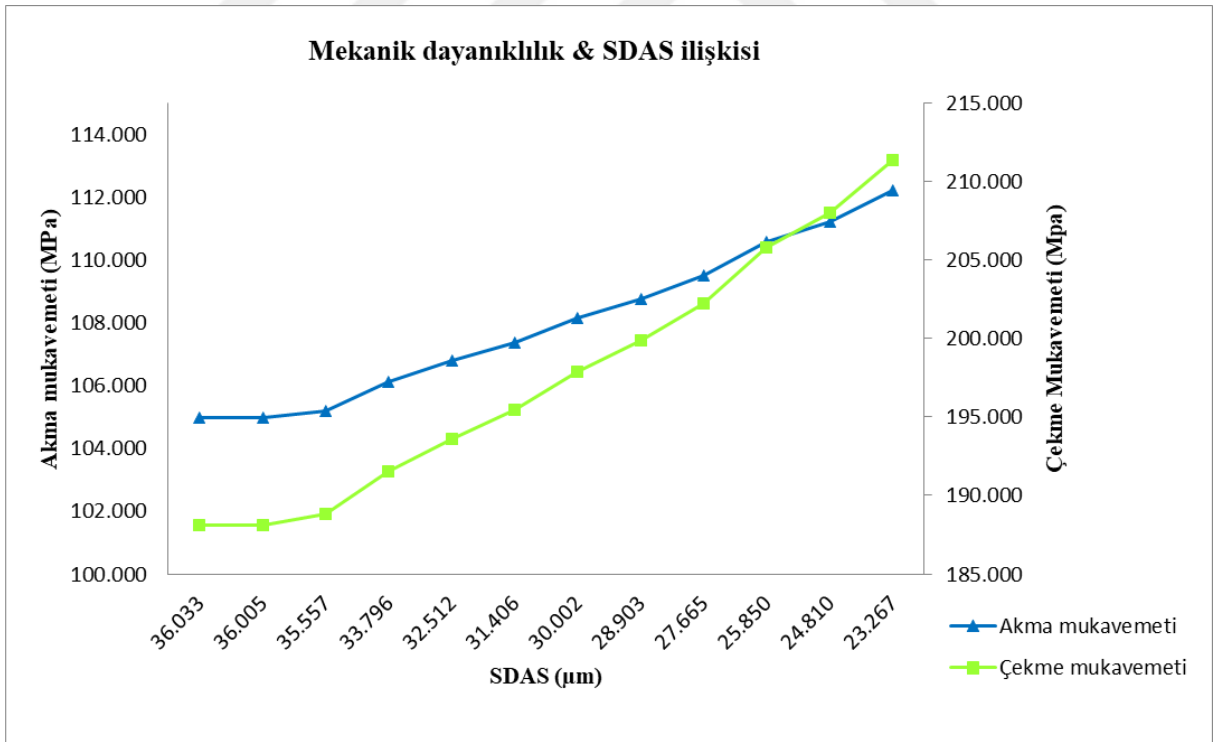
Şekil 50. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca porozite dağılımı.



Şekil 51. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca çekme dayanımı dağılımı.



Şekil 52. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca akma dayanımı dağılımı.



Şekil 53. Başlangıç döküm sıcaklığı 720 °C olan set için kesit boyunca çekme ve akma mukavemetinin SDAS ile ilişkisi.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Son yıllarda döküm simülasyon programları aracılığıyla döküm prosesleri modellenerek, kalıp doldurulurken ve doldurma tamamlandıktan sonrasında kalıp içinde meydana gelen süreçler hızlı ve doğru bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Gerçekleştirilen döküm proseslerinin modellenmesiyle, dökümün mikro ve makro yapıları etkili bir şekilde yorumlanabilmektedir. Döküm simülasyon programları, döküm kalıplarının tasarımını daha kolay ve daha doğru hale getirerek deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırma imkanı sunmaktadır. Parçanın simülasyonu ile döküm, katılma süreci kontrol edilebilmektedir ve süreçteki ilgili veriler yorumlanarak tasarımda gerekli revizyonlar yapılabilmektedir. Bununla birlikte, parça tasarımında kalite performansını arttırmak amacıyla da kullanılabilir. Bu nedenle, döküm simülasyon programları döküm endüstrisinde tasarım ve üretim süreçlerini büyük ölçüde iyileştirme yeteneğine sahiptir.

Döküm simülasyon programları, döküm parçaların tasarım aşamasında olası kalite sorunlarını önceden tahmin etmek ve gereken önlemleri almak için kullanılmaktadır. Bu sayede dökümhanelerde deneme yanılma yöntemleri azaltılarak üretim verimliliği ve kalite artışı sağlanmaktadır. Döküm proseslerinin modellenmesi, bilgisayarın kalıp doldurulurken ve doldurulduktan sonra kalıp içinde neler olacağını hızlı ve kesin bir şekilde tahmin edilebilmesi için kullanılan önemli bir matematiksel yaklaşımdır. Döküm simülasyon programları aracılığıyla kalıp dolumu sırasında sıvı madenin hızı, dökümün katılma süresi ve kalıbın doldurulması gibi özellikler belirlenebilmektedir. Bu çalışmada; dökümün katılması sırasındaki sıcaklık dağılımları, herhangi bir zamandaki sıcaklığı ve sıvı oranları, dökümde en son katılan bölgeler ve buna bağlı olarak beslenmesi gereken noktalar, döküm üzerinde oluşan çekinti (makro porozite) ve dökümün herhangi bir bölgesindeki akma ve çekme mukavemet değerlerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Katılma hızı, dökümün mikroyapısının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Daha yüksek soğutma hızı katılma süresini ve dökümün tane boyutunu azaltacağından, tane yoğunluğu soğuma hızıyla artmaktadır. Hızlı katılma koşullarında, döküm yapısı daha ince taneli bir yapıya sahip olma eğilimi göstermektedir. Bu durum, dentritler arasındaki besleme bölgesindeki sıvı akışını kolaylaştırarak daha kısa dentritik örgülerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu sayede dentritler arasındaki sıvı akış mesafesi kısalmaktadır, beslenebilirlik kapasitesi artmaktadır ve gözenek oluşumu azalmaktadır.

Dökümlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde en etkili değişkenlerden biri olan soğuma hızı, katılaşma hızını etkilemektedir. (Dobrzański et al., 2007; Hemanth et al., 2000; Zhang et al., 2007). Katılaşma hızı, alaşımın mikroyapısını ve dolayısıyla DAS değerini etkiler. DAS ile soğuma hızı arasında ters bir ilişki olduğu belirtilmektedir (Zhang et al., 2008; Dutta and Rettenmayr, 2000). 680 °C, 700 °C ve 720 °C başlangıç döküm sıcaklığında gerçekleştirilen simülasyonların sonuçlarının yer aldığı Şekil 37, Şekil 43 ve Şekil 49 birlikte incelendiğinde, kesiti ince olan bölgelerin daha hızlı soğumasına bağlı olarak daha hızlı katılaşmasının etkisiyle SDAS'ın incelen kesit boyunca azaldığı sonucu desteklenmektedir.

Metalin büzülmesi, döküm kusurlarının oluşum nedenlerindedir. Katılaşan döküm bölümünün eriyen metal ile beslenmesi kesildiğinde, boşluklar veya mikro poroziteler oluşmaktadır (Malik et al., 2020). Mikro porozitelerin oluşumu dayanıklılık özelliklerini azaltmaktadır (Shi, 2012). Sıvı metalin yeterince beslenememesi, dendritik yapıların arasındaki akışın zorluğu, gazların sıvı metaldeki yüksek içeriği ve katı fazda düşük gaz çözünürlüğü gibi faktörlerin bir kombinasyonu nedeniyle oluşan mikro porozitenin kritik boyuttan büyük olması durumu, gerilim oluşturarak erken çatlaklara neden olabilmektedir (Melo, 2005). Bu nedenle katılaşma süreci devam ederken döküm beslenmelidir (Malik et al., 2020). Döküm simülasyon programları, katılaşma sırasında oluşabilecek büzülme porozitesi gibi döküm kusurlarını önceden tespit edebilme yeteneğine sahiptir. Daha yüksek bir soğutma hızında katılaşma gerçekleşirken, SDAS azaldığında taneler arası bölgeler de azalmaktadır. Gözenek büyümesi kısıtlanacağı için genel porozite yüzdesinde düşüş görülmektedir. Katılaşma hızı arttıkça, porozitenin daha homojen dağılmasına neden olacağından büzülme porozitesini azaltmaktadır. Kesitin ince olduğu alanlar önce katılaşacağı için, alüminyum katılaşırken hacimsel bir küçülme meydana gelmektedir. Şekil 38, Şekil 44 ve Şekil 50'de yer alan katılaşma büzülmesinden kaynaklanan hacim azalmasını gösteren simülasyon sonuçları, katılaşma sırasında boşluksuz bir döküm elde edilebilmesi için sıvı metalin yeterince beslenmesi gerektiğini destekler niteliktedir.

Mekanik özellikler, katılaşma parametrelerine doğrudan bağlıdır. Daha yüksek soğutma hızlarında katılaşan numunelerin daha yüksek dayanımlar sergilediği sonuçlarına ulaşılmaktadır (Žbontar et al., 2021). Hızlı katılaştırılan döküm parçaları, daha homojen mikroyapılara sahip olmaları nedeniyle çok iyi bir mukavemete ve sünekliğine sahiptir. Döküm alüminyum alaşımlarının mikroyapısı geliştirilerek, mekanik performans arttırılabilmektedir (Mohandass et al., 2014). Dendrit kol aralığının azaltılmasıyla mekanik özelliklerin

iyileştirileceği bilinmektedir. Çekme mukavemeti, DAS'ın azalmasıyla doğrusal bir şekilde artmaktadır (Goulart et al., 2006). 680 °C, 700 °C ve 720 °C başlangıç döküm sıcaklığında gerçekleştirilen simülasyonlarla akma mukavemetleri ve çekme mukavemetleri ayrı ayrı elde edilmiştir. Her başlangıç döküm sıcaklık seti için, kesit boyunca çekme ve akma mukavemetleri dağılımları Şekil 39, Şekil 40, Şekil 45, Şekil 46, Şekil 51 ve Şekil 52'de yer almaktadır. Kesit incelikle katılma hızı artacağından, mekanik dayanım artma eğilimi göstermektedir. Simülasyon sonuçlarından yararlanılarak ayrı ayrı oluşturulan, her başlangıç döküm sıcaklık seti için kesit boyunca çekme ve akma mukavemetleri dağılımlarının SDAS ile ilişkisini gösteren Şekil 41, Şekil 47 ve Şekil 53'teki grafikler beraber değerlendirildiğinde; SDAS'ın artmasıyla nihai çekme dayanımının azaldığı görülmektedir. Daha hızlı katılma döküm ürünlerinin daha homojen mikroyapılara sahip olduklarından, daha iyi bir mukavemete ve daha iyi sünekliğe sahip olduğu desteklenir niteliktedir. Döküm alüminyum alaşımlarının mikroyapısı geliştirilerek mekanik performans geliştirilebilmektedir.

Elde edilen çıktılar, mekanik dayanımın katılma hızının fonksiyonu olduğunu kanıtlamaktadır. Mekanik kriterlerin karşılanmaması durumu, son derece maliyetli bir süreç olan kalıbın ve prosesin yeniden tasarlanmasına yol açabileceğinden; döküm kusurlarının mekanik dayanım ve dolayısıyla kalite üzerindeki etkilerini anlamak ve oluşumlarını azaltmak açısından simülasyon programlarından yararlanılarak zaman ve maliyet kayıplarının önüne geçilebilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akhtar, S., Dispinar, D., Arnberg, L. and Di Sabatino, M., 2009, Effect of hydrogen content, melt cleanliness and solidification conditions on tensile properties of A356 alloy, *International Journal Of Cast Metals Research*, 22:22-25 pp.

Aran, A., 1999, *Metal Döküm Teknolojisi*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 170s.

Başer, T. A., 2012, Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, *Mühendis ve Makina*, 635:51-58 pp.

Bonollo, F., Urban, J., Bonatto, B. and Botter, M., 2006, Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark, *La Metallurgia Italiana*, 6 (2000):23-32 pp.

Boileau, J., Zindel, J. and Allison, J., 1997, The Effect of Solidification Time on the Mechanical Properties in a Cast A356-T6 Aluminum Alloy, *SAE International*, SAE Technical Paper 970019

Chen, R., Shi, Y., Xu, Q. and Liu., B., 2014, Effect of cooling rate on solidification parameters and microstructure of Al-7Si-0.3Mg-0.15Fe alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24:1645-1652 pp.

CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş., www.cms.com.tr (Erişim tarihi: 13.08.2023)

Colosio, M. A. and Santos, J. C., 2008, Influence of residual stresses in aluminum wheel design, *SAE Technical Paper*, 2008 SAE Brasil Congress and Exhibit

Conley, J. G., Huang, J., Asada, J. and Akiba, K., 2000, Modeling the effects of cooling rate, hydrogen content, grain refiner and modifier on microporosity formation in Al A356 alloys, *Materials Science and Engineering A*, 285:49-55 pp.

Çolak, M. ve Kayıkcı, R., 2009, AlTiB Mastır Alaşımı İlavesinin Etial160 Döküm Alaşımı Üzerinde Tane İnceltme Etkisinin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS 09).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dobrzański, L. A., Maniara, R., Sokółowski, J. and Kasprzak, W.,** 2007, Effect of cooling rate on the solidification behavior of AC AlSi7Cu2 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 191:317- 320 pp.
- Dutta, B. and Rettenmayr, M.,** 2000, Effect of cooling rate on the solidification behaviour of Al-Fe-Si alloys, *Materials Science and Engineering A*, 283:218-224 pp.
- Gokhale, A. M. and Patel, G. R.,** 2005. Analysis of variability in tensile ductility of a semi-solid metal cast A356 Al-alloy, *Materials Science & Engineering A*, 392:184–190 pp.
- Goulart, P. R., Spinelli, J. E., Osorio, W. R. and Garcia, A.,** 2006, Mechanical properties as a function of microstructure and solidification thermal variables of Al-Si castings, *Materials Science and Engineering A*, 421:245–253 pp.
- Hall, E. O.,** 1951, The deformation and ageing of mild Steel: III Discussion of results, *Proceedings of the Physical Society*, B64:747-753 pp.
- Hemanth, J.,** 2000, Effect of cooling rate on dendrite arm spacing (DAS), eutectic cell count (ECC) and ultimate tensile strength UTS of austempered chilled ductile iron, *Materials and Design*, 21:1-8 pp.
- Hosseini, V. A., Shabestari, S. G. and Gholizadeh, R.,** 2013, Study on the effect of cooling rate on the solidification parameters, microstructure, and mechanical properties of LM13 alloy using cooling curve thermal analysis technique, *Materials and Design*, 50:7-14 pp.
- Işık, B., Zeren, M. ve Atamay, K.,** 2020, Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum alaşımlı otomobil jant üretiminin simülasyonu, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1):125-132 pp.
- İrfan, M. A., Schwam, D., Karve, A. and Ryder, R.,** 2012, Porosity reduction and mechanical properties improvement in die cast engine blocks, *Materials Science and Engineering A*, 535:108-114 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Jeon, J. H. and Bae, D. H., 2019, Effect of cooling rate on the thermal and electrical conductivities of an A356 sand cast alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 808 (151756)

Katgerman, L. and Dom, F., 2004, Rapidly solidified aluminium alloys by meltspinning, *Materials Science and Engineering A*, 375-377:1212-1216 pp.

Kordijazi, A., Weiss, D., Das, S., Behera, S., Roshan M., Hathibelagal M. and Rohatgi, P., 2021, Effect of solidification time on microstructure, wettability, and corrosion properties of A205-T7 aluminum alloys, *International Journal of Metalcasting*, 15:2-12 pp.

Lee, C., 2013, Effect of T6 heat treatment on the defect susceptibility of fatigue properties to microporosity variations in a low-pressure die-cast A356 alloy, *Materials Science & Engineering A*, 559:496-505 pp.

Li, P., Maijer, D. M., Lindley, T. C. and Lee, P. D., 2007, A through process model of the impact of in-service loading, residual stress, and microstructure on the final fatigue life of an A356 automotive wheel, *Materials Science and Engineering A*, 460-461:20-30 pp.

Li, P., Maijer, D. M., Lindley, T.C. and Lee, P. D., 2007, Simulating the residual stress in an A356 automotive wheel and its impact on fatigue life, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 38:505-515 pp.

Liao, H., Sun, Y. and Sun, G., 2002, Correlation between mechanical properties and amount of dendritic -Al phase in as-cast near-eutectic Al-11.6%Si alloys modified with strontium, *Materials Science & Engineering A*, 335:62-66 pp.

MAGMA, <https://www.magma-soft.de/> (Erişim tarihi: 13.08.2023)

Malik, I., Sani, A. A. and Medi, A., 2020, Study on using casting simulation software for design and analysis of riser shapes in a solidifying casting component, *Journal of Physics: Conference Series*, 1500 (012036)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Melo, M. L. N. M., 2005, Predicting dendrite arm spacing and their effect on microporosity formation in directionally solidified Al-Cu alloy, *Journal Of Materials Science*, 40:1599-1609 pp.

Mohandass, M., Venkatesan, A., Karthikeyan, S., Prasanth, P. S. and Vinuvarshith, S. K., 2014, Effect of cooling rate on mechanical behaviour of bulk cast of A380 aluminium alloy, *International Journal of Engineering and Technology*, 6:374-380 pp.

Osorio, W. R. and Garcia, A., 2002, Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn–Al alloys as a function of solidification conditions, *Materials Science and Engineering A*, 325:103-111 pp.

Seniw, M. E., Fine, M. E., Chen, E. Y., Meshii, M. and Gray, J., 1997, Relationship of defect size and location to fatigue failure in Al alloy A356 cast specimens, United States.

Shi, X., Defect minimizing control of low pressure die casting (Vancouver, The University Of British Columbia, Electrical and Computer Engineering, Doktora tezi, 2012)

Smith, W. F., 2001, *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, (Çev. N.G. Kınıkoğlu), Literatür Yayıncılık Dağıtım, İstanbul, 109-158 s.

Tang, H.-P., Wang, Q.-D., Lei, C., Ye, B., Wang, K., Jiang, H.-Y., Ding, W.-J., Zhang, X.-F., Lin, Z. and Zhang, J.-B., 2019, Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of an Al-5.0Mg-3.0Zn-1.0Cu cast alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 801:596-608 pp.

Tebaldini, M., Petrogalli, C., Donzella, G. and Vecchia, G.M.L., 2017, Estimation of fatigue limit of a A356-T6 automotive wheel in presence of defects, *Procedia Structural Integrity*, 7:521-529 pp.

The Aluminium Automotive Manual, 2002, “Manufacturing–Casting methods”, <https://european-aluminium.eu/> (Erişim tarihi: 13.08.2023)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

The Aluminium Automotive Manual, 2002, “Products–Cast alloys and products”, <https://european-aluminium.eu/> (Erişim tarihi: 13.08.2023)

Topçuoğlu, Ö.Y., Çe, Ö.B., Aybarç, U. Ve Keşkiç, M., 2014, Alçak Basınç Döküm Prosesinde Kullanılan Kalıp Kaplama Malzemesinin Metal Akışkanlığına Etkisi, 7. Uluslararası Ankiros Döküm Kongresi, İstanbul

Yang, Z., Kang, C. G. and Seo, P. K., 2005, Evolution of the rheocasting structure of A356 alloy investigated by large-scale crystal orientation observation, *Scripta Materialia*, 52:283–288 pp.

Yue, L., Hongxiang, L. and Laurens, K., 2021, Recent advances in hot tearing during casting of aluminium alloys, *Progress in Materials Science*, 177:2056–2062 pp.

Žbontar, M., Petrič, M. and Mrvar, P., 2021, The influence of cooling rate on microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3, *Metals*, 11 (2):186.

Zhang, B., Chen, W. and Poirier, D. R., 2000, Effect of solidification cooling rate on the fatigue life of A356.2-T6 cast aluminium alloy, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 23 (5):417-423 pp.

Zhang, B., Cockcroft, S. L., Maijer, D. M., Zhu J. D. and Phillion, A. B., 2005, Casting defects in low-pressure die-cast aluminum alloy wheels, *The Journal of The Minerals*, 57:36-43 pp.

Zhang, L. Y., Jiang, Y. H., Ma, Z., Shan, S. F., Jia, Y. Z., Fan, C. Z. and Wang, W. K., 2008, Effect of cooling rate on solidified microstructure and mechanical properties of aluminium-A356 alloy, *Journal Of Materials Processing Technology*, 207:107-111 pp.

Zhang, L. Y., Zhou, B. D, Zhan, Z. J., Jia, Y. Z., Shan, S. F., Zhang, B. Q. and Wang, W. K., 2007, Mechanical properties of cast A356 alloy, solidified at cooling rates enhanced by phase transition of a cooling medium, *Materials Science and Engineering A*, 448:361-365 pp.

TEŞEKKÜR

Bu alıŐma, CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ő. ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bana zaman ayıran ve yardımcı olan CMS Ar-Ge ekibine ve bu çalışmada tezin planlanmasından itibaren bütün sürecin değerlendirilmesi boyunca deneyimleriyle bana yol gösteren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Aysun Baltacı'ya sonsuz teşekkür ederim

13 / 08 / 2023

Çiğdem Şatırer

ÖZGEÇMİŞ

Lisans eğitimini Ege Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde tamamlayan Çiğdem Şatırer, 2020 yılında Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans Programı'na dahil olmuştur ve 2023 yılında yüksek lisans eğitimini başarıyla tamamlamıştır.

Tez çalışmasını bünyesinde tamamladığı CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş.'de Müşteri ve Proje Kalite Mühendisi olarak çalışma hayatına devam etmektedir.

