

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg ALAŞIMLARININ BİNEK ARAÇ JANT
MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Didem TARKUN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celaletdin ERGUN

Ocak 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg ALAŞIMLARININ BİNEK ARAÇ JANT
MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Didem TARKUN
(503101304)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celaletdin ERGUN

Ocak 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503101304 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi **Didem TARKUN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg ALAŞIMLARININ BİNEK ARAÇ JANT MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Celaletdin ERGUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Semih SEZER**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **10 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **19 Ocak 2015**

Anneme ve babama,

ÖNSÖZ

Bu çalışma, CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş. ile birlikte gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bana yardımcı olan, zaman ayıran ve beni destekleyen, başta Sn. Yunus Ercan ve Sn. Yılmaz Okçu olmak üzere, Sn. Özgür Topçuoğlu'na, Sn. Özkan Bekiroğlu'na, tüm çalışma arkadaşlarıma ve yöneticilerime teşekkür ederim. Bu çalışmada bana yol gösteren ve yardımını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Celaletdin Ergun'a ve hayatımın her devresinde yanımda olup bugünlere gelmemi sağlayan sevgili aileme de sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2015

Didem Tarkun
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viix
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Literatür Araştırması	5
1.2.1 Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılmaları	5
1.2.1.1 Alüminyum döküm alaşımlarının özellikleri ve jant üretiminde kullanılan Al-Si ötektik sistemleri	7
1.2.1.2 Jant üretiminde kullanılan Al-Si döküm alaşımlarının mekanik ve metalurjik özelliklerine etkileyen faktörler	9
1.2.2 Jant üretimi.....	25
1.2.2.1 Dövme yöntemi ile jant üretimi	25
1.2.2.2 Soğuk şekillendirme yöntemi ile jant üretimi	27
1.2.2.3 Alçak basınçlı döküm yöntemi ile jant üretimi	28
2. MALZEME VE METHOD.....	41
2.1 Sonlu Elemanlar Analizi ve Deney Tasarımında Kullanılan Malzemeler	41
2.2 Tasarım Doğrulama ve Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışmaları	42
2.2.1 Kalıp tasarımı doğrulama ve döküm simülasyonu.....	43
2.2.2 Ürün tasarımı doğrulama ve mekanik test simülasyonları.....	45
2.2.2.1 ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu	45
2.2.2.2 Hızlandırılmış ömür testi simülasyonu	49
2.3 Deney Tasarımı ve Ürün Doğrulama Testleri	51
2.3.1 ISO 7141 13° darbe testi	51
2.3.2 Hızlandırılmış ömür testi	54
2.3.3 Kimyasal analiz	55
2.3.4 Çekme testi.....	58
2.3.5 Sertlik testi	59
2.3.6 Mikroyapı analizi	59
3. SONUÇLAR	63
3.1 Tasarım Doğrulama ve Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçları	63
3.1.1 Döküm simülasyonu sonuçları.....	63
3.1.2 Mekanik test simülasyon sonuçları	68
3.1.2.1 ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu	68
3.1.2.2 Hızlandırılmış ömür testi simülasyonu	73
3.2 Deney Tasarımı ve Ürün Doğrulama Test Sonuçları	75
3.2.1 ISO 7141 13° darbe testi sonuçları	75

3.2.2 Hızlandırılmış ömür testi sonuçları	79
3.2.3 Kimyasal analiz sonuçları	83
3.2.4 Çekme testi sonuçları	83
3.2.5 Sertlik ölçümü sonuçları	85
3.2.6 Mikroyapı analizi	86
4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER.....	93
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	98

KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
Al-Si	: Alüminyum silisyum alaşıımı
AlSi7Mg	: %7 oranında silisyum elementi içeren alüminyum silisyum alaşıımı
AlSi7Mg T6	: Isıl işlem görmüş %7 oranında silisyum elementi içeren alüminyum silisyum alaşıımı
AlSi11Mg	: %11 oranında silisyum elementi içeren alüminyum silisyum alaşıımı
Ar	: Argon
DAS	: Dendrit kol uzunluğu
EAA	: Avrupa Alüminyum Birliği
ETRTO	: Avrupa Lastik ve Jant Teknik Organizasyonu
H₂	: Hidrojen gazı
HB	: Brinell Sertlik Değeri
N₂	: Azot gazı
Na	: Sodyum
OEM	: Orjinal Ekipman Üreticisi
P	: Fosfor
T6	: Yapay yaşlandırma yöntemi ile ısıl işlem
Si	: Silisyum
Sr	: Stronsiyum
Sb	: Antimon

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Alüminyum dövme alaşımları gösterimi.....	6
Çizelge 1.2 : Alüminyum döküm alaşımları gösterimi.....	6
Çizelge 1.3 : Alüminyum alaşımları için temper seri numaralarının tanımları	7
Çizelge 2.1 : AlSi7Mg – AlSi11Mg alaşımları ile üretilen jantın çekme testi referans bölgelerinden alınan çekme numuneleri gereklilikleri	42
Çizelge 2.2 : AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları için alaşım elementi oranı değer aralığı.....	58
Çizelge 2.3 : AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları için minimum Brinell sertlik değerleri.....	61
Çizelge 3.1 : Müşteri şartnamesine göre janta uygulanan moment değeri ve jantın tamamlaması gereken çatlaksız tur sayısı (ömür).	73
Çizelge 3.2 : Çatlaksız tur sayısına göre hızlandırılmış ömür testi simülasyonu von Mises limit değerleri.....	74
Çizelge 3.3 : AlSi11Mg, AlSi7Mg ve AlSi7Mg T6 jantlarına ait ISO 7141 13° darbe testi sonuçları.....	77
Çizelge 3.4 : Test sonucu AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları ile üretilmiş jantların ulaştığı maksimum ömür değerleri.	79
Çizelge 3.5 : AlSi11Mg ve AlSi7Mg alaşımlarına ait kimyasal analiz sonuçları.....	83
Çizelge 3.6 : Sertlik ölçüm sonuçları.....	86
Çizelge 4.1 : AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımları ile üretilen jantlar için dökülen ürün adedi ve fire oranı.....	94

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Aluminyum alaşımlı jant.	2
Şekil 1.2 : Aluminyum alaşımlı jantların sınıflandırılmasında kullanılan ölçüler.....	3
Şekil 1.3 : Aluminyum alaşımlı jant kesidi.	3
Şekil 1.4 : Farklı stil yüzeyine sahip aluminyum alaşımlı jantlar.	4
Şekil 1.5 : Al-Si alaşımında tane yapısı.....	9
Şekil 1.6 : Yüzey enerjisinin çekirdek geometrisine etkisi.....	10
Şekil 1.7 : Kum kalıba döküm sonrası elde edilen iç yapı (sol) ve metal kalıba döküm sonrası elde edilen iç yapı (sağ)	11
Şekil 1.8 : Al-Ti sisteminde gerçekleşen peritektik reaksiyon [14].....	12
Şekil 1.9 : Al-Ti sisteminde gerçekleşen peritektik reaksiyona ait faz diyagramı. ...	12
Şekil 1.10 : AlSi7Mg alaşımında Sr modifikasyon etkisi.	15
Şekil 1.11 : Al-Si hipotektik alaşımlarına ait faz diyagramı ve katılaşmaya ait temsili iç yapı.	17
Şekil 1.12 : Al-Si hipotektik alaşımlarında dengesiz katılaşma.	17
Şekil 1.13 : Al-Si7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarına ait katılaşma aralıklarının Al-Si faz diyagramı üzerinde gösterimi.	18
Şekil 1.14 : Değişen gaz boşluğu seviyesine sahip ömür test parçası örneği.	19
Şekil 1.15 : Gaz boşluğu büyüklüğünün ömür üzerindeki etkisi.....	20
Şekil 1.16 : Jant üzerinde feder lastik kesit geçiş görünümü.....	21
Şekil 1.17 : Kalıp kesidi üzerinde feder lastik kesidi geçiş görünümü.....	21
Şekil 1.18 : Yapay yaşlandırma (T6) yöntemi ile ısıtılma süreçleri.	22
Şekil 1.19 : Yaşlandırma yöntemi ile ısıtılma ilk kademe yapı değişimi.....	24
Şekil 1.20 : Yaşlandırma yöntemi ile ısıtılma ara kademe yapı değişimi.	24
Şekil 1.21 : Denge aşaması.....	25
Şekil 1.22 : Dövme yönteminde kullanılan aluminyum blokları.....	26
Şekil 1.23 : Dövme yönteminde kullanılan aluminyum blokları.....	26
Şekil 1.24 : Alçak basınçlı döküm yönteminde kullanılan tezgah.....	28
Şekil 1.25 : Hammadde eritme tezgahı.....	30
Şekil 1.26 : Sr, AlTi5B ve Mg çubukları.....	30
Şekil 1.27 : Gaz giderme işlemi.....	31
Şekil 1.28 : Alçak basınçlı döküm yönteminde kullanılan tezgah.....	32
Şekil 1.29 : Alçak basınçlı döküm yönteminde kullanılan kalıp ve elemanları.	32
Şekil 1.30 : Alçak basınçlı döküm prosesinin şematik görünümü.	33
Şekil 1.31 : Döküm ve katılaşma yönlerinin kalıp üzerinde gösterimi.....	34
Şekil 1.32 : Isıl işlem tesisi.	36
Şekil 1.33 : Talaşlı imalat operasyon istasyonu.	36
Şekil 1.34 : Ön yüzey işleme operasyon istasyonu.....	37
Şekil 1.35 : Toz boya kabini.....	38
Şekil 1.36 : Standart boyalı jant ön yüzeyi (sağ) ve ön yüzey işlemeli jant (sol).....	39
Şekil 2.1 : Jant üzerinde çekme testi referans bölgeleri.....	41
Şekil 2.2 : 7 J x 16” jant için bağıl proses süresi ve basınç grafiği.	44

Şekil 2.3 : 7 J x 16" jant için bağıl katılaşma miktarı ve katılaşma süresi grafiği.....	45
Şekil 2.4 : ISO 7141 13° darbe testi simülasyonunda kullanılan elemanlar.....	46
Şekil 2.5 : ISO 7141 13° darbe testi simülasyonunu öncesi ve sonrası.....	47
Şekil 2.6 : Birim eleman üzerine altı eksenle etkiyen gerilmeler.....	47
Şekil 2.7 : Birim eleman üzerine etkiyen asal gerilmeler.....	48
Şekil 2.8 : Maksimum asal gerilme teoremi hata bölgesi.....	48
Şekil 2.9 : Hızlandırılmış ömür testi simülasyonunda kullanılan elemanlar bijon, şaft, jant ve flanş ile simülasyon modelinin montajı.....	50
Şekil 2.10 : ISO 7141 13° darbe testi ekipmanı şematik görünümü.....	52
Şekil 2.11 : ISO 7141 13° darbe testi tezgahının şematik görünümü.....	53
Şekil 2.12 : ISO 7141 13° darbe testi cihazı.....	53
Şekil 2.13 : Hızlandırılmış ömür testi test makinası şematik görünümü.....	54
Şekil 2.14 : Hızlandırılmış ömür testi cihazı.....	55
Şekil 2.15 : Optik emisyon spektrometresi.....	55
Şekil 2.16 : Elemente bağlı olarak elde edilen alev renkleri.....	56
Şekil 2.17 : Ark/spark OES şematik görünümü.....	56
Şekil 2.18 : Optik emisyon spektrometresi ile test edilen bir yüzey örneği.....	57
Şekil 2.19 : Alev resmi (sağ) ve alaşım içindeki Potasyum elementi dalga boyu..	57
Şekil 2.20 : DIN 50125 çekme çubuğu ölçüleri.....	58
Şekil 2.21 : Çekme testi cihazı.....	59
Şekil 2.22 : Çekme testi ölçüm sonucu gerilme – kopma uzaması grafiği.....	59
Şekil 2.23 : Brinell sertlik ölçüm methodu.....	60
Şekil 2.24 : Sertlik ölçüm cihazı (sol) ve sonuç görüntüleme (sağ).....	60
Şekil 2.25 : Jant üzerinde Brinell sertlik ölçüm pozisyonları.....	61
Şekil 2.26 : Mikroyapı analizinde kullanılan ters metal mikroskobu.....	61
Şekil 3.1 : AlSi7Mg alaşımı için kalıp dolum simülasyonu (sol) ve AlSi11Mg alaşımı için kalıp dolum simülasyonu (sağ).....	64
Şekil 3.2 : Alüminyum alaşım jant kalıbı içerisinde metal dolum yönü.....	64
Şekil 3.3 : Jant dökümü sırasında kalıp içerisinde türbülans oluşumu.....	65
Şekil 3.4 : Jant kalıbı içerisinde türbülans oluşan bölgelerde dolum hızı kontrolü..	65
Şekil 3.5 : AlSi7Mg alaşımı dökümü için katılaşma süresi (sol) ve AlSi11Mg alaşımı dökümü için katılaşma süresi (sağ).....	66
Şekil 3.6 : AlSi7Mg (sol) ve AlSi11Mg (sağ) alaşımları için katılaşmanın 95. saniyesinde katılaşan miktar görünümü.....	67
Şekil 3.7 : AlSi7Mg (sol) ve AlSi11Mg (sağ) alaşımları için topuk bölgesi katılaşma karşılaştırması.....	67
Şekil 3.8 : AlSi7Mg (sol) ve AlSi11Mg (sağ) alaşımları toplam gaz boşluğu miktarı oranı karşılaştırması.....	68
Şekil 3.9 : AlSi7Mg T6 alaşımı ile yapılan ISO 7141 13° darbe testi simülasyon sonucu stil yüzeyinde kritik bölgeler ve gerilme değerleri.....	70
Şekil 3.10 : AlSi7Mg T6 jantı ile ISO 7141 13° darbe testi simülasyon sonucu arka yüzeyde kritik bölgeler ve gerilme değerleri.....	71
Şekil 3.11 : AlSi11Mg jantı ile ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonucu stil yüzeyinde kritik bölgeler ve gerilme değerleri.....	72
Şekil 3.12 : AlSi11Mg jantı ile ISO 7141 13° darbe testi simülasyon sonucu arka yüzeyinde kritik bölgeler ve gerilme değerleri.....	73
Şekil 3.13 : Jant stil yüzeyinde maksimum gerilme oluşan bölge.....	74
Şekil 3.14 : Jant arka yüzeyinde maksimum gerilme oluşan bölge.....	75
Şekil 3.15 : Jant için belirlenen darbe pozisyonları.....	76

Şekil 3.16 : Sübap üzeri +175kg. darbe yükü testi sonrası feder arası çatlak bölgesi ve feder üzeri pozisyonda +200 kg. darbe yükü ile yapılan test sonrası bijon kenarı çatlak bölgesi	78
Şekil 3.17 : AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş janta ait Wöhler eğrisi.	79
Şekil 3.18 : AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş janta ait k katsayısı eğim grafiği.	80
Şekil 3.19 : AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş janta ait Wöhler eğrisi.....	80
Şekil 3.20 : AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş janta ait k katsayısı eğim grafiği.	81
Şekil 3.21 : AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş janta ait Wöhler eğrisi.....	81
Şekil 3.22 : AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş janta ait k katsayısı eğim grafiği.	82
Şekil 3.23 : AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımlı jantlara ait feder, iç flanş ve dış flanş akma gerilmesi değerleri.	83
Şekil 3.24 : AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımlı jantlara ait feder, iç flanş ve dış flanş çekme gerilmesi değerleri.	84
Şekil 3.25 : AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımlı jantlara ait feder, iç flanş ve dış flanş kopma uzaması değerleri.	85
Şekil 3.26 : Brinell sertlik testi için jant kesidi üzerinde ölçüm alınan noktalar.	85
Şekil 3.27 : AlSi11Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi7Mg dış flanş mikroyapı karşılaştırması.	87
Şekil 3.28 : AlSi11Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi7Mg iç flanş mikroyapı karşılaştırması.	88
Şekil 3.29 : AlSi11Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi7Mg feder mikroyapı karşılaştırması.	89
Şekil 3.30 : AlSi11Mg mikroyapısı içerisinde gaz boşluğu (1) ve Fe-Mn intermetalik oluşumu (2).	90
Şekil 3.31 : AlSi11Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi7Mg feder mikroyapı karşılaştırması.	91
Şekil 4.1 : Tikso kalıplama presi	91

AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg ALAŞIMLARININ BİNEK ARAÇ JANT MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Alçak basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum jant üretiminde en yaygın kullanılan alaşımlar, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarıdır. Bu alaşımlar %12.7'den daha az oranda %Si içerdiklerinden, hipoeüktik alaşımlardır. AlSi7Mg alaşımının ısıt işlemlili (yapay yaşlandırma) olarak üretimi daha yaygın olup, daha az yaygın da olsa ısıt işlemsiz uygulaması da mevcuttur. AlSi11Mg alaşımı için ısıt işlemlili uygulama mevcut değildir.

Hangi üründe hangi alaşımın kullanılması gerektiği bilgisi; ürünün görünen kısmı olan stil yüzeyi tasarımı ile birlikte, ana ekipman üreticisi (OEM) tarafından şartname içerisinde belirtilmektedir. Diğer yandan günümüzde tüm ana ekipman üreticilerinin hedefi; dayanımdan ödün vermeden daha az maliyetli ürün tasarım ve üretimi yapmaktır. Bu nedenle, alüminyum alaşımlı jant sektöründe rekabet edebilmek için; hafif, ürün malzeme ve üretim maliyeti düşük, yüksek dayanıma sahip ve pazar talebine yönelik optimum ürün tasarımı yapılması önem taşımaktadır. Ana ekipman üreticisi; şartnamesinde o ürün için hangi alaşımın kullanılacağını belirtilmesine rağmen, ürün dayanımı minimum aynı kalacak şekilde daha az maliyetli bir ürün tasarımı çözümü, gerekli test ve simülasyon çalışmaları ile doğrulandığı takdirde, ana ekipman üreticisi tarafından da kabul görecektir. Ana ekipman üreticilerinin büyük kısmı, ürün tasarımı ve üretimi uzmanlığı gerektiren bu gibi çalışmaları yan sanayilerinden beklemektedirler. Ana ekipman üreticisi için hem ürün maliyeti anlamında optimum çözüm sunan, hem de ana ekipman üreticisine teknik bilgi birikimi anlamında katma değer kazandırabilen yan sanayiler; alüminyum alaşım jant sektöründe rekabetçi olarak kalabilmektedirler.

AlSi11Mg ile ısıt işlemlili ve ısıt işlemsiz olarak üretilebilen AlSi7Mg alaşımlarının; üretilebilirlik, maliyet ve dayanım anlamında birbirilerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Bu nedenle; tasarımı belli olan bir ürünün hangi alaşım ile üretiminin daha uygun olduğu belirlenirken, öncelikle ürünün tasarımı ve büyüklüğü

önemlidir. Dayanım anlamında ön plana çıkan alaşım; ısıtma işlemi uygulanmış AlSi7Mg alaşımıdır. Bu nedenle; belirli bir büyüklüğün üzerindeki ürünlerin, istenen teker yükünü taşıyabilmesi için ısıtma işlemli AlSi7Mg alaşımı haricinde bir alaşım ile üretilmesi, alçak basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum alaşım jant üretimi için şu an mevcut değildir. Bunun nedeni, 19" ve üzeri büyüklüğünde jantların, kullandıkları araçlar gereği teker yüklerinin daha fazla olmasıdır. Isıtma işlemli AlSi7Mg ile jant üretiminin maliyeti, öncelikle ısıtma işlemi prosesinde dolayı daha fazladır. Bu maliyetin içerisinde hem ısıtma işlemi tesis maliyeti, hem süresi, hem de ısıtma işlemi kaynaklı distorsiyona bağlı olarak artan fire oranları dahildir. AlSi11Mg alaşımının dökümü, artan %Si oranı nedeniyle akışkanlık arttığından daha kolay gerçekleşmektedir, ayrıca katılma süresi AlSi7Mg alaşımına göre %20 daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Buna göre birim zamanda üretilen AlSi11Mg jant adedi daha yüksektir. Ancak, katılma süresi yetersiz olduğundan kalıp içerisinde gerekli soğutma kontrolü yapılması mümkün olmamakta, bu da kopma uzaması değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca AlSi11Mg alaşımının akma ve çekme gerilmesi limit değerleri, AlSi7Mg alaşımına göre daha düşüktür. Bu nedenle AlSi11Mg alaşımı ile üretilmiş jantların taşıyabileceği teker yükleri de sınırlıdır, ancak böyle bir sınır değerden bahsedilemez, bu limiti jantın tasarımı ve ebadı belirler. AlSi11Mg alaşımı ile istenen dayanım limitinin karşılanabilmesi için, kesitlerin çok kalın tasarlanması gerekir. Bu da jant ağırlığını arttıracığından tercih edilen bir durum değildir. AlSi11Mg alaşımında dayanım artışı sağlanması için ısıtma işlemi uygulanması denenmiş, ancak içerdiği %Mg oranı yeterli olmadığından ısıtma işleminin sağladığı dayanım artışı yeterli olmamış ve bu alaşım için ısıtma işlemi uygulanmaması uygun bulunmuştur. Ayrıca, pazar talebi her geçen gün artan ön yüzey işlemli jant üretimi, AlSi11Mg alaşımı ile mümkün değildir. AlSi11Mg alaşımı ile jant üretimi daha düşük sıcaklıkta gerçekleştiğinden, daha yüksek hidrojen oranı ile döküm yapılabilir. Bu hidrojen oranı, hidrojen porozitesi miktarında artışa neden olur. Artan hidrojen porozitesi oranı ile birlikte jantın içerisinde oluşan gaz boşlukları ve süreksizlikler; X-Ray kontrolü sonrası fire oranı olarak yansımaz, ancak jantın ön yüzeyi işlendiğinde tüm porlar yüzeye açıldığından ve boya ile örtülemediğinden, ön yüzey işlemli jant üretimi AlSi11Mg alaşımı ile mümkün değildir. Bu da AlSi11Mg alaşımı ile jant üretimini, dayanım ile birlikte bir miktar daha sınırlandırmaktadır. AlSi7Mg alaşımı ise, ısıtma işlemi uygun olarak üretilmiş bir alaşımdır, ısıtma işlemleri uygulanması durumunda istenen dayanım değerlerine ulaşamaz. AlSi7Mg alaşımı,

alaşımın akışkanlık oranının AlSi11Mg alaşımına göre daha düşük olması nedeniyle kalıp içerisinde daha zor ilerler, bu da döküm açısından AlSi7Mg alaşımını AlSi11Mg alaşımına göre daha dezavantajlı yapar. Isıl işlemsiz AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları dayanım anlamında kıyaslandığında, AlSi7Mg alaşımının akma ve kopma değerlerinin daha iyi olduğu gözlemlenir, ancak bu fark, ısıtılı işlemlili AlSi7Mg alaşımının sağladığı dayanım artışına göre yeterli bir fark değildir. Bu iki alaşımın ISO 7141 13° darbe testi dayanımı açısından karşılaştırması, darbe dayanımı yüksek oranda jantın tasarımı ile ilgili olduğundan yapılamaz.

Bu çalışmanın amacı; 6,5J x 16" ebadında bir jantın, AlSi11Mg ile AlSi7Mg T6 ve AlSi7Mg alaşımları ile üretilerek üretim, mekanik dayanım ve metalurjik yapı anlamında farklılıklarının incelenmesi ve test sonuçlarına göre seçilen en az maliyetli alaşım ile üretilmesidir. AlSi11Mg ve AlSiMg alaşımlarının özellikleri, birbirine göre üstünlükleri ve ısıtılı işlemin AlSi7Mg alaşımı üzerindeki etkileri teorik olarak bilinmektedir. Ancak aynı kalıp üzerinde farklı bir alaşım ile jant üretimi yapılarak daha uygun maliyetli ürün üretiminin; o jant için uygun olup olmadığına, kalıp tasarımı doğrulama ve ürün tasarımı doğrulama çalışmaları ile karar verilebilir. Öncelikle jantın aynı kalıp içerisinde farklı bir alaşım ile dökümünün uygun bir şekilde gerçekleşip gerçekleşmediği doğrulanmalıdır. Bu kapsamda, jant veya kalıp üzerinde tasarım değişikliği gerektirecek bir üretim optimizasyonu olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu kontroller, Magma 5.3 sonlu hacimler analiz programı kullanılarak gerçekleştirilen döküm simülasyonu ile yapılmış ve gerçek üretim ile doğrulanmıştır. Bu çalışmadan sonra; janta ait ürün doğrulama simülasyon ve test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ürün doğrulama simülasyon çalışmaları kapsamında, Abaqus/Explicit 6.9 sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu ve Ansys Workbench 14.5 sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak hızlandırılmış ömür testi simülasyonu statik olarak gerçekleştirilmiştir. Ürün doğrulama test çalışmaları kapsamında; jantlara ait doğrulama testleri olan ISO 7141 13° darbe testi, hızlandırılmış ömür testi, çekme testi, sertlik ölçümü, kimyasal analiz ve mikroyapı analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda; jantların mekanik ve metalurjik özelliklerinin, farklı alaşımlar ile aynı tasarım üzerinde nasıl değiştiği, hem sonlu elemanlar analiz sonuçları ile, hem test sonuçları ile gözlemlenmiştir. Ek olarak; bu çalışma ile, müşteri tarafından gelecekte alınacak yeni bir projede, alaşım seçimi konusunda yönlendirici olabilecek teknik bilgi birikimine sahip olunması hedeflenmektedir.

STUDY OF AlSi7Mg T6, AlSi7Mg AND AlSi11Mg ALLOYS APPLICATIONS AS AN AUTOMOBILE WHEEL MATERIAL

SUMMARY

AlSi7Mg and AlSi11Mg hypoeutectic alloys are most common alloys for the aluminium wheels production with low pressure die casting method. Since these alloys contain less than %12.7 Si, these are called hypoeutectic alloys. Production of AlSi7Mg is possible with or without heat treatment (T6, artificial age hardening). Production of AlSi7Mg alloy without heat treatment is not common, even though there are products produced with AlSi7Mg alloy without heat treatment. However, AlSi11Mg alloy is not proper for heat treatment.

The information which alloy has to be chosen for the given product has been defined in specification sheet by the original equipment manufacturer (OEM) with the styling of the wheel. Besides, the common target of original equipment manufacturer is to design products which are lighter and less expensive in the mean of material and manufacturing without a decrease in the strength level. Because of this, in order to be compatible in the aluminium alloy market, it is necessary to be able to design and produce light, robust and less expensive products, which are designed and optimized according to the market demand.

Even though original equipment manufacturer defines which alloy has to be used for a given product, a solution where the strength of the product is not decreasing with a decrease in price will be acceptable from the OEM, as long as it can be proved with tests and simulations. OEM's request these studies where the product design and manufacturing know-how is strongly needed from their suppliers. The suppliers can compete aggressive in the market, which can present low-cost and robust products and valuable solutions in the mean of technical know-how.

If we compare AlSi11Mg, AlSi7Mg with heat treatment (T6) and without heat treatment, we see that all have advantages and disadvantages in the mean of producibility, robustness and price. Because of this, by defining the alloy for a given product, the design and the size of the wheel is very important. The most robust

products are produced with heat treated AlSi7Mg alloy. Because of this, big wheels, which have high wheel load, have to be produced with AlSi7Mg T6 alloy in order to sustain the high wheel load, since there is no other alloy available for such wheel loads for the low pressure die casting applications. Generally, the cars, where big wheel have been used, require big wheel loads. However, heat treated alloys are more expensive because of the heat treatment process and time necessary for heat treatment process and higher ratio of the rejected parts because of the distortion coming from heat treatment process. Because of the higher %Si ratio by AlSi11Mg, AlSi11Mg alloy's casting process is easier in comparison with AlSi7Mg alloy. Additionally, solidification time of AlSi11Mg alloy is %20 shorter than AlSi7Mg alloy. Accordingly, number of production of AlSi11Mg alloy is %20 more than AlSi7Mg alloy for a given time. However, since the time necessary for solidification is very short by the AlSi11Mg, so that the solidification control cannot be done very well, AlSi11Mg alloy's elongation values are lower than AlSi7Mg alloy's elongation values.

Besides, yield and tensile strength values of AlSi11Mg alloys are lower than AlSi7Mg alloy's yield and tensile strength values. Because of this, AlSi11Mg alloys can be used for a limited product range and size, but there is no exact limit size for the usage of AlSi11Mg alloy. This limit will be defined not only by the size of the wheel, also the design of wheel defines whether it is proper to use AlSi11Mg alloy or not. In order to make the AlSi11Mg alloy for the alloys which require high wheel loads, it is necessary to design the wheel heavier than the limit weight, which would be not allowed. In order to make AlSi11Mg alloys, heat treatment application have been tried; however, because of the inadequate %Mg ratio of AlSi11Mg alloy was the increase of the strength not enough to make heat treatment application feasible for this alloy. Additionally, diamond wheels production is not possible with AlSi11Mg alloys, which market demand increases every year. The reason is, since AlSi11Mg casting actualize in a lower temperature than AlSi7Mg, the density index of the alloy will be increased by adding additional hydrogen to the melt alloy, which increases the hydrogen porosity level of the wheel. The discontinuity with the increased hydrogen ratio is not a reason for X-Ray rejection, however, after machining of styling surface for diamond cut production, the pores became visible which couldn't be covered with the painting process. This is also an another

limitation for the production with AlSi11Mg alloy. AlSi7Mg alloy is proper for the heat treatment process, that's why the yield and tensile strength values of the product produced with AlSi7Mg alloy is not as high as heat treated AlSi7Mg alloy. AlSi7Mg alloy's density index is lower than AlSi11Mg alloy, so that its' progress in the tool as a molten metal, in other words, its' castability is not as good as AlSi11Mg alloy. If we compare the strength of the AlSi7Mg alloy with AlSi11Mg alloy, it can be seen that the yield and tensile strength of the AlSi7Mg alloy is higher than AlSi11Mg alloy, however, the impact behaviour of these alloys cannot be predicted, since it is mostly up to the alloy's design.

The target of this study is; to produce a wheel, which is given with a size 6,5 J x 16" and AlSi7Mg heat treated alloy, with AlSi7Mg alloy without heat treatment and AlSi11Mg alloy, in order to make a comparison in the mean of castability, metallurgical structure and mechanical behaviour and select the most low-cost solution for this wheel. The properties of AlSi11Mg and AlSi7Mg alloys and their advantages and disadvantages are well-known in the literature; however, it cannot be decided whether the low-cost alloy is suitable for a given wheel without doing the mould design verification and product design verification studies. First, it has to be proved whether the product and mould design is proper for casting two different alloys. Within this scope, it has to be controlled whether there is a need to change the mould or product design. These controls will be done by execution of casting simulation using finite volume analysis program Magma 5.3 and verified with real production. After this study, product design verifications and tests has been be done. Within the scope of product verification analysis, ISO7141 13° impact simulation has been performed dynamically using Abaqus Explicit 6.9 and fatigue simulation has been performed statically using Ansys Workbench 14.5. Within the scope of product verification tests; impact test, dynamic fatigue test, tensile test, hardness test, chemical analysis and microstructure analysis have been performed and compared. At the end of this study; it is observed, how the mechanical and metallurgical behaviour of the wheel is changing by comparing finite element analysis simulation results and test results. Additionally, it is aimed to grow the technical know-how for the future projects by the selection of alloy.

1. GİRİŞ

Hem güvenlik seviyesinden hem de konfordan ödün vermeden az yakıt tüketen araçların geliştirilmesi için; yoğunluğu düşük, dolayısıyla ağırlığı az, ancak mukavemeti yüksek alaşımların geliştirilmesi, otomobil ana ve yan sanayi üreticilerinin en önemli hedeflerinden biridir. Bu nedenle; otomotiv ana ve yan sanayi üreticileri için ön plana çıkan en önemli malzemeler alüminyum, magnezyum, titanyum gibi hafif yapı metalleri ve alaşımlarıdır. Bu alaşımlar içerisinde avantaj ve dezavantajlara göre bir sınıflandırma yapıldığında; alüminyumun maliyet, işlenebilirlik, korozyon direnci ve geri dönüşüm yönünden avantajları, otomotiv endüstrisinde kullanımının her geçen yıl daha da artmasına neden olmuştur. Alüminyum alaşımlarının kullanım oranının artmasının diğer bir nedeni de, önem seviyesi yakıt tüketiminden de önde gelen yolcu güvenliğidir. Çarpışma sırasında ortaya çıkan enerjinin, darbe emiciler tarafından emilmesi gerekmektedir. Alüminyum alaşımları bu amaç için en uygun alaşımlardır. Alüminyumun düşük yoğunluk ve yüksek darbe emiş özelliğinin yanı sıra; yüksek korozyon dayanımı, elektriksel iletkenlik, üretilebilirlik ve estetik özellikleri ile ön plana çıkması, alüminyum alaşımlarının jant üretiminde kullanımlarının yaygınlaşmasını sağlamıştır [1].

Eylül 2012’de yayınlanan Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği Sektör Raporu’na göre Türkiye’de alüminyum alaşımlı yerli jant üretimi 25 yıl önce yıllık 20.000 - 25.000 adet olarak başlamış olup bugün 400 kat artarak 9 milyon jant/yıl kapasiteye ulaşılmıştır. Sektörde ikisi yabancı sermayeli 6 adet alüminyum jant üreticisi mevcuttur. Bu tesislerde 2500’ün üzerinde nitelikli çalışan istihdam edilmektedir. Alaşımlı jant üretim üssü haline gelen İzmir’de 9.500.000 adet/yıl kurulu kapasiteye ulaşılmış olup, 2011 yılında % 95 kapasite ile üretim yapılmış, üretimin % 80’i OEM; % 20’si yan sanayi için gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu üretimin % 90’ı ihraç edilmiştir. Bu firmalardan CMS, Componenta, Cevher Jant ve Hayes Lemmerz yerli

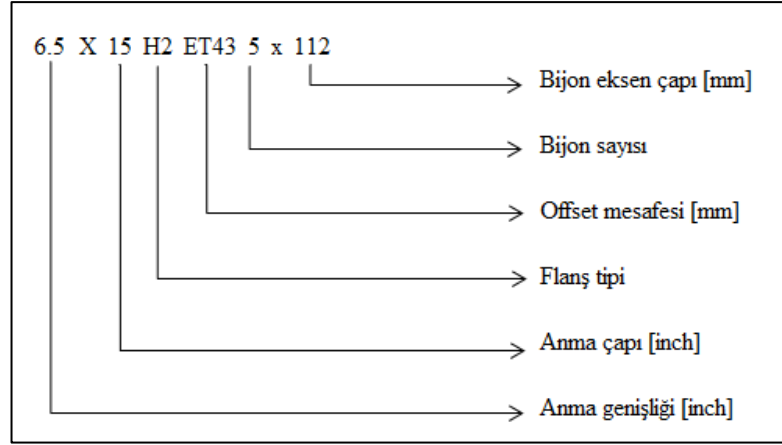
ve yabancı OEM'lere (Renault, Fiat, VW, Peugeot, BMW, Bentley, Audi, Mercedes) alüminyum jant satmakta olup, ihracat oranları % 80'e ulaşmaktadır [2].

Araç üzerinde can ve mal güvenliğini direkt etkileyen ve yasal yükümlölükleri olan parçalara emniyet parçaları denir. Jant; lastik ile dingil aks sistemi arasında yer alan, yük taşıyan ve jant çemberi ile göbekten oluşan dönen bir emniyet parçasıdır (Şekil 1.1). Jantın işlevi; tork transferini sağlamak, yük dengelemek, kullanım kolaylığı için ek yük sağlamak, yoldan kaynaklanan darbeleri sönümlemek olarak özetlenebilir. Özellikle jantın ağırlığı, ölçüleri, konstrüksiyonu ve dizaynında yapılan değişiklikler otomobillerin performansını ve yol tutuşunu kayda değer bir şekilde arttırmaktadır. Alüminyum alaşımlı jantlar, araçların kişiselleştirilmesi amacı ile kullanıldıkları gibi, doğru jant seçilmesi durumunda, performans, sürüş konforu ve sürüş ekonomisi gibi ölçütleri olumlu yönde iyileştirirler [3].

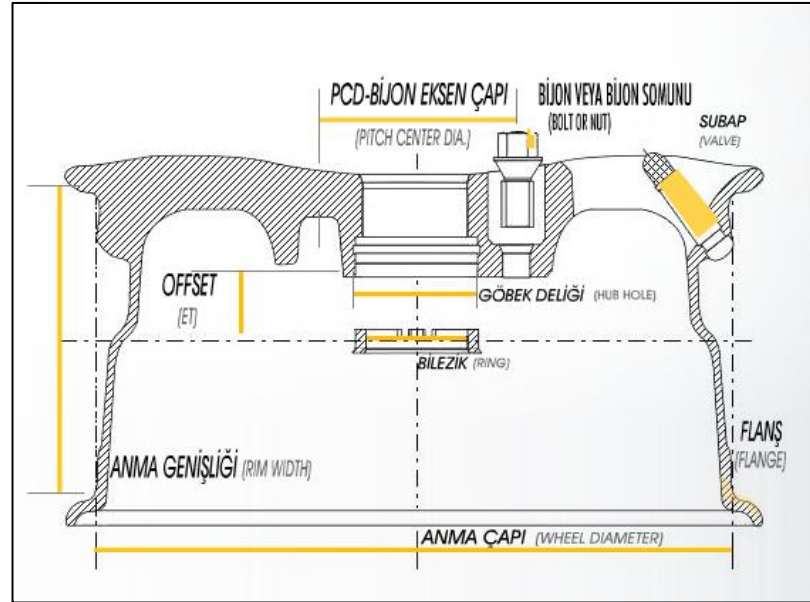


Şekil 1.1 : Alüminyum alaşımlı jant [3].

Jantların tanım ve sınıflandırılmaları için kullanılan ölçüler ve özellikler Avrupa Lastik ve Jant Teknik Organizasyonu (ETRTO) tarafından belirlenmiştir (Şekil 1.2). Bu ölçüler ve özellikler anma genişliği, anma çapı, flanş tipi, offset derinliği, bijon sayısı ve bijon eksen çapıdır (Şekil 1.3). Binek araçlarda anma genişliği 4" ile 10" arasında değişen, anma çapı ise 10" 22" arasında değişen jantlar kullanılmaktadır [4].



Şekil 1.2 : Alüminyum alaşımlı jantların sınıflandırılmasında kullanılan ölçüler,ETRTO (2014)'ten uyarlanmıştır.



Şekil 1.3 : Alüminyum alaşımlı jant kesidi [3].

Jantın son kullanıcı tarafından görünen yüzeyine stil yüzeyi adı verilir. Jantlar; ETRTO tarafından belirlenen özellikler haricinde stil yüzeylerine göre de farklı mekanik davranış sergilerler, bu nedenle pratikte jant üreticileri tarafından stil tasarımına göre de sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma, jant üreticisinin teknik bilgi birikimine göre yapılır ve standart bir sınıflandırma niteliği taşımaz. Aşağıdaki şekilde farklı stil yüzeylerine ait olan jantlar gösterilmektedir.



Şekil 1.4 : Farklı stil yüzeyine sahip alüminyum alaşımlı jantlar.

Jantların gerek geometrik, gerekse test ağırlıkları ve araca ait teker yükü değerlendirilerek kullanılabileceği araçların listesini gösteren tabloya aplikasyon tablosu denir. Seçilen jantın araç listesinde montaj yapılacak olan araç yoksa, o jantın o araç üzerinde kullanımı risklidir. Aplikasyon tablosu, jant seçilmesinde güvenlik açısından başvurulacak en önemli kaynaktır. Aplikasyon tablosunda jant test yükü ve araç ağırlıkları mutlaka bulunmalıdır. Bijon eksen çapı ve offset mesafesi verisi ile oluşturulmuş bir tablo, jantın yük kapasitesini garanti etmez ve yeterli olarak değerlendirilmez. Bu tablo, jantın gerek geometrik gerekse test ağırlıkları değerlendirilerek kullanılabileceği araçların listesini gösterir. Aplikasyon tablosu olmayan ya da tablosunda jant test yükü ve araç ağırlığı bilgisi olmayan jantların bazılarının üzerinde test yükü yazabilir. Jantın üzerinde yazan bu değer aracın maksimum aks yükünün yarısından büyük olmalıdır. Test yükü değeri de yazmıyorsa o jantın araca uygunluğu ile ilgili fikir yürütmek mümkün değildir [3].

1.1 Tezin Amacı

Alüminyum alaşımlı jant sektöründe rekabet edebilmek için; hafif, ürün malzeme ve üretim maliyeti düşük, yüksek dayanıma sahip ve pazar talebine yönelik optimum ürün üretimi yapılması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı; ana üretici tarafından AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretimine başlanmak üzere projelenecek çok kollu stil

tasarımına sahip 6,5 x 16'' büyüklüğünde bir jantın, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları ile ısıtılma işlemiyle üretilerek üretilebilirlik; maliyet ve ürün dayanımı olarak karşılaştırılmasıdır. Her ne kadar AlSi11Mg ve AlSi7Mg alaşımlarının farkları ve ısıtılma işleminin AlSi7Mg alaşımı üzerindeki etkisi bilinse de, o jant için hangi alaşımın uygun olduğu, ancak döküm simülasyonu ve ürün doğrulama testleri ile belirlenebilir. Otomotiv ana sanayilerinin büyük kısmı; ürün uzmanlığı gerektiren bu çalışmaları yan sanayilerinden beklemektedirler. Bu çalışmalar ile ön plana çıkmayı başaran; müşterisine hem maliyet hem teknik bilgi birikimi anlamında katma değer kazandıran yan sanayiler; alüminyum alaşım jant sektöründe rekabetçi olarak kalabilmektedirler. Bu çalışma sonrasında seçilen tasarıma ait jant ailesini temsil eden diğer modellerde optimum malzeme seçimi konusunda kazanılan tecrübeden yararlanılabilecektir.

1.2 Literatür Araştırması

Alüminyum alaşım jant üretiminde kullanılan Al-Si alaşımları ile üretilmiş aynı tasarıma sahip ürünlerin üretilebilirlik, maliyet ve dayanım olarak kıyaslanabilmeleri için Al-Si alüminyum döküm alaşımlarının ve jant üretiminde kullanılan Al-Si döküm alaşımlarının mekanik ve metalurjik özelliklerine etkiyen parametrelerin iyi anlaşılması gerekir.

1.2.1 Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılmaları

İmalat yöntemine ve kullanım amacına göre alüminyum döküm alaşımları, dokuz farklı aile içerisinden seçilirler. Alüminyum alaşımların sınıflandırılmasında uluslararası olarak kabul edilen isimlendirme, Avrupa Alüminyum Birliği (EAA) tarafından yapılmaktadır. EAA, döküm alüminyum alaşımları için uluslararası alüminyum tanımlama ve kimyasal bileşen limit kayıtlarını derleyerek bu gösterim sistemini kurmuştur [5]. Alüminyum dövme alaşım gösterim sistemi, çizelge 1.1'de verilmiştir. Dövme alaşımı gösteriminde ilk rakam birinci alaşım elementini ifade eder. İkinci rakam ise orjinal alaşımdaki değişimi tanımlamak için kullanılır. Orjinal alaşım için bu rakam 0'dır. Son iki rakam ise 1XXX serisi alaşımlarda alüminyum saflığını tanımlar. Diğer tüm serilerde ise çeşitli özelliklerdeki alaşımları tanımlar [6].

Çizelge 1.1 : Alüminyum dövme alaşımları gösterimi [5].

Alaşım	Sertleştirme yöntemi		1. Alaşım elementi
	Şekil değiştirme	Isıl işlem	
1XXX	X		Al
2XXX		X	Cu
3XXX	X		Mn
4XXX	X		Si
5XXX	X		Mg
6XXX		X	Mg/Si
7XXX		X	Zn
8XXX		X	Li

Esas alaşım elementine göre alüminyum döküm alaşımlarına ait sınıflandırma tablosu da mevcuttur (Çizelge 1.2). Örneğin 1xx.x sınıfı için, iki ve üçüncü basamaklar, alaşımın saflık oranını ifade ederler. Son basamak 0 ise döküm, 1 ise külçe olduğunu ifade eder. Örneğin 150.0, %99.5 saflığında bir döküm alaşımıdır [7].

Çizelge 1.2 : Alüminyum döküm alaşımları gösterimi [7].

Alaşım	Sertleştirme yöntemi		1. Alaşım elementi
	Şekil değiştirme	Isıl işlem	
1XX.X	X		Al
2XX.X		X	Cu
3XX.X		X	Si, Cu, Mg
4XX.X		X	Si
5XX.X	X		Mg
6XX.X	-	-	-
7XX.X		X	Zn
8XX.X	X		Li

Alaşımlarda mekanik özelliklerin iyileşmesi soğuk veya sıcak uygulamalar ile mümkün olabilmektedir. Mukavemetlendirme derecesi, alaşımın ısıtılma işlemi görebilir veya pekiştirilebilir olmasına göre temper tanımlaması T ve H ile gösterilmektedir. Diğer tanımlamalar alaşımın tavlandığını (O), çözündürme uygulandığını (W) veya üretildiği şekilde kullanıldığını (F) göstermektedir. T ve H 1 takip eden numaralar pekişme miktarını, gerçek ısıtılma işlemi tipini veya alaşımın diğer özel üretim işlem durumunu göstermektedir [8]. Alüminyum alaşımları için temper seri numaralarının tanımları, aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 1.3 : Alüminyum alaşımları için temper seri numaralarının tanımları [1].

Temper No	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
O	Tavlınmış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder)
H12	Soğuk şekillendirme, O ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H14	Soğuk şekillendirme, O ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H18	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar
H19	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
H2X	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlınmış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
W	Çözelti ısı işlemi görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T3	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T4	Çözelti ısı işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
T6	Çözelti ısı işlemi uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözelti ısı işlemi görmüş ve kararlaştırılmış
T8	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

1.2.1.1. Alüminyum döküm alaşımlarının özellikleri ve jant üretiminde kullanılan Al-Si ötektik sistemleri

Al-Si alaşımları, alçak basınçlı döküm yöntemi ile üretilen alüminyum alaşım jant üretimi için tüm dünya genelinde yaygın olarak kullanılan alaşım sistemleridir. Alüminyum genel özellikleri içerisinde; iyi işlenebilirlik, iyi yüzey kalitesi, düşük özgül ağırlık, mükemmel dökünebilirlik, düşük gaz çözünürlüğü vardır. Alüminyum alaşımları hafifliğinin yanında; alüminyumun döküm alaşımlarının düşük ergime sıcaklığı, hidrojen hariç diğer gazların ihmal edilebilir derecede erirliği, iyi bir döküm yüzeyine sahip olmaları gibi özellikleri ile otomotiv endüstrisinde önemli bir kullanım alanına sahiptir. Al-Si alaşımlarına Mg eklenmesi; ısı işleminden sonra dayanım artışını sağlar. Al-Si alaşımlarına Mg eklenerek bir çok dayanım ve süneklik kombinasyonu elde edilebilir. Mg ilavesi ile birlikte, yüksek dayanım yanında yüksek süneklik özelliği de olan bu alaşım sistemleri otomotiv endüstrisinde, özellikle jant üretiminde tercih edilmektedirler [8].

Al-Si alaşımlarının mekanik ve metalurjik özellikleri; tane inceltme prosesi, modifikasyon seviyesi, yapısındaki alaşım element ve oranları, besleme ve katılaşma hızı, gaz boşluğu oluşumu ve ısı işlemi ile ilgilidir [8,9]. Bu etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için, Al-Si alaşımlarının mekanik ve metalurjik özelliklerine etki

eden bu konular tek tek ele alınacaktır. Deneyisel çalışma kapsamında incelenecek olan jantlar; AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları ile üretilmiştir. Bölüm 3'te detaylı olarak anlatılacak olan jantlara ait doğrulama testleri sonuçlarında; aynı tasarıma sahip bir jant model;; farklı alaşımlar ile üretilen jantların mekanik ve metalurjik özellikleri arasındaki farklar incelenecektir. Bu farkların daha iyi anlaşılabilmesi için; AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarına ait üretim farklılıkları, hem pratikte hem faz diyagramı üzerinde açıklanarak yukarıda belirtilen etkiler ile ilişkilendirilecektir.

Ticarileşmiş döküm alaşımlarının çoğu Al-Si ötektik alaşım sistemine dayanmaktadır. Bu alaşım sistemi içerisinde alüminyum jant üretiminde kullanılan hipoötektik alaşımlar, %11'in altında Si oranı içerirler. Yapılarında interdendritik Al-Si ötektik fazı ile çevrelenmiş Al dendritleri bulunur. Alaşıma bağlı olarak değişmekle birlikte, bu oran 1:1'dir. Al-Si ötektik sisteminde ötektik veya ötektiğe yakın alaşımlar olarak değerlendirilen alaşımlar, %11 ile %13 arasında Si içerirler. Bu alaşımların yapısında %100'e yakın Al-Si ötektiği bulunur. Hiperötektik alaşımlar ise %13 üzerinde Si içerirler. Bu alaşımların yapısında primer Si fazı ile Al-Si ötektik fazı bir arada bulunur [8].

Jant üretiminde kullanılan alüminyum alaşımları, hipoötektik Al-Si alaşımlarıdır. En yaygın olarak kullanılan standart alaşımlar, ticari adıyla A356 olarak bilinen AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarıdır. AlSi9Mg alaşım da jant üretiminde kullanılıyor olmasına rağmen, kullanım oranı çok düşüktür [8].

Döküm malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için, dökülmüş ürünün farklı referans bölgelerinden çekme test numuneleri imal edilir. Deney numunelerinden elde edilen akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve kopma uzaması verileri malzemeye ait, dayanımı temsil edebilecek temel verileri sağlamaktadır. Bu referans bölgeleri, jant üreticisinin kendi markası ile ürettiği ürünler için jant üreticisi, müşteri için üretilen jantlarda ise müşteri tarafından belirlenir.

Döküm malzemelerde iyi mekanik özellikleri sağlamak, yüksek kalitede döküm yapmayı gereklidir. Döküm kalitesi; malzeme iç süreksizlik miktarı, malzeme tane boyutları ve bu boyutların kesit boyunca dağılımı, ötektik yapı modifikasyon seviyesi ve intermetalik bileşen miktarı ile tanımlanır. Jant üretiminde kullanılan alçak basınç ile sabit kalıba döküm metodu; kum kalıba döküm metodundan daha hızlı bir katılaşma sağladığı için, ötektik modifikasyon daha iyi bir seviyede gerçekleşir. Bu nedenle alçak basınç ile sabit kalıba döküm; kum kalıba döküm yapılan ürünler ile

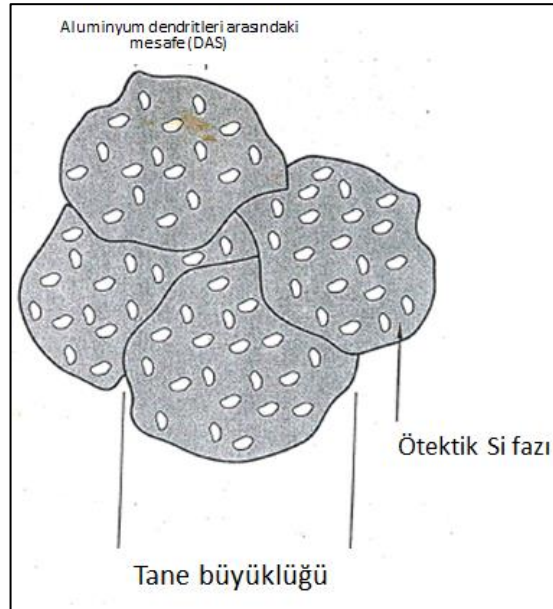
karşılaştırıldığında daha iyi mekanik özellikler gösterir. Bu yöntem, seri üretime uygulanabilirlik ve maliyet anlamında avantaj sağlamaktadır [10].

1.2.1.2. Jant üretiminde kullanılan Al-Si döküm alaşımlarının mekanik ve metalurjik özelliklerine etkiyen faktörler

Tane inceltme prosesi

Al-Si alaşımlarında yapısal özellikleri belirleyen mekanizmalar; ötetik silisyum oranı, boyutu ve modifikasyon seviyesi, alüminyum dendrit kollarının uzunluğu (DAS) ve soğutma hızıdır. Diğer yandan tane inceltme prosesi; alüminyum döküm alaşımlarının kırılma ve çekme mukavemeti ile doğrudan ilgili olup, çekme ve gaz boşluklarının dağılımı, sıcak yırtılma eğiliminin azaltılması ve döküm sırasında beslemenin iyileştirilmesi açısından önemli bir prosestir. Tane inceltme işlemi; parçada daha az yapısal döküm hatası görülmesini, buna bağlı olarak mekanik özelliklerin daha iyi olmasını sağlar [11]. Tane inceltme prosesinin alaşımın yapısında nasıl meydana geldiğinin anlaşılabilmesi için, öncelikle tanenin tanımı ve tane oluşumu konuları iyi anlaşılmalıdır.

Alaşımın yapısını oluşturan en küçük yapı olan tane içerisinde, aynı çekirdekten oluşan alüminyum dendritleri bulunmaktadır. Alüminyum dendritleri arasında modifiye edilmiş veya edilmemiş halde ötektik Si fazı yer almaktadır (Şekil 1.5).

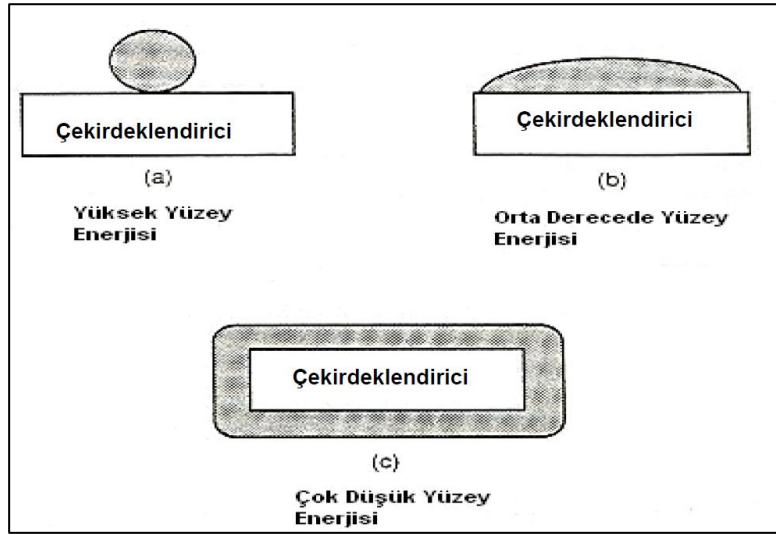


Şekil 1.5 : Al-Si alaşımında tane yapısı [11].

Alüminyum dendritlerinin tane içerisindeki uzunluğunu katılaşma hızı belirler. Katılaşma hızı yavaşladıkça dendritlerin uzunluğu artar, bu da intermetaliklerin tane

içerisinde ağ şeklinde yapılanmasına sebep olur. Yapıda intermetalik bileşen seviyesinin ve alüminyum dendrit kol uzunluğunun artması, dayanımı olumsuz etkiler [11]. Tane inceltme, alüminyum alaşımlarındaki çekirdek oluşumu ve büyümesi ile doğrudan ilişkilidir. Bunu daha iyi anlamak için öncelikle, tane oluşumunu yani çekirdeklenme prensiplerini anlamak gerekir.

1983 yılında Mondolfo tarafından revize edilen heterojen çekirdeklenme teorisine göre; sıvı içerisindeki her bir tane, yabancı bir partikül veya çekirdeklendirici tarafından çekirdeklenmeye başlar. Çekirdeklendirici ile çekirdek arasındaki yüzey enerjisi, süreçte belirleyici olan etmendir. Heterojen çekirdeklenme teorisine göre, çekirdeklendirici ve çekirdek arasında üç çeşit olasılık mevcuttur [12]. Bu seçenekler aşağıdaki şekilde verilmiştir.

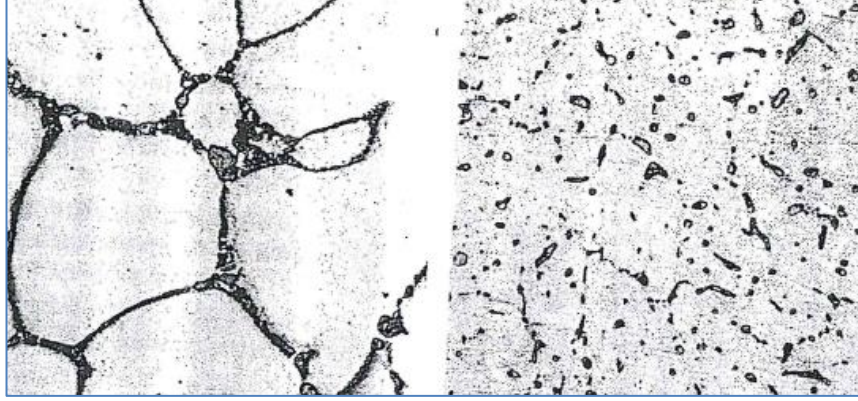


Şekil 1.6 : Yüzey enerjisinin çekirdek geometrisine etkisi [11].

Şekil 1.6'da (c) ile gösterilen durumda; çekirdeklendirici ve çekirdek arasındaki yüzey enerjisi minimum olduğundan, bu durum optimum durumdur. Bu sayede çekirdek; çekirdeklendiriciyi tam olarak sararak ve enerji seviyesini en az enerjiyle minimuma indirerek, büyük çaplı bir film oluşturur. Bu durumun gerçekleşmesi için, çekirdeklendirici ve çekirdek kristal yapılarının benzer olması gerekmektedir [11].

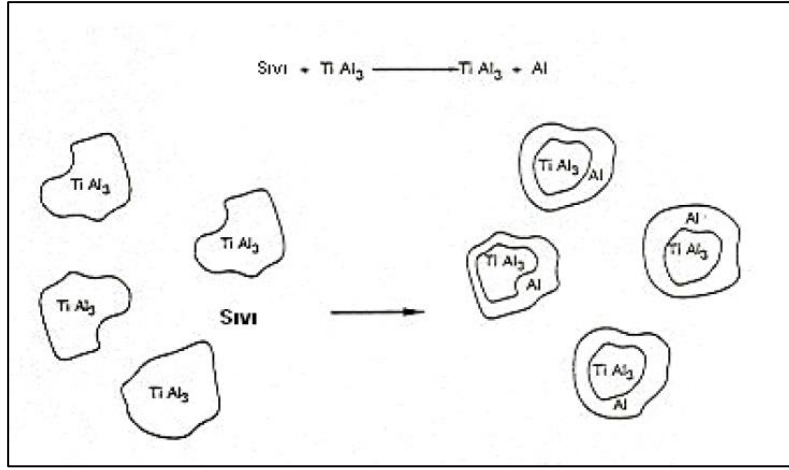
Çil etkisi, yani hızlı soğutma ile de ince tane yapısı elde edilebilir. Çil etkisi, hızlı soğutma yanında kullanılan kalıp ile de belirlenir. Metal kalıpta soğuma; kum kalıba göre daha hızlı gerçekleştiğinden, metal kalıpta yapılan döküm sonrasında daha ince taneli bir yapı elde edilir. Ancak burada dayanımı güçlendiren, alüminyum dendritleri arasındaki mesafenin az olması, dolayısıyla yapıda ağ şeklinde intermetalik bileşenin oluşmamasıdır [11]. Şekil 1.7'de, kum kalıba döküm ve metal kalıba döküm sonrası elde edilmiş iç yapılar birlikte verilmiştir. Kum kalıba döküm sonrası iç yapıda

aluminyum dendrit kollarının uzun olması ve ağ şeklinde oluşan intermetalik bileşenler görülmektedir. Metal kalıba döküm sonrası ise aluminyum dendrit uzunluğunun az olduğu gözlemlenmiştir. Hızlı soğutma, ötektik Si fazında değişikliğe neden olabileceğinden ve hammadde hazırlık aşamasında seri üretime uygun olmadığından alçak basınçlı aluminyum alaşım jant üretiminde kimyasal tane inceltme prosesi uygulanır.



Şekil 1.7 : Kum kalıba döküm sonrası elde edilen iç yapı (sol) ve metal kalıba döküm sonrası elde edilen iç yapı (sağ) [11].

Kimyasal tane inceltme prosesinin seri üretime uygulanabilirliği yüksektir. Prensibi, malzemenin içerisine çekirdeklenmesini sağlayacak süreksizlik eklenmesine, yani heterojen çekirdeklenmeye dayanır. Heterojen çekirdeklenme prensipleri gereği; aluminyum söz konusu ise, uygun bir çekirdeğin kristal yapısındaki atomik düzlemler, üzerinde çekirdekleneyeceği malzemenin yapısındaki atomik düzlemlerle benzer olmalıdır. Bu nedenle, aluminyum ve çekirdeklendiricinin arasında çekirdeklenmeye uygun bir kristalografik ilişki bulunmaktadır. Alüminyum alaşımlarının seri üretime döküm prosesi ile uygulandığı durumlarda yapılan tane inceltme prosesinde, tane inceltici olarak % 0,02 – 0,15 oranında Ti elementinin alaşıma eklenmesi tercih edilir [11]. Al-Si alaşımlarının Ti elementi kullanılarak tane inceltme prosesine tabi tutulması; sıcak yırtılmanın azalmasını, beslemenin iyileşmesini ve gaz boşluklarının daha homojen dağılmasını sağlayarak malzeme dayanımını artırır [13]. Ayrıca % 0,01 – 0,03 oranında titanyum ve % 0,01 oranında bor içeren çubuk, plaka, tablet ve kapsül formundaki master alaşım ya da tuz karışımları tercih edilmektedir. Titanyumun tane inceltici olarak tek başına kullanılmasının etkileri, kristal yapılarının benzer olması ve özellikle aluminyum için efektif bir çekirdeklendirici olan $TiAl_3$ fazı oluşturması sebebiyle net bir şekilde bilinir [11]. Bir sonraki şekilde Al – Ti sisteminde gerçekleşen peritektik reaksiyon ile çekirdeklenme gösterilmektedir (Şekil 1.8).

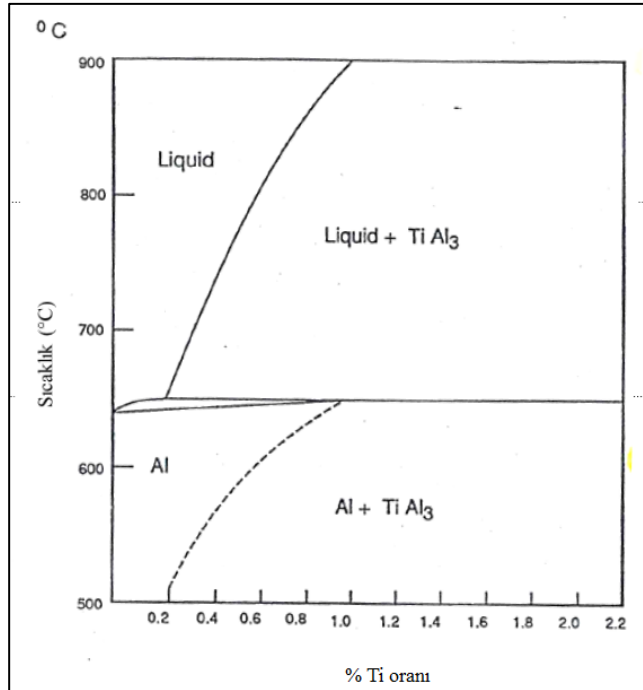


Şekil 1.8 : Al-Ti sisteminde gerçekleşen peritektik reaksiyon [14].

Meydana gelen peritektik reaksiyon, aşağıda gösterildiği şekilde gerçekleştirilmektedir:



Bu peritektik reaksiyon, 665°C altında gerçekleştirilen soğutma sıcaklığında ve belirli bir %Ti oranı ile meydana gelir (Şekil 1.9). Meydana gelen Al, neredeyse saf alüminyumdur ve TiAl₃ fazını sarar.



Şekil 1.9 : Al-Ti sisteminde gerçekleşen peritektik reaksiyona ait faz diyagramı [11].

Bu mekanizmanın bir sonucu olarak; oluşan tane yapısı, master alaşımın tane yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Yapısında çok sayıda ve boyutu küçük TiAl₃ bulunduran

master alaşımlar, yapısında az sayıda ve daha büyük $TiAl_3$ barındıran master alaşımlara göre daha iyi tane incelticilerdir. Al – Ti – B master alaşımları, alüminyum döküm sektöründe kullanılan ve kabul gören alaşımlardır. Deneyler, inceltici olarak sadece titanyum kullanıldığında ve uzun süre beklendiğinde, inceltme etkisinin azaldığını göstermektedir. Literatürde bu durum yanma kaybı (fading) olarak bilinir [11].

Al-Si alaşımlarında ötektik modifikasyon

Alüminyumun farklı alaşımlandırmaları ile çok çeşitlilikte süneklik ve dayanım kombinasyonları elde edebilmek mümkündür. Si; camsı, kırılğan ve sert bir yarı iletken, dökülebilirliği arttırmak ve katılaşmayı kolaylaştırmak için döküm alaşımlarında kullanılır. Si, sıvı alüminyumun akışkanlığını artırır. Si elementinin ilavesi ile alaşımın mukavemeti de artar. Modifikasyona uğramış bir Al-Si alaşımı, modifiye edilmemiş bir alaşıma göre daha fazla sünek özellik gösterir. Bunun nedeni; Al-Si alaşımlarında, alaşımın mekanik özelliklerinde belirleyici olan elementin, ötektik Si morfolojisi ve oranı olmasıdır [11, 13].

Yüksek soğuma hızı ile elde edilmiş Si modifikasyonuna, su verme (quench) modifikasyonu adı verilir. Modifikasyon ve ötektik morfoloji kontrolünde bugün kullanılan yöntemlerden su verme modifikasyonu, hızlı soğuma ile Si elementinin şeklinin değişmesine dayanır. Ancak jant üretiminde bu modifikasyon yöntemi kullanışlı değildir. Si elementinin şekli ısıtılma işleminin çözeltiye alma fazında değişebilir. Bu şekilde yapılan modifikasyon ısıtılma işlemidir. Jant üretiminde $AlSi7Mg$ alaşımına uygulanan T6 ısıtılma işlemi bu modifikasyon tipine örnektir ve ilerleyen bölümlerde detaylı olarak açıklanacaktır. Modifikasyonlar arasında en etkili olan yöntem kimyasal modifikasyondur. Kimyasal modifikasyon, Na, Sr, Sb ve P elementlerinin eritilerek alaşıma karıştırılması ile gerçekleştirilir [8].

Sodyum (Na) elementi kullanılarak kimyasal modifikasyon

Sodyum (Na) elementi, keşfedilen ilk modifikasyon elementidir. Al-Si alaşımları modifikasyonu uzun süre bu element ile gerçekleştirilmiştir. Na elementi, miktar olarak modifikasyon için gerekli olan en güçlü elementtir. Na elementinin en büyük dezavantajı, eridikten sonra 20 dakikadan az bir sürede uçarak kaybolmasıdır. Bu nedenle modifikasyon, çok kısa bir sürede gerçekleştirilmelidir. Na metali, katı halde alaşıma eklenir. Vakumlanmış teneke veya folyolanmış paketlerde kuru halde saklanmalıdır, çünkü bu alaşım aynı zamanda tehlikelidir. Na, aynı zamanda flaks yöntemi ile de eklenebilir [8]. Na elementi kaybı kontrol edilemez, bu nedenle

modifikasyon derecesi belirsizdir. Modifikasyon için Na tuzları kullanılırsa yüksek döküm sıcaklığı gerekir, bu durumda aşırı oksitlenme meydana gelebilir. Bu durum hatalı döküme neden olabilir [11].

Antimon (Sb) elementi kullanılarak kimyasal modifikasyon

Antimon elementi, modifikasyon işlemine ters olarak Si fazını incelten bir elementtir. Mikroyapı iğne görünümlü olarak kalır, ancak daha ince bir hal alır. Bu yapının üzerine uygulanan ısı işlem, bu malzemeyi modifiye edilmiş bir alaşım haline getirir. Özetle antimon, tek başına modifikasyon elementi olarak etkili değildir, ısı işlemle birlikte etkili olur. Sb uçucu bir element değildir. Antimon, hidrojen ile tepkimeye girdiğinde SbH_3 gazını ortaya çıkarır, bu gaz da zararlı maddeler sınıfına girdiği için modifikasyonda antimon kullanılmaz [8].

Fosfor (P) elementi kullanılarak kimyasal modifikasyon

Fosfor, Al-Si ötektik söz konusu olduğunda diğer modifikasyon veya inceltici elementleri zehirleyen bir elementtir. Fosfor sadece hiperötektik alaşımlara primer-Si fazının aşınma dayanımını arttırmak için eklenir [8].

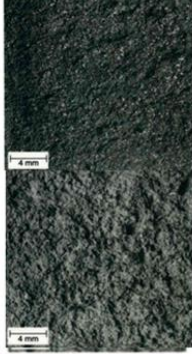
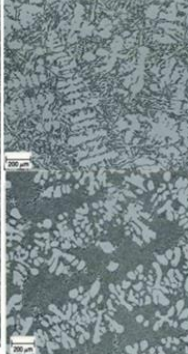
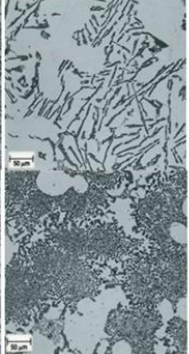
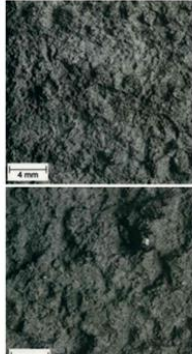
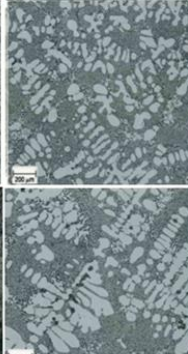
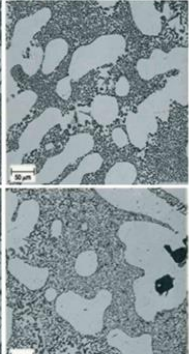
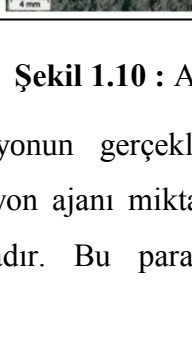
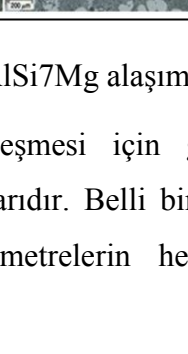
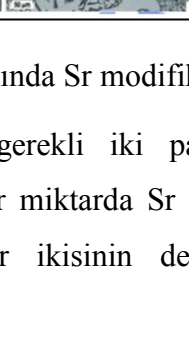
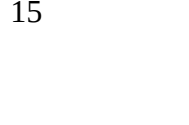
Stronsiyum (Sr) elementi kullanılarak kimyasal modifikasyon

Bu çalışma kapsamında kullanılan $AlSi7Mg$ ve $AlSi11Mg$ alaşımlarının modifikasyonunda, stronsiyum (Sr) elementi kullanılmıştır. Sr kısmen daha zayıf bir modifikasyon elemanıdır. Modifikasyon için alaşıma, soğuma hızına bağlı olarak 80 ppm'den 200 ppm'e kadar Sr eklenmesi gereklidir. Genellikle Al-10%Sr ve Sr-10%Al olmak üzere iki master alaşım halinde bulunur. Döküm alaşımlarında çok yaygın olarak kullanılmaktadır, çünkü bu malzeme inert bir malzemedir ve bu nedenle yönetimi daha kolaydır. Sr-10%Al reaktif ve yanıcı bir malzeme olduğundan tercih edilmez [8]. Sr modifikasyonu sonrası aşırı reaksiyon ve gaz çıkışı ve aşırı yüzey oksitlenmesi meydana gelmez. Sr modifikasyonu yapıldıktan sonra son ürüne ait Sr oranı belirlenebilir, yetersiz veya aşırı modifikasyon meydana gelmez. Sr modifikasyonu ile daha geniş bir yüzey aralığında etkili modifikasyon sağlanır. Sr, sıvı metal içerisinde 2 saat kadar kalabilir. Sr modifikasyonu, Fe elementinin oluşturduğu kırılgan intermetalik faz oluşumunu engeller ve sünekliği artırır, darbe ve kırılma dayanımını artırır. Sr, diğer elementler ile kıyaslandığında uçuculuğu daha düşük bir malzemedir [15].

Sr modifikasyonu ötektik Si taneciklerinin boyutunu ve en boy oranını azaltır. Lamel yapıda olan Si fazının fibröz yapıya geçişini sağlar. Modifikasyona uğramamış durumda Si yapısı iğnemsiz iken, modifikasyon sonrasında ötektik Si yapısında

bulunan iğne şeklinde Si fazının bükülerek fibröz yapıya döndüğü gözlemlenir. (Şekil 1.10) İğnemsis olan ötektik Si yapısında gelen değişim ile gerilme noktaları azalır, bu nedenle modifikasyona uğramamış alaşımlara göre Sr modifikasyonu yapılan alaşımlar daha sünektir [15]. Öte yandan Mg oranının artışı matrisin mukavemetini arttırır ve ötektik tane büyüklüğünü arttırır. Bu durum da hem Sr modifikasyonlu hem modifikasyonsuz elementlerde sünekliliğin azalmasına neden olur. [11]

Sr veya Na elementi kullanılarak yapılan kimyasal modifikasyon sonrası, sıvı alaşım içerisinde hidrojen gazı (H_2) oranı artabilir. Bunun nedeni, H'nin modifikasyon sırasında sıvı alaşım ile birlikte eklenmesi olabilir. H oranı, modifiye edilmiş bir elementin eklenmesi nedeniyle artabilir. Modifiye edilmiş sıvı alaşım içerisinde H çözünürlüğü de artabilir. Bahsedilen üç mekanizmadan bir veya bir kaçının aynı anda etkimesi ile H_2 oranı sıvı alaşım içerisinde artabilir. Artan H_2 oranı, H_2 porozitesi artışına, yani gaz boşluğu oluşumuna neden olabilir [11].

	Kırık Parça (Döküm)	Mikro yapı (Düşük büyütme - x200)	Mikro yapı (Yüksek büyütme - x50)	
Modifikasyon yok				Akma dayanımı: 97 N / mm ² Kopma dayanımı: 166 N / mm ² Uzama: 4% Sertlik: 53 HB
Alt Modifikasyon (40 ppm Sr)				Akma dayanımı: 105 N / mm ² Kopma dayanımı: 205 N / mm ² Uzama: 6,1% Sertlik: 56 HB
Modifikasyon (200 ppm Sr)				Akma dayanımı: 110 N / mm ² Kopma dayanımı: 210 N / mm ² Uzama: 7,2 % Sertlik: 60 HB
Üst Modifikasyon (1000 ppm Sr)				Akma dayanımı: 103 N / mm ² Kopma dayanımı: 187 N / mm ² Uzama: 6,3 % Sertlik: 58 HB

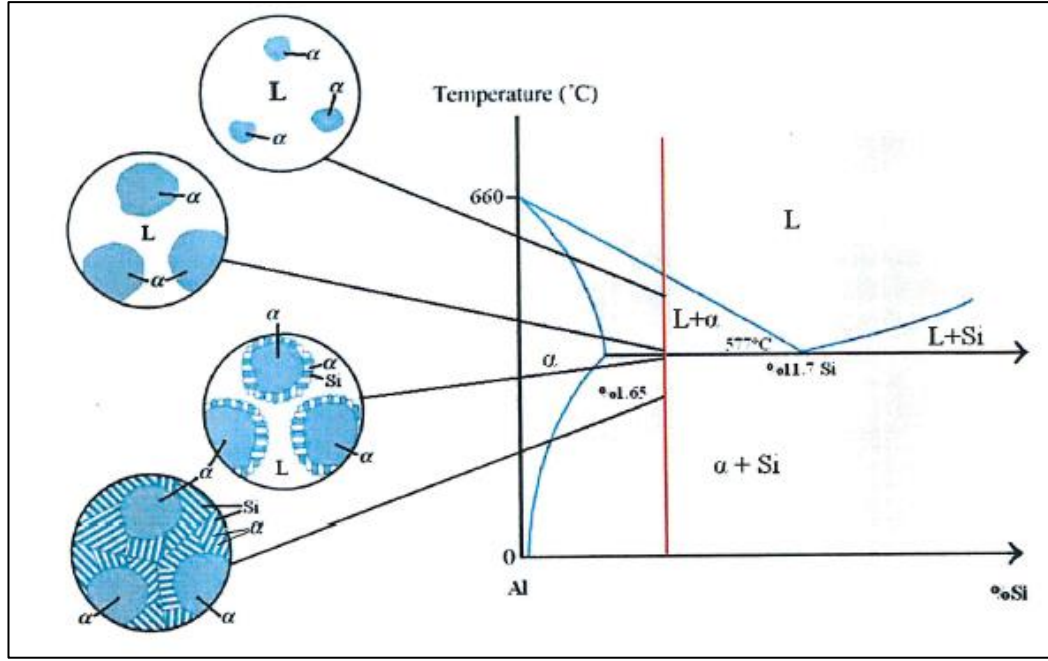
Şekil 1.10 : AlSi7Mg alaşımında Sr modifikasyon etkisi [16].

Modifikasyonun gerçekleşmesi için gerekli iki parametre katılma hızı ve modifikasyon ajanı miktarıdır. Belli bir miktarda Sr elementi, katılma hızını da arttırmaktadır. Bu parametrelerin her ikisinin de yetersiz olduğu durumda

modifikasyon yeterli oranda gerçekleşmez. Bu duruma alt modifikasyon adı verilir. Alt modifikasyon durumunda ötektik alaşım içerisinde bulunan Si fibrözleşmesi yeteri kadar meydana gelmez, dolayısıyla Si yapıda sivri olarak yer almaya devam eder. Bu nedenle yapıda gerilme noktaları bulunmaya devam eder, dayanım ve kopma uzaması değerleri artışı yeterli olmaz. Modifikasyon için gerekenden daha fazla Sr kullanılması ve katılaşma hızının yeterli olmaması ise üst modifikasyona neden olur. Katılaşma hızı yeterli olmadığında, Al dendrit boyu (DAS) daha fazladır. Bu durum yapının içerisinde intermetalik bileşenlerin oluşmasına izin verir. Sr elementinin fazla eklenmesi ise iki sonuca sebebiyet verir. Bunlardan ilki, yapıda bulunan Si içerisinde Al_4SrSi_2 intermetalik bileşeninin oluşması, ikincisi ise Si elementinin yapı içerisinde bağdaşık olarak çökmesine sebep olmasıdır. Buna Si kabalaşması da denilebilir (Şekil 1.10). Her iki durum da mekanik özelliklerin üzerinde modifikasyonun yaratmış olduğu iyileşmeyi geriletici özelliktedir [11].

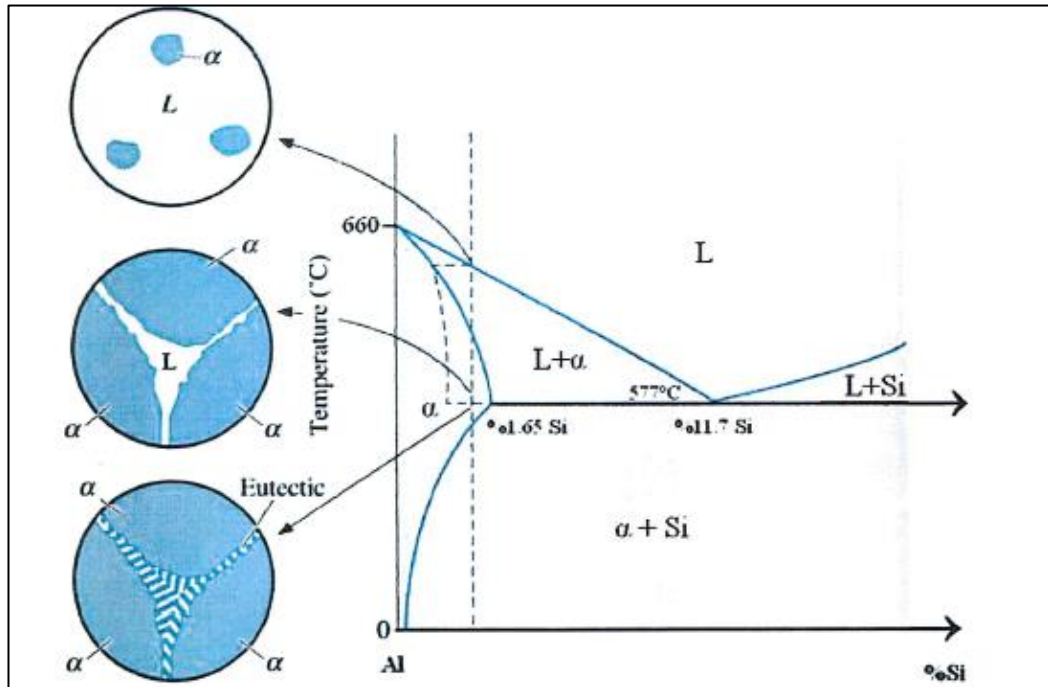
Besleme ve katılaşma hızı

Katılaşmanın başlaması için, döküm yapıldıktan sonra Al-Si alaşımının sıcaklığı, alaşımın yapısında bulundurduğu %Si miktarına karşılık gelen likidus sıcaklığına kadar belirli bir hızda azaltılır. Alaşım bu bölge içerisinde, yani kalıba dolduğunda sıvı fazdadır. Alaşımın sıcaklığı likidus sıcaklığına geldiğinde soğuma hızında bir miktar azalma olur ve sıvı faz içinde α fazı çökmeye başlar. α fazının çökmeye başlaması ile katılaşma başlamış olur. Alaşımın likidus sıcaklığı ile ötektik sıcaklığı arasında yapı sıvı ve α fazından oluşur. (L+ α) Sıcaklık, belirli bir hızda ötektik sıcaklık olan 577°C 'ye kadar azalmaya devam eder ve sıcaklık azaldıkça sıvı faz içerisinde çökelen α fazı miktarı artar. Sıcaklık ötektik sıcaklığa ulaştığında sabitlenir. Sıcaklığın sabit olduğu bu bölgede sıvı faz içinde önceden çökelmiş olan α fazı etrafında α ve Si fazları aynı anda çökmeye başlar. Bu çökme sıvı faz tükeninceye kadar devam eder. Alaşım tamamen katılaştığında, sıcaklık tekrar azalmaya başlar. En son aşamada alaşımın iç yapısı katı ötektik yapı olan $\alpha + \text{Si}$ tarafından etrafı sarılmış α fazı şeklinde oluşur [17].



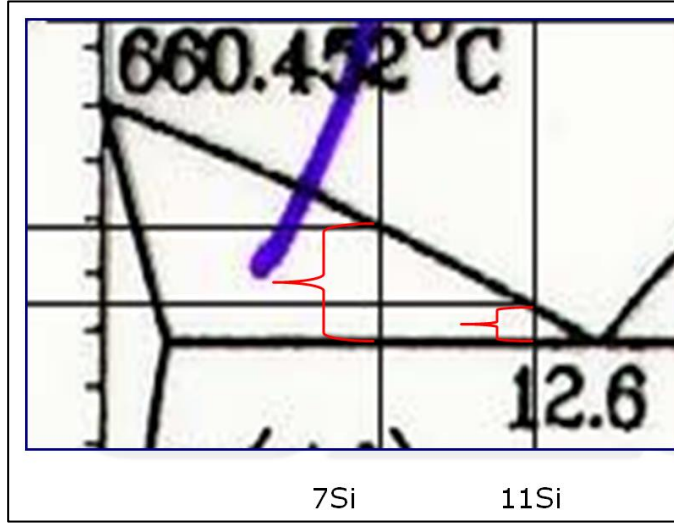
Şekil 1.11 : Al-Si hipoötektik alaşımlarına ait faz diyagramı ve katılaşmaya ait temsili iç yapı [18].

Ötektik sistemlerde alaşım çok hızlı bir şekilde soğutulursa yapı içerisinde sıvı hapsolabilir. Mikroyapılarda dengesiz ötektik yapılar oluşabilir. Dengesiz ötektik yapı, alaşımın sıcak yırtılmasına ve denge ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda ergimesine neden olabilir [19]. Bu bölgeler iç yapıda çekme boşluğu olarak görülebilir.



Şekil 1.12 : Al-Si hipoötektik alaşımlarında dengesiz katılaşma [18].

AlSi7Mg alaşımı, AlSi11Mg alaşımı ile kıyaslandığında daha yüksek sıcaklıkta sıvı fazda bulunmaktadır. AlSi7Mg alaşımı için bu sıcaklık 615°C, AlSi11Mg alaşımı için bu sıcaklık 575°C'dir. Bu fark, döküm operasyonunda da dökümün başladığı optimum sıcaklığın farklı olmasına neden olmaktadır. Buna göre proseste, döküm sırasındaki sıvı Al sıcaklığı AlSi7Mg alaşımı için 720°C, AlSi11Mg alaşımı içinse 700°C olarak belirlenmiştir.



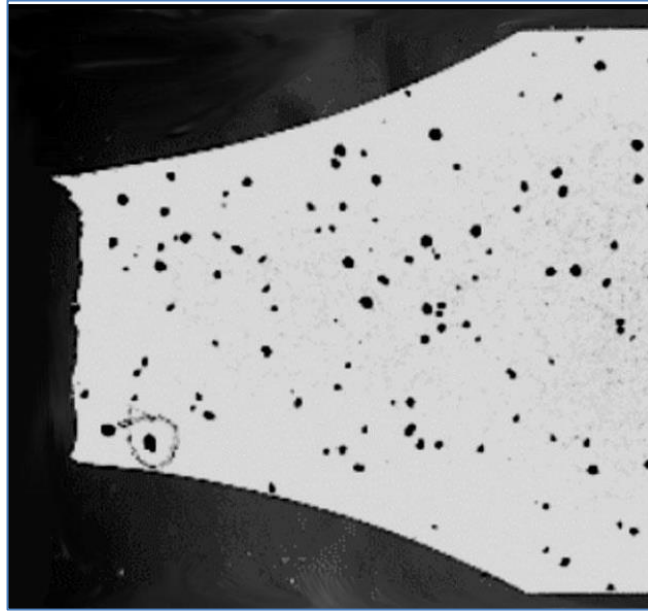
Şekil 1.13 : Al-Si7Mg ve AlSi11Mg alaşımları katılaşma aralıklarının Al-Si faz diyagramı üzerinde gösterimi [20].

Al-Si alaşımlarında da, %Si oranı arttıkça akışkanlık değeriinde artış görülür. Ancak AlSi11Mg alaşımının dökümü, AlSi7Mg alaşımına göre daha düşük bir sıcaklıkla yapıldığından AlSi11Mg alaşımının akışkanlığı sıcaklıkla birlikte azalır. AlSi11Mg alaşımında, akışkanlığın artması için hidrojen oranı daha yüksek bir sıvı alüminyum kullanılır. Bu nedenle AlSi11Mg dökümü, AlSi7Mg dökümüne göre daha kolay gerçekleşmektedir, ancak hidrojen porozitesi oranı daha yüksektir. Hidrojen porozitesi oluşum mekanizması, bir sonraki bölüm olan gaz ve çekme boşluğu oluşum mekanizması bölümünde daha detaylı olarak anlatılacaktır. AlSi11Mg alaşımında katılaşma, faz diyagramında anlatıldığı üzere AlSi7Mg alaşımına göre daha kısa sürmektedir. Soğuma hızının artması, dendritlerin ve ötektik taneciklerin inceltilmesinde rol oynar ve sünekliği artırır. Bu nedenle AlSi7Mg alaşımlarının sünekliği AlSi11Mg alaşımlarına göre daha fazladır, çünkü AlSi7Mg alaşımlarında katılaşma süresi yeterli olduğundan daha fazla soğutma uygulanır. AlSi7Mg alaşımlarının dökümü daha yüksek sıcaklıkta başlar, soğutmalar aktif olarak çalıştırılır ve artan soğuma hızı sünekliğin artmasına sebep olur [18].

Al-Si alaşımlarında gaz ve çekme boşluğu oluşumu

Al-Si alaşımlarında gaz ve çekme boşluğu oluşumu konusu iki farklı başlık altında incelenebilir. Bunlardan ilki hidrojen miktarı nedeniyle meydana gelen hidrojen porozitesinin yarattığı gaz boşlukları, ikincisi de hızlı katılaşmadan dolayı dendrit kolları arasında oluşan boşlukların oluşturduğu çekme boşluklarıdır.

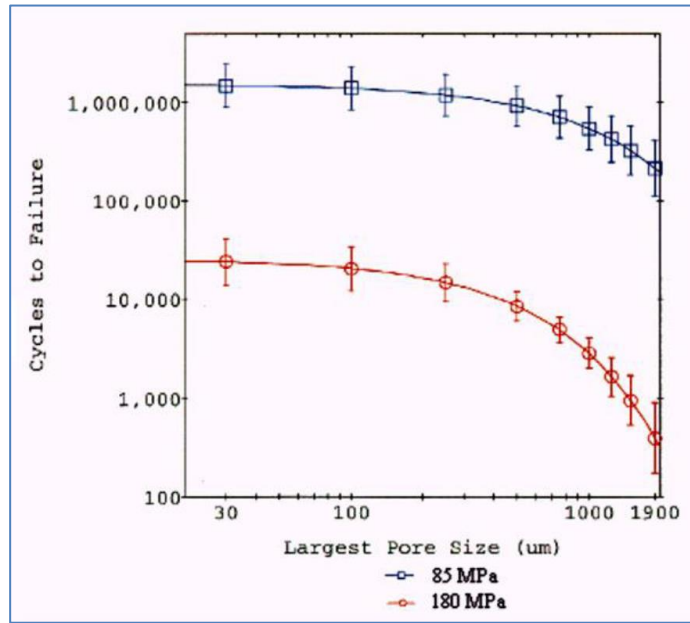
Al-Si alaşımlarının sıvı hallerindeki H^+ iyonu çözünürlüğü katı haldekinden 20 kat fazladır. Bu sebeple katılaşma sırasında iyonlar biraraya gelip H_2 gazını oluştururlar. Bu gazların yapı içerisinde görünür hale gelmeleri hidrojen porozitesi olarak adlandırılır ve mikroyapıda dairesel bir süreksizlik görüntüsü verir [8]. Ömür testinde kullanılan ve değişen porozite seviyesine sahip bir test parçası örneği verilmiştir (Şekil 1.14).



Şekil 1.14 : Değişen porozite seviyesine sahip ömür test parçası örneği [8].

Diğer yandan, hidrojen miktarı artan sıvı alaşımın akışkanlık değerinde de artış görülür. Katılaşma sıcaklık aralığı daha düşük olan AlSi11Mg alaşımında akışkanlığı sağlayabilme amacı ile AlSi7Mg'ye hidrojen miktarı daha yüksek bir sıvı alüminyum kullanılır. Bu nedenle AlSi11Mg dökümü, AlSi7Mg dökümüne göre daha kolay gerçekteşmektedir, ancak hidrojen porozitesi oranı daha yüksektir. Bu durum, AlSi11Mg alaşımı ile ön yüzey işlemeli jant üretimini imkansız hale getirmektedir; çünkü ön yüzey işlemeli jant üretimi için gerekli olan toz vernik işlemi sonrası talaşlı imalat adımı, döküm sırasında oluşan ve hidrojen porozitesi olarak adlandırılan boşluklar yüzey işleme sonrası yüzeye açılırlar [1]. Ön yüzey işlemeli jant üretimine

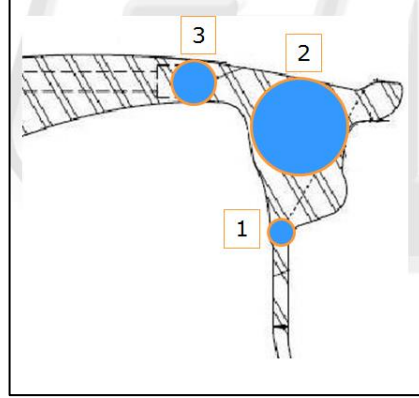
ait detaylara 1.2.2.3 numaralı bölüm içerisinde yer verilmiştir. AlSi11Mg alaşımındaki yüksek hidrojen ile döküm yapılma gereksiniminden ötürü, hidrojen oranı miktarı yüksek olmakla beraber gaz boşluğu büyüklüğü izin verilen limit değerlerindedir. Sr modifikasyonu yapılmış olan alaşımlara ait dökümlerde, Sr elementinin hidrojen tutma kabiliyeti olduğu için Sr oranında artış dökümü kolaylaştırır. Verilen bir hidrojen oranı için hidrojen porozitesinin miktarı ve büyüklüğü, modifikasyonda kullanılmış olan Sr oranı ve tane incelticilerin kullanımı ile doğru orantılıdır. Lokal proses parametrelerinden toplam katılaşma süresi de porozite miktarına etki etmektedir [8]. Gaz boşluğu büyüklüğünün, ömür ile doğrudan ilişkisi vardır [21]. Döküm sırasında oluşmuş olan en büyük gaz boşluğu, ürünün ömür limitinde belirleyici olur (Şekil 1.15).



Şekil 1.15 : Gaz boşluğu büyüklüğünün ömür üzerindeki etkisi [21].

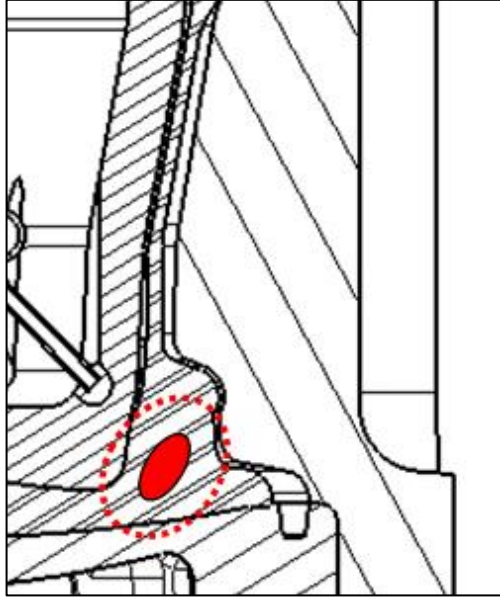
Jant kesidi üzerinde kütle değişiminin keskin olduğu bölgeler, hotspot bölgeleri olarak tanımlanırlar. Şekil 1.16'da 2 numaralı bölge olarak gösterilen bölge hotspot bölgesi olarak tanımlanmaktadır. CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş. bünyesinde yapılan deneysel bir çalışmada, aynı ürün AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımı ile dökülmüştür. AlSi11Mg dökümü sonrasında Şekil 1.16'de 2 numaralı bölge olarak, şekil 1.17'de kırmızı olarak gösterilen ve topuk bölgesi olarak adlandırılan bölgede çekme boşluğu oluşumu gözlemlenmiştir. 1 ve 3 numaralı bölgeler, kesitler ince olduğundan hızlı katılaşırlar. 2 numaralı bölgede alaşım sıvı olarak kalır. Yetersiz besleme süresinden ötürü, sıvı faz ile bağlantı kesileceğinden, daha önceki katılaşma

hızı bölümünde dengesiz katılaşma olarak tarif edilen durum gerçekleşir. Bölgede sıvı kalması, sıcak yırtılmaya neden olur [19].



Şekil 1.16 : Jant üzerinde feder lastik kesit geçiş görünümü [18].

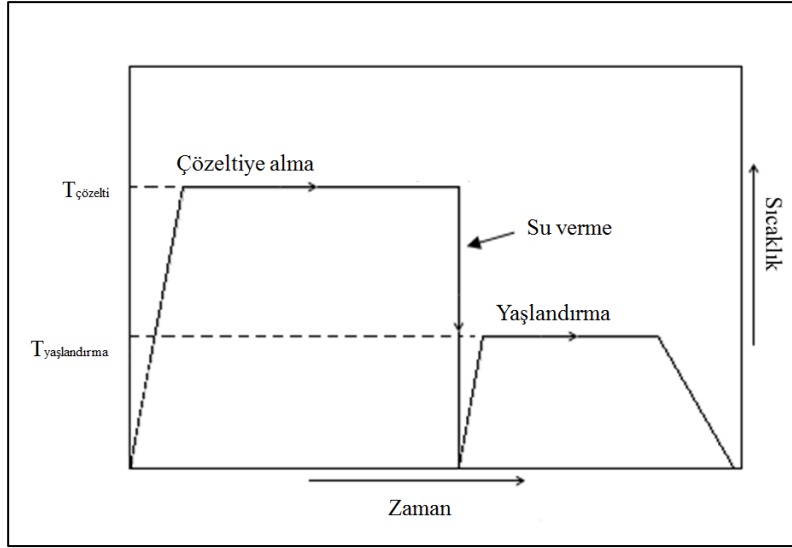
Yapılan deneysel çalışma, aşağıdaki şekilde de kırmızı olarak gösterilen hotspot bölgesi üzerinde tek yönlü bir katılaşmanın sağlanması ve uygun bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmesi için, o bölgede ekstra soğutma uygulanması gerektiğini göstermektedir (Şekil 1.17).



Şekil 1.17 : Kalıp kesidi üzerinde feder lastik kesidi geçiş görünümü [18].

Isıl işlem (T6 – Yapay Yaşlandırma)

Ticari Al-Si-Mg alaşımlarına genellikle T6 ısıtıl işlem uygulanır [1]. T6 ısıtıl işlem prosesinde etkin parametreler; çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi, su verme hızı, yaşlandırma sıcaklığı ve yaşlandırma süresidir (Şekil 1.11).



Şekil 1.18 : Yapay yaşlandırma (T6) yöntemi ile ısıtım süreçleri [14].

Çözeltiye alma işlemi yeterli bir süre homojen ve aşırı doymuş bir yapı elde etmek için uygulanmalıdır. Çözeltiye alma işleminden sonra uygulanan su verme işlemi de aynı yapıyı oda sıcaklığında elde etmek için uygulanmaktadır. Çözeltiye alma işlemi, döküm yapının homojenizasyonu, intermetalik Mg_2Si fazının çökmesi ve ötektik Si morfolojisinin değişmesi için uygulanır. Çözeltiye alma için gerekli olan süre, dendritik yapının uzunluğu ve çözeltiye alma sıcaklığı ile ilgilidir [22]. Dayanım arttırmak için Al-Si alaşımlarında yer alan Mg'nin solidus sıcaklığında katı içerisinde çözünebilirliği oldukça yüksektir. Çözeltiye alma sıcaklığı azaldıkça, katı içerisinde çözünebilirlik oranının da azaldığı gözlemlenmiştir [23].

Ötektik Si fazının büyüklüğü ve morfolojisi, alaşımın mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Isıl işlem yardımı ile Si fazının tanelerine ayrılması ve küreselleşmesi, ötektik Si kollarının parçalara ayrılması veya çözünmesi ve ayrılan kolların küreselleşmesi ile meydana gelir. İlk aşamalarda, modifiye edilmemiş Si fazı boyun vererek parçalarına ayrılmaya maruz kalırlar, ancak modifiye edilmemiş Si özellikleri korunur. Bu ayrılma sonucunda, ortalama tane boyutu azalır ve parçalanmış olan yapılar küreselleşirler. Alüminyum ergime sıcaklığı $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında olması nedeni ile işlem sıcaklığı $525 - 545\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında olmalıdır [24].

Çözeltiye alma işlemi optimize edilmelidir, çünkü kısa süren çözeltiye alma işleminde alaşım elementlerinin çözünmemesi ve yaşlandırma sertleştirme prosesi için hazırlanamaması anlamına gelir. Çözeltiye alma işleminin gereğinden uzun sürmesi ise yüksek enerji maliyetine neden olabilir. Mg ve Si alaşım elementlerinin,

yaşlandırma sırasında çökerek dayanım artışını sağlaması için homojen halde çökmesi gereklidir [24].

Su verme işleminin amacı, yaşlandırma aşamasında çökecek olan ve çözeltiye alma aşamasında çözünmüş olan bileşenlerin (Mg_2Si) oda sıcaklığında aşırı doymuş bir çözelti oluşturmalarını sağlamaktır, bu durumun oda sıcaklığından önce gerçekleşmesini önlemektir [24].

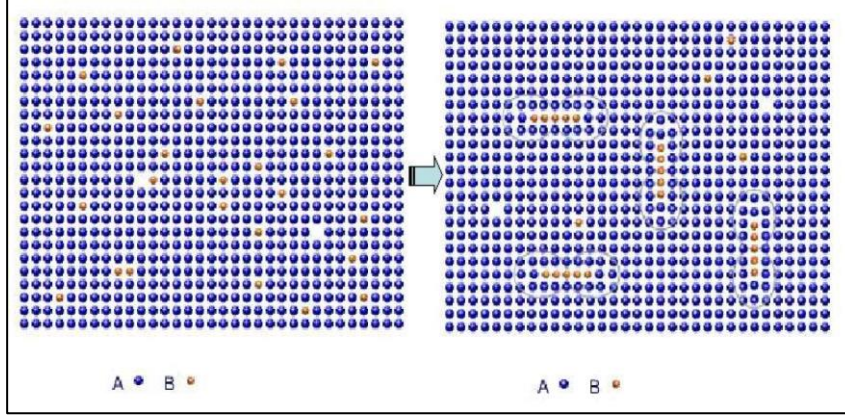
Su verme oranı 450 °C and 200 °C aralığında önemlidir. Bu aralıkta yüksek oranda aşırı doyma ve yüksek difüzyon hızı nedeniyle çökme gerçekleşir. Daha yüksek sıcaklıklarda aşırı doyma azalır. Düşük sıcaklıklarda ise difüzyon hızı çökmenin gerçekleşmesi için yeterli olmaz. Su verme hızının 4°C/s'nin altında olması gerekmektedir. Bu değer üzerindeki hızlarda akma gerilmesindeki artış, artan su verme hızı ile birlikte çok yavaş artar. 4°C/s optimum hızdır [24].

Optimum su verme hızı, yapı içerisinde oluşan ve yaşlandırma aşamasında çökecek olan Mg_2Si fazının yerleşeceği boşlukların miktarı ve parça üzerindeki çarpılmanın minimize edilmesi için önemlidir. Su verme hızının yavaş olması, parça üzerindeki artık gerilme ve çarpılma miktarının azalmasını sağlar, ancak su verme sırasında yaşlandırmanın başlaması, bölgesel aşırı yaşlanma, tane sınıflarının azalması, korozyon eğiliminin azalması ve yaşlandırma fazının etkisinin azalmasına neden olur. En iyi süneklik ve dayanım kombinasyonu hızlı soğutma ile elde edilir. Su verme hızının istenen mikroyapıyı elde etme ve istenenden erken yaşlandırma başlamasını engelleyecek şekilde seçilmesi gereklidir. Su verme işleminde su, tuzlu su çözeltisi ve polimer çözeltisi kullanılır. Su, alüminyum alaşımları için dominant olarak kullanılır, ancak su, çarpılma, çatlak ve artık gerilme problemini de beraberinde getirir [24].

Yaşlandırma işlemi, alüminyum alaşımlarının dayanımlarının artırılmasında en önemli aşamalardan biri olarak bilinir. Bu aşama, çözeltiye alma sırasında homojen olarak çözünen ve dislokasyonların kesilmesini sağlayabilecek olan bileşiklerin bağdaşık olarak çökmesi prensibine dayanır. Yaşlandırma süresi ve sıcaklığının kontrolü ile, bir çok mekanik özellik kombinasyonu elde edilebilir. Yaşlandırma işlemi, oda sıcaklığında olabileceği gibi, hızlandırılarak 90 – 260 °C aralığında da gerçekleştirilebilirler [24].

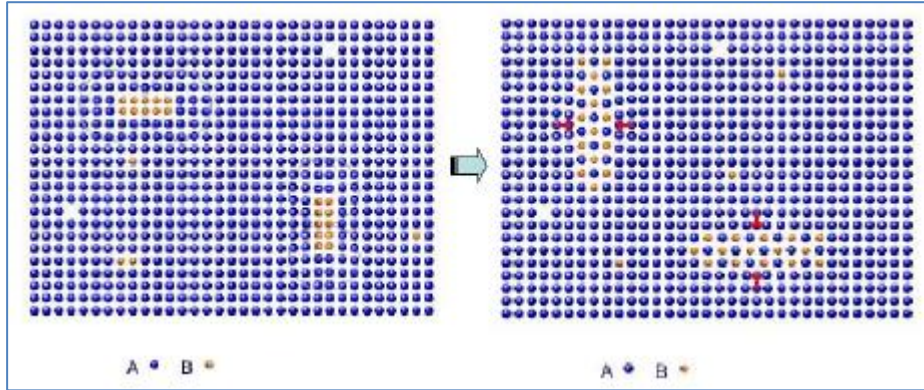
Çözelti aşaması sonucunda aşırı doymuş yapı, denge yapısına dönmek ister. Şekil 1.19'da sol tarafta görülen yapı, su verme işlemi sonrasında Al matrisi içerisinde aşırı doymuş Mg_2Si katı çözeltisi fazını temsil etmektedir [14]. Yaşlandırma işlemi

sırasında gerçekleşen difüzyon sonucu Mg_2Si atomları, enerji düzeylerini azaltmak için Al matrisi içerisinde yan yana gelirler ve bölgesel konsantrasyonlar oluştururlar. Şekil 1.19'da sağ tarafta görülen yapıda bu durum temsili olarak gösterilmiştir. Bu bölgeler GP (Guinier – Preston) bölgeleri olarak adlandırılır. Bazı sistemlerde GP bölgeleri disk, küre veya çubuk şekilli olabilir [14].



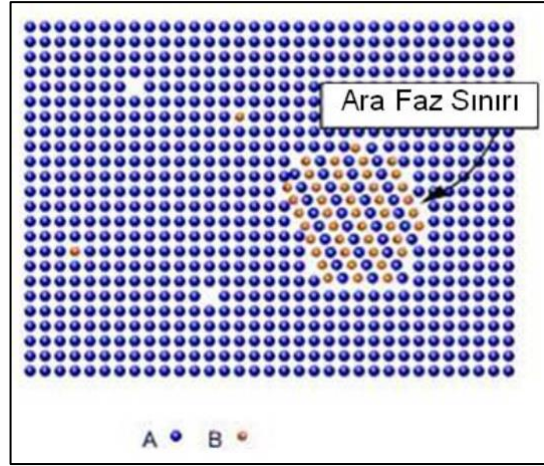
Şekil 1.19 : Yaşlandırma yöntemi ile ısıl işlemde ilk kademe yapı değişimi [14].

GP bölgeleri, tutarlı bir ara faz oluşturmaya çalışırlar. GP bölgeleri etrafındaki Al atomları ise, oluşan bu ara fazın ilerlemesi ve yerleşmesi için yer değiştirmeye çalışırlar. GP bölgelerinin bir araya gelmesi kuvveti ile Al atomları deformasyona uğrarlar. Çökelti boyutu arttıkça, boyut artışından kaynaklanan sıkışma dislokasyon oluşumuna neden olur (Şekil 1.20).



Şekil 1.20 : Yaşlandırma yöntemi ile ısıl işlemde ara kademe yapı değişimi [14].

Denge aşaması için son fazda, büyümeden kaynaklanan sıkışma etkisi elimine edilmiş, yapı içerisinde yeni bir ara faz sınırı oluşmuştur (Şekil 1.21).



Şekil 1.21 : Denge aşaması [14].

Hipoötektik Al-Si alaşımları ısıtılma işlemi uygun alaşımlardır. Alçak basınçlı döküm yöntemi ile Al-Si alaşımlı jant üretiminde kullanılan AlSi7Mg alaşımına ısıtılma işlemi uygulanmakta, AlSi11Mg alaşımına ise ısıtılma işlemi uygulanmamaktadır. Bunun nedeni iki alaşım arasındaki %Mg oranı farkı ile açıklanabilir. AlSi11Mg alaşımlarda, AlSi7Mg alaşımlara kıyasla %Mg oranı ortalama %0.1 daha düşüktür. AlSi7Mg malzemelerde %Mg oranının daha yüksek olması, ısıtılma işlemin etkin bileşeni olan ve çökelerek dayanım artışı sağlayan Mg_2Si oranının daha fazla olmasını sağlar, bu nedenle AlSi7Mg, AlSi11Mg alaşımına göre ısıtılma işlemi daha uygun bir malzemedir. AlSi11Mg alaşımına da ısıtılma işlemi uygulanabilir, ancak dayanım artışı oranı yeterli olmadığından ve ısıtılma işlemi maliyetli bir proses olduğundan, pratikte AlSi11Mg alaşımlarına ısıtılma işlemi uygulanmamaktadır.

Bunun yanında, ısıtılma işlemi görmemiş olan malzemelerin boya fırınlarında yaşlandırma sıcaklıklarının üstüne çıkmalarından dolayı bir miktar ısıtılma etkisi gördükleri için mekanik özellik kazanırlar.

1.2.2 Jant üretimi

Bu bölümde, alüminyum jant için kullanılan farklı üretim yöntemleri ile ilgili bilgi verilecektir. Tez çalışması kapsamında incelenecek olan Al alaşım alçak basınçlı döküm yöntemi ve döküm sonrası prosesler hakkında bilgi sunulacaktır.

1.2.2.1. Dövme yöntemi ile jant üretimi

Dövme işlemi, alüminyumun moleküler dokusunu jantın geometrisine göre şekillendirir. Kamyon, treyler ve kamyonlar gibi mukavemet değerlerinin çok yüksek olması gerektiği durumlarda çoğu zaman dövme alüminyum jantlar kullanılır.

Döküm yöntemine göre benzer prosesler içeren, ancak daha maliyetli olan dövme yöntemi ile üretim giderek azalmıştır [25].

Dövme prosesi ile üretim aşamaları döküm yöntemi ile benzer adımlar içerir. Ancak hammadde hazırlık aşamasında farklılık gösterirler. Döküm yönteminde ise sürekli eriyik halde olan hammadde şarj olarak hazır bulundurulur ve bir şarjdan yapılan üretimde yaklaşık 15 – 20 adet jant üretimi gerçekleştirir. Dövme yönteminde tek bir Al bloğu olarak hazırlanmış olan jant ile üretim süreci başlatılır (Şekil 1.22)..



Şekil 1.22 : Dövme yönteminde kullanılan alüminyum blokları [25].

Daha sonra ortalama 8000 tonluk dövme presisi ile blok jant şekline dönüştürülürler. Dövme işleminden sonra, döküm yönteminde olduğu gibi mekanik dayanımın artırılması için ısıtılma işlemine tabi tutulurlar (Şekil 1.23).



Şekil 1.23 : Dövme yönteminde kullanılan alüminyum blokları [25].

Dövme yöntemi ile üretilen jantlarda, gövde ve çember bölgelerinin buluştuğu ve topuk adı verilen kritik bölgelerde bile jantın şekli ile Al moleküler doku akışının aynı düzende olması sağlanır. Bu işlem sonucunda homojen bir dayanıma sahip jantlar elde edilir. Hassas üretim hattında her bir jant dairesel yapı bütünlüğünü sağlamak amacıyla işleme tabi tutulurlar. Bu da sürüş esnasında oluşabilecek balans bozukluklarını ortadan kaldırır. Daha sonraki aşamada havalandırma ve montaj

delikleri açılır. Daha sonra janta farklı yöntemler ile yüzey işleme işlemleri tamamlanır [25].

1.2.2.2. Soğuk şekillendirme yöntemi ile jant üretimi

Soğuk şekillendirme ile jant üretiminde yaygın olarak kullanılan malzeme çelik sacdır. Geçmişte otomobil ve diğer küçük jantların üretiminde kullanılan bu yöntem, küçük ebatlar için döküm yöntemiyle alüminyum ve titanyum alaşımlı jant üretiminin gelişerek seri üretimde kullanımının yaygınlaşması sebebiyle, artık sadece iş makinaları, forklift, kamyon ve treyler jant üretiminde kullanılmaktadır.

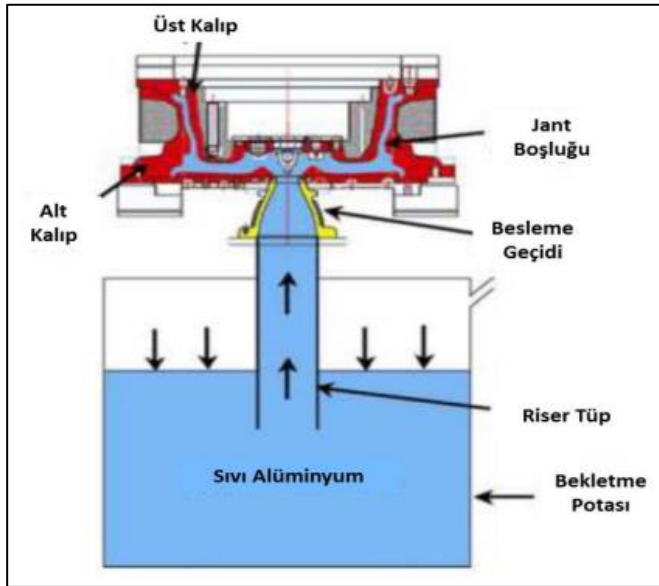
Sacadan jant üretiminde kullanılan en yaygın soğuk şekillendirme yöntemi sıvama yöntemidir. Sıvama yöntemi ile iki veya daha çok parçalı jant imalatı yapmak mümkündür. Sıvama yöntemi ile jant üretimi aşamaları sırasıyla giyotin kesim, kıvrırma, yakma alın kaynağı, çapak sıyrırma ve kaynak ezme, kalibre, ilk sıvama ve ikinci sıvama işlemlerini içermektedir.

Alın kaynak operasyonundan sonra sac plakadan kasnak üretimi aşamasına geçilir. Bu işlem sırasında kıvrılarak yuvarlak hale getirilmiş olan malzeme, uçlarından geçirilen yüksek akım ile ısıtılır ve uçlar birbirlerine vurdurularak puntalanır. Böylelikle kalıcı birleşme sağlanmış olur. Alın kaynak operasyonunda yüksek akım nedeniyle ergiyen fazla metalin sıyrılarak atılması ve sıyrılan bölgenin ezilerek düzeltilmesi gerekir. Bu operasyona çapak sıyrırma adı verilir. Bu operasyonlardan sonra kasnağın kenarında kalan yüzeyin düzeltilmesi için gerekli uç kesme ve taşlama operasyonları yapılır. Sonrasında kasnak kalibrasyon, yani istenilen ölçülerin elde edilmesi amacıyla dikey ve yatay olarak çalışabilen ve içe ve dışa doğru açılabilen kalibre tezgahına verilir. Kalibre edilen kasnak sıvama yöntemiyle şekillendirilmek üzere sıvama tezgahına konur. Burada sıvama topları yardımı ile iki aşamada şekillendirme tamamlanır.

Sıvama yöntemi ile soğuk şekillendirme yönteminin avantajlarından en önemlisi, nihani ürünün merkez eksenini boyunca simetrik olarak elde edilebilmesidir. Ayrıca nihai ürün boy / çap oranı, derin çekme ile elde edilemeyecek kadar büyük olabilir, böylece döküm ile üretim aşamasında bir kısıt olan ebat kısıtı ortadan kalkar. Sıvama ile üretilen malzemelerin yüzey kalitesi oldukça iyidir ve bu yöntemle ölçüsel uygunluk rahatlıkla sağlanmaktadır. Örnek bir sıvama tezgahı resmi aşağıda verilmiştir [26].

1.2.2.3. Alçak basınçlı döküm yöntemi ile jant üretimi

Alçak basınçlı döküm yöntemi, sıvı metalin kalıba hava (yükseltici tüp) yardımı ile doldurulması prensibine dayanan bir döküm yöntemidir. Alçak basınçlı döküm yönteminde kullanılan kalıcı kalıp pahalı olduğundan, alçak basınçlı döküm yöntemi ile üretim yalnızca seri üretimde ekonomik bir yöntemdir. Alçak basınçlı döküm yönteminin alüminyum alaşım jant sektöründe kullanılmaya başlanmasından önce, jant üretimi gravite döküm yöntemi ile gerçekleştiriliyordu. Ancak yükselen ana üretici talepleri ile birlikte gravite döküm yöntemi, jant yüzey özellikleri ve mekanik dayanım gereksinimlerini karşılama anlamında yetersiz kalmıştır [29]. Pota içerisinde eriyik halde bulunan alaşımın yüzeyinde ametaller ve cüruf, dibinde ise ağır metaller çökmüş halde bulunur. Alçak basınçlı döküm yönteminde, yükseltici tüp yardımı ile eriyiğin temiz olan kısmından malzeme kalıba alınır (Şekil 1.24).



Şekil 1.24 : Alçak basınçlı döküm yönteminde kullanılan tezgah [27].

Gravite döküm yönteminde bu şekilde temiz malzeme alımı sağlanamaz. Temiz malzeme ile yapılmayan jant üretiminde de istenen yüzey özelliklerini elde etme oranı daha azdır. Yüksek basınçlı döküm yöntemi, alçak basınçlı döküm yönteminden daha gelişmiş bir yöntem olup, daha küçük ve kompleks parçaların üretiminde kullanılır. Alçak basınçlı döküm yöntemi ile doldurulamayan parçaların üretimi için tercih edilen bu yöntem, alçak basınçlı döküm yöntemine göre daha pahalı bir yöntem olup, jant gereksinimlerini karşılamak için alçak basınçlı döküm yöntemi günümüz beklentilerini karşılamaktadır [30].

Bu kısımda, CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş. firma bünyesinde alçak basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum alaşım jant üretim adımları listelenecek ve ilerleyen başlıklar altında üretim adımlarının detayları anlatılacaktır.

Alçak basınçlı döküm ile alüminyum alaşım jant üretimi alçak basınçlı dökümün gerçekleştirilmesi ile başlar. Dökümden önce, giriş kalite kontrol ve hammadde hazırlık aşamaları mevcuttur. Döküm yapıldıktan sonra X-ray kontrol sürecine tabi tutulurlar. Bu aşamadan sonra göbek delme ile tel filtrenin ayrılması ve AlSi7Mg alaşımlı jantların bir kısmı için ısıtılma işlemi (T6) prosesi mevcuttur. Isıtılma işlemi (veya göbek delme) sonrası jantlar talaşlı imalat prosesine girerler. Talaşlı imalat prosesi sonrası sırasıyla balans ve sızdırmazlık kontrolleri tamamlanır, bu prosesleri uygun olarak tamamlayan jantlar ise tesviyeye alınırlar. Tesviye sonrası uygun olan jantlar boyahanede üretime alınırlar. Burada bahsedilen ve alçak basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum alaşım jant üretiminin parçası olan her proses, ilerleyen bölümlerde sırası ile anlatılacaktır.

Giriş kalite kontrol

Bloklar halinde alınan alüminyum külçeleri, giriş kalite kontrol prosesinden geçirilir. İlgili şartname gereği, alüminyum külçeler için mikroyapı kontrolü, görsel kontrol ve kimyasal kompozisyon analizi yapılır. Uygun olan külçeler, ilgili alaşım bazında palet renk kodlaması yapıldıktan sonra hammadde hazırlık aşamasında kullanılmak üzere hammadde hazırlık bölümüne iletilirler.

Hammadde hazırlık

Hammadde hazırlık aşaması, alaşım külçelerinin eritilmesi ile başlar. AlSi7 ve AlSi11 alaşımları farklı ocaklarda eritilirler. Bu malzemelerden çıkan AlSi7 ve AlSi11 talaşlarının eritme işlemleri de farklı ocaklarda yapılır. Eritme işlemleri tamamlandıktan sonra, talaş ve külçe ocaklarından belirli oranlarda maden alımı yapılır. İdeal durumda %100 AlSi7 veya AlSi11 alaşımı kullanılmalıdır, ancak maliyet azaltma ve geri dönüşüm için bu malzemelerden çıkan talaşlar da üretimde tekrar kullanılmaktadır (Şekil 1.25).



Şekil 1.25 : Hammadde eritme tezgahı.

Strikoda eritilen metalin döküm yapılacak tezgaha taşınması için maden alımı yapılır. maden alımı sırasında, tane inceltme, modifikasyon ve alaşımlandırma için gerekli ilaveler yapılır. Bu ilavelere alaşımlandırma amaçlı Mg ekleme, modifikasyon için Sr ekleme ve tane inceltme için $AlTi_5B$ ekleme dahildir [8, 11, 15]. Bu alaşımlar, karışımın daha homojen olabilmesi için, gaz giderme işlemi öncesinde yapılır.



Şekil 1.26 : Sr, $AlTi_5B$ ve Mg çubukları.

Gaz giderme işlemi, farklı üretimlerde üç farklı şekilde yapılabilir. Bu yöntemler N_2 gazı kullanarak gaz giderme, N_2 flaks kullanarak gaz giderme ve N_2 flaks gaz giderme ile birlikte kontrollü H_2 ekleme yöntemleridir. Gaz gidermede amaç, soygaz kullanımı ile oksit, yabancı partiküller ve H_2 'nin metal içerisinde floatasyon

yöntemi ile yüzeye alarak metalin temizlenmesidir. N yerine Ar gazı da aynı görevi yapar, ancak Ar gazı pahalı olduğundan N gazı kullanımı daha yaygındır. Gaz giderme, H₂ gazının çözünmemesi prensibine dayanır. Azot gazı, farklı tepkimeler ile hidrojenleri mekanik olarak yüzeye yapıştırıp, ametalik olarak yukarı çıkarır. Flaks kullanımı, oksitlerin azota daha iyi yapışmasını sağlar, oksitin ıslatma açısını artırır ve ıslatma yüzeyini genişletir ve tepkimeyi hızlandırır. Jant üretiminde gaz gidermede genellikle N₂ flaks yöntemi, kontrollü H₂ ekleme yöntemi ile birlikte kullanılır [31]. Kontrollü H₂ eklemenin amacı akışkanlık ile açıklanır. Gaz giderme işleminde H₂ giderilmesi poroziteyi azaltır, ancak azalan H₂ ile birlikte, metalin akışkanlığı da azalır. Bu nedenle bazı dökümlerde kontrollü H₂ gazı verilir. Jant üretiminde, zaten akışkan olan ve yüksek hidrojen oranı ile dökümü gerçekleştirilen AlSi11Mg alaşımı için H₂ gazı verilmez. Daha sonraki bölümlerde anlatılacak olan ön yüzey işlemeli jant üretiminde de, işleme sonrası porların yüzeye açılma riskinden dolayı H₂ gazı verilmez.



Şekil 1.27 : Gaz giderme işlemi.

Alçak basınçlı döküm

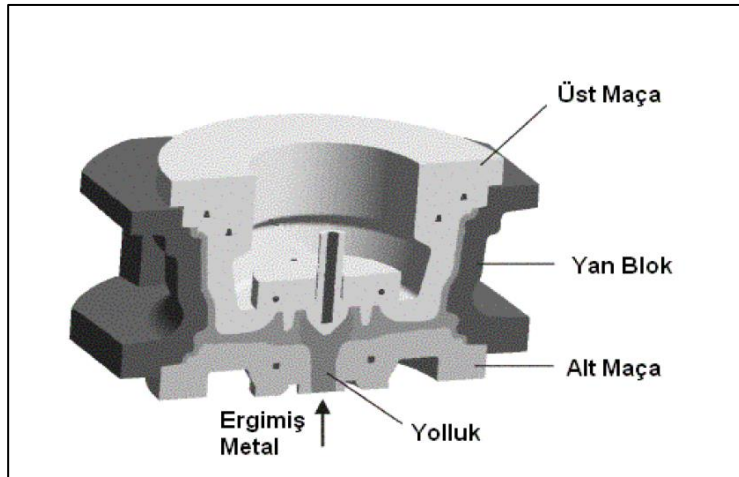
Gaz giderme işlemi tamamlandıktan sonra, ocağa transfer gerçekleştirilir. Ocak transferinden sonra, tezgah üretime yeni başlıyorsa, metal ve ocak içi ısı dengesi oluşması için belirli bir süre beklenir. Sıcaklık değerleri istenilen seviyeye geldikten

sonra döküm başlar. Bundan sonra yapılan transferlerde üretim durmadan devam eder.



Şekil 1.28 : Alçak basınçlı döküm yönteminde kullanılan tezgah.

Alçak basınçlı döküm yöntemi ile jant üretiminde kullanılan temel elemanları üst maça, alt maça, yolluk ve yan bloklardır (Şekil 1.29). Üst maça ve alt maça üretiminde genellikle kalıp çelikleri, yan blok üretiminde ise GG28 dökme demir kullanımı tercih edilir. Yolluk malzemesi ise seramiktir.

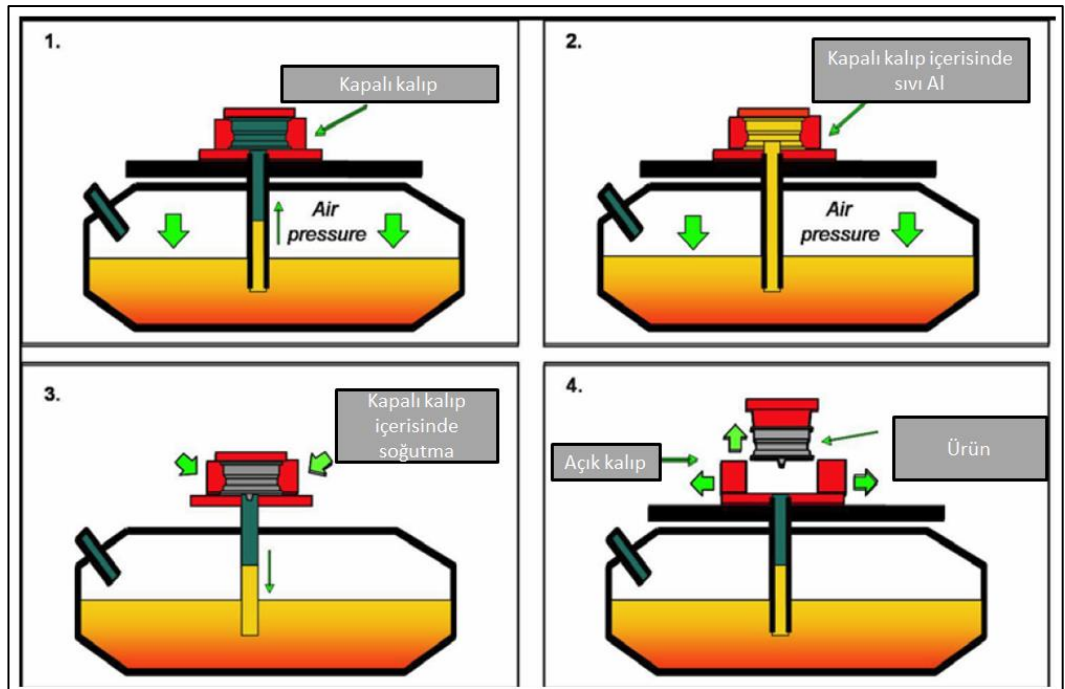


Şekil 1.29 : Alçak basınçlı döküm yönteminde kullanılan kalıp ve elemanları [14].

Ocaktan kalıba metal geçişi yükseltici tüp (riser tüp) olarak adlandırılan dikey yolluk yardımcı elemanı ile gerçekleştirilir. Dikey yolluk sayesinde metalin temiz olan kısmından malzeme alınarak kalıba ulaştırılır. Metalin kalıba iletilmesi hava, Ar veya

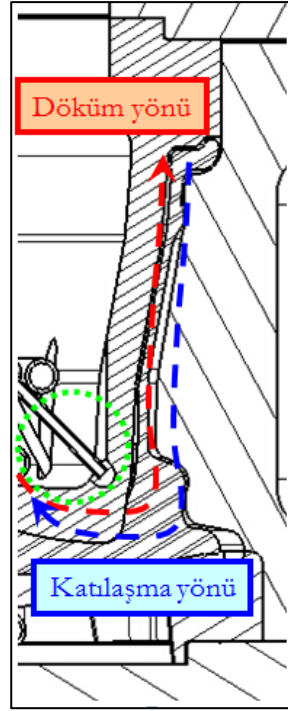
N₂ gazları ile gerçekleştirilebilir. Üretimi yapılacak olan alaşımın akışkanlık değerine göre Ar veya N₂ gazı kullanımına karar verilir.

Bir döküm çevrim süresi, metalin kalıba dolumu ve katılaşma süresini kapsar. Metal, kalıbın içerisine yaklaşık 30 – 40 s. içerisinde dolar. Bu süre, her iki alaşım için de kayda değer bir farklılık taşımaz. AlSi7Mg ve AlSi11Mg üretimleri katılaşma aşamasında fark eder. AlSi11Mg yaklaşık 240 – 260 s. aralığında katılaşırken, AlSi7Mg alaşımı 300 – 320 s. aralığında katılaşır. Katılaşma sırasında uygulanan basınç kalıbın büyüklüğüne göre değişmekle birlikte yaklaşık 1 bar'dır. Şekil 1.30'da alçak basınçlı döküm prosesinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 1.30 : Alçak basınçlı döküm prosesinin şematik görünümü [3].

Metalin kalıba dolumu tamamlandıktan sonra, kalıp içerisinde yönlü katılaşma sağlanacak şekilde soğutmalar yerleştirilir. Katılaşma, döküm yönüne ters olacak şekilde gerçekleşir. Şekil 1.31'de kalıp kesidi üzerinde döküm ve katılaşma yönleri gösterilmiştir.



Şekil 1.31 : Döküm ve katılaşma yönlerinin kalıp üzerinde gösterimi [18].

Katılaşma tamamlandıktan sonra jant kalıptan alınır ve tezgahın hemen yanında bulunan soğutma havuzuna daldırılır. Bu soğutma havuzunun amacı, ürüne mekanik özellik kazandırmak değil, jantın sonraki proseslerde tezgah ve operatöre zarar vermemesi için sıcaklığının azaltılmasıdır. Döküm sonrasında sıcaklığı 350 – 400 °C olan jantın sıcaklığı havuza daldırıldıktan sonra 70 – 80 °C'ye iner. Ek olarak jant kalıptan çıktığında 50 – 60 HBW sertliğindedir, dolayısıyla yumuşaktır ve konveyörde ilerlerken deformasyona uğrayabilir. Havuza alınma prosesinden sonra jantın yüzey sertliği bir miktar artar, böylece diğer proseslerde deformasyona uğrama riski azalır. Jant, bir sonraki kontrol prosesi olan X-ray kontrol kabine girmeden önce, konveyörde yürüyen kısımda kalan çapaklarının temizlenmesi için çapak alma prosesine tabi tutulur.

X-Ray kontrolü

Döküm sonrasında elde edilen ve brüt jant olarak adlandırılan ürünün içerisinde oluşabilecek malzeme süreksizliklerinin incelenmesi için, tüm brüt jantlar X-Ray kontrolüne tabi tutulurlar. X-Ray kontrolü bir güvenlik karakteristiğidir, bu nedenle seri üretimde %100 kontrolü şarttır. X-ray kontrolü genel olarak radyografik ve radyoskopik olarak iki başlık altında incelenebilir. Radyografik kontrolde kontrol sonucu daha sonra yazılan bir film üzerinden değerlendirilebilir, bu nedenle radyografik kontrol seri üretimde %100 kontrol için uygun değildir. Jant üretiminde

radjoskopik kontrol yapılmaktadır. Radyoskopik kontrol ile gerçek zamanlı kontrol gerçekleştirilerek, tezgah çıkışında uygun olmayan jantlar fire bölgesine ayrılır [32]. Fire olarak ayrılan jantın ilerleyen proseslere girmesinden kaynaklanacak üretim kaybı bu şekilde engellenir. Brüt jant üzerinde izin verilen hata tipleri ve büyüklükleri, müşteri şartnamelerinde tanımlıdır. Bu hatalar X-Ray kontrol cihazlarına tanımlanır ve uygun olmayan jant otomatik olarak fireye ayrılır. Bu kontrolden sağlam olarak ayrılan jantlar bir sonraki prosese aktarılırlar.

X-ray kontrol prosesinden sonraki adım, kullanılacak olan malzemeye göre farklılık gösterir. Bu çalışma kapsamında incelenen AlSi11Mg malzemesine ısıtıl işlem uygulanmaz. Bu sebeple dökümden elde edilmiş olan brüt jant, direk talaşlı imalat prosesine verilir. Ancak bu çalışmada incelenen diğer bir malzeme olan AlSi7Mg hem ısıtıl işlemli hem ısıtıl işlemsiz olarak üretilmektedir. Bu nedenle, üretimde kullanılan malzemeye göre X-Ray kontrolünden sonraki adım ya ısıtıl işlem ya da talaşlı imalat olacaktır. Bu çalışmada, bir sonraki süreç olarak ısıtıl işlem anlatılmıştır.

Yapay yaşlandırma ile ısıtıl işlem

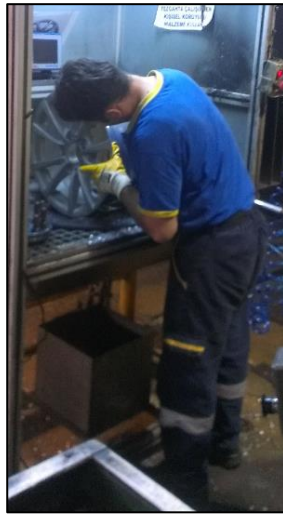
Alçak basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum alaşım jantlar, istenilen mukavemet değerlerine ulaşmak için, T6 ile gösterilen yapay yaşlandırma yöntemi ile ısıtıl işleme tabi tutulurlar. T6 ısıtıl işlemine ait detaylar, 1.2.1.2. bölümü içerisinde ısıtıl işlem başlığı altında anlatılmıştır. T6 ısıtıl işlemi çözeltiye alma, su verme ve yapay yaşlandırma olmak üzere üç aşamadan oluşur [33]. Çözeltiye alma aşamasında, Mg ve Si tanelerinin büyümesi gerçekleşir ve homojen bir katı çözelti elde edilir. Çözeltiye alma, ötektik altı sıcaklık olan 535 – 545 °C aralığında yaklaşık 5 saat süre ile gerçekleşir. Su verme aşamasında, hızlı soğuma ile taneler oluşur. Su verme ile, Mg bileşeninin tanenin içinde kalmaması ve tane sınırlarında oluşması sağlanır, bunun için difüzyon ve zaman gereklidir. Difüzyonu hızlandırmak için yaşlandırma sıcaklığı 150 – 200 °C olan ortamda yapay yaşlandırma gerçekleşir. Burada difüzyona ve ısıtıl işlemin etkin bileşeni olan Mg₂Si çökmesi, yüksek enerjili bölge olan tane sınırlarında gerçekleşerek, dayanım artışı sağlanır [14]. Çözeltiye alma ile su verme fırını arasında 30 s.'den daha fazla zaman olmamalıdır, aksi takdirde istenen mekanik özellikler sağlanamayabilir.



Şekil 1.32 : Isıl işlem tesisi.

Talaşlı imalat

Jant üretiminde kullanılan malzemenin ısıtılmış veya ısıtılmamış olmasına bağlı olarak, döküm veya ısıtılardan sonraki adım talaşlı imalat sürecidir. Alçak basınçlı döküm yöntemi ile elde edilen brüt jantların; istenen lastik kesidi formunun verilmesi, göbek, bijon ve sübap delme işlemleri bu bölümde gerçekleştirilir. Bu çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için; gerekli takım ve tezgahların sağlanması, uygun tezgah işleme programlarının hazırlanması, operasyon talimatlarının ve kontrol planlarının hazırlanması gereklidir. İlk adımda göbek boşaltma yapıldıktan sonra; ilk talaş operasyonu olarak adlandırılan jantın iç çapı, dış çapı, delik ve offset kenarları işlenir. Daha sonra son talaş işlemi diye adlandırılan kapak, stil, damak ve ilk talaş operasyonundan kalan dış çap işlenir. Bijon ve sübap delikleri açılır (Şekil 1.33).



Şekil 1.33 : Talaşlı imalat operasyon istasyonu.

Talaşlı imalat bölümünde ayrıca ön yüzey işlemeli jant üretimi için ön yüzey işleme istasyonu bulunmaktadır. Ön yüzey işlemeli jantların üretimine bu bölümün sonunda yer verilmiştir (Şekil 1.34).



Şekil 1.34 : Ön yüzey işleme operasyon istasyonu.

Balans kontrolü, sızdırmazlık kontrolü ve tesviye prosesi

Talaşlı imalat operasyonları tamamlanan jantlar, balans ve sızdırmazlık kontrollerine tabi tutulurlar. Sızdırmazlık bir güvenlik karakteristiğidir, bu nedenle %100 kontrol edilmesi gerekmektedir. Sızdırmazlık testi için banyoya alınan jantlar, sızdırmazlık testi sonucunda He sızdırma değeri $3.2e^{-4}$ limit değerinin altında olan jantlar sağlam olarak değerlendirilirler. Sızdırmazlık testini uygun olarak tamamlayan jantlar, balans kontrol tezgahına alınırlar. Balans ölçümü, jantın kontrol planında tanımlanan kontrol ağırlığının takılması ile yapılır. Bu ağırlık takıldıktan sonra döndürülen jantın merkezden kaçıklık değeri ve bölgesi ölçülerek tezgaha kayıt edilir. Kontrol planında, kontrol ağırlığı dışında balans için izin verilen maksimum ağırlık da vardır. Bu değer üzerinde olan jantlar fire olarak değerlendirilir. Bu kontroller sonucunda uygun olarak değerlendirilen jantlara tesviye işlemi uygulanır. Tesviye operasyonu kapsamında; jantın üzerinde kalan çapaklar, yüzey bozuklukları ve keskin köşeler giderilir. Bu prosesi uygun olarak tamamlayan jantlar, boyahanede üretime alınırlar.

Boya süreci

Jant üretiminde boyahane sürecinin amacı, estetik görünüm haricinde jantı çevre koşullarının korozyon etkilerinden korumak ve ekipmanın ömrünü özel kaplamalar ile uzatmaktır. Süreç başlıkları sırasıyla yüzey hazırlama, toz boya (astar), sıvı boya, vernik uygulamaları ve final kontrol olarak belirlenmiştir.

Yüzey hazırlama tesisi, boyahane sürecinde en önemli ön hazırlık uygulamasıdır. Banyo sayısı çeşitli yüzey hazırlama tesisleri bulunmasıyla beraber, prensip olarak

hepsinin amacı talaşlı imalat sürecinde jant yüzeyinde oluşan kirliliklerin, boya sürecinde yapışma zafiyetleri ve görsel uygunsuzluklara sebebiyet vermemesi için ortadan kaldırılmasıdır. Yüzey hazırlama tesisi sırasıyla sıcak su banyosu (ön yıkama metal tozu ve çapak giderme), yağ alma banyoları (işleme esnasında kullanılan yağların yüzeyden arındırılması), durulama banyoları (yağ alma sonrası kimyasal ve sökülen yağların durulanması), deoksidasyon banyosu (yüzeyde kısmi aşındırma), DI banyoları (kendisinden sonra gelen banyoların işlevselliğinin artırılması için iletkenlik ayarlama banyoları), pasivasyon banyosu (Ti – Zr kaplama) ve SAM banyosundan (boya yapışma mukavemetinin artırılması için kullanılan özel kaplama) oluşur. Yüzey hazırlama tesisine askılara asılarak gönderilen jantlar, yüzey hazırlama işlemi bittikten sonra boya öncesi kuru yüzey elde edilebilmesi için önce yüzey hazırlama fırınlarında bekletilip, ardından soğutma tüneline girerek yüzey hazırlama tesisi sürecini tamamlar.

Toz boya uygulaması için, yüzey hazırlama sürecini tamamlamış jantlar, kapalı ortamda el değmeden toz boya kabinlerine kadar sevk edilir. Yüzey hazırlama konveyörü ile toz boya konveyörü arasında jantların transferleri robotlar ile sağlanır. Toz boya uygulaması, son teknoloji statik uygulama ile tamamen otomatik koşullarda uygulanır (Şekil 1.35). Uygulamanın amacı, korozyon etkilere karşı daha güçlü olan toz boya ile kalın bir kat uygulamak ve estetik olarak çok daha uygun bir görünüm kazanmasını sağlayan sıvı boya öncesinde parça yüzeyini pürüzsüz hale getirmektir. Parçaya uygulanan toz boyanın kürlenmesi için, önce toz boya fırınında bekletilen jantlar, ardından soğutma tünellerine sevk edilir.



Şekil 1.35 : Toz boya kabini.

Sıvı boya uygulaması için, toz boya sürecini tamamlayan jantlar bir sonraki istasyon olan sıvı boya kabinlerine yine tamamen konveyörler yardımı ile sevk edilir. Uygulamalar, sıvı boya tabancaları ile yapılır. Sıvı boya uygulamasından sonra, boya içindeki çözücülerin uçurulması için, jantlar vernik öncesinde konveyör üzerindeki üniteye dolaştırılırlar. Ardından yine sıvı boya tabancaları ile vernik kabininde son kat olan vernik uygulaması yapılır. Sıvı boya ve vernik uygulamasının ardından jantlar, önce boyanın kurlenmesi için sıvı boya fırınından, ardından soğutma tünellerinden geçirilerek final kontrol hattına sevk edilir.

Ön yüzey işlemeli jant üretimi

Ön yüzey işlemeli jant üretiminde, üretim prosesi sıvı boya uygulamasından sonra değişkenlik gösterir. Ön yüzey işlemeli modeller, sıvı boya uygulamasının ardından vernik uygulanmadan, talaşlı imalat bölümüne ait ön yüzey işleme bölümüne sevk edilir. Burada yüzeyi işlenen jantlar, yüzeyleri özel boneler ile korunarak vernik atılması için tekrar boyahaneye teslim edilir. Vernik öncesi jantlar, sadece vernik uygulamasının yapıldığı ayrı bir tesiste önce yüzey hazırlama banyoları ardından da vernik kabinlerinden geçirilerek, final kontrol hattına sevk edilir. Şekil 1.36’da, ön yüzey işlemeli jant (sol) ve standart yüzeyli jant (sağ) stil yüzeyi farklılıkları gösterilmiştir.



Şekil 1.36 : Standart boyalı jant ön yüzeyi (sağ) ve ön yüzey işlemeli jant (sol).

Final kontrol ve ambalajlama

Müşteri hata katologuna göre %100 görsel kontrole tabi tutulan jantlardan uygun olanlar, müşteri talebine göre ambalajlanarak, sevk edilmek üzere ambara teslim edilirler.

2. MALZEME VE METHOD

2.1 Sonlu Elemanlar Analizleri ve Deney Tasarımında Kullanılan Malzemeler

Bu çalışma kapsamında, alçak basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum alaşımlı jant üretiminde kullanılan alaşımlardan, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları kullanılmıştır. Bu ürün, ısıtılmalı AlSi7Mg alaşımını da ayrı bir malzeme olarak değerlendirdiğimizde, üç farklı malzeme ile (AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg) üretilerek mekanik ve metalurjik özellikleri kıyaslanmıştır. Aynı tasarıma sahip olan ürüne, farklı malzemeler kullanıldığı varsayılarak sonlu hacimler yöntemi ile döküm simülasyonu, sonlu elemanlar yöntemi ile ISO 7141 13° darbe ve hızlandırılmış ömür test simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.1 : Jant üzerinde çekme testi referans bölgeleri.

1 numaralı bölge feder, 2 numaralı bölge iç flanş ve 3 numaralı bölge dış flanş olarak adlandırılmaktadır. Farklı malzemeler için referans bölgelerine ait beklentiler çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1: AlSi7Mg – AlSi11Mg alaşımları ile üretilen jantın çekme testi referans bölgelerinden alınan çekme numuneleri gereklilikleri [18].

Alaşım	Bölge	Isıl işlem (Var / Yok)	Akma Gerilmesi ([N/mm ²])	Çekme Gerilmesi ([N/mm ²])	Kopma Uzaması [%E]	Sertlik (Brinell Sertlik Değeri - HBW 5/250)
AlSi7Mg T6	Feder (1)	Var (T6)	min. 150	min. 220	min. %4,5	min. 75
AlSi7Mg		Yok	min. 80	min. 160	min. %4,5	min. 60
AlSi11Mg		Yok	min. 80	min. 160	min. %4,5	min. 55
AlSi7Mg T6	İç flanş (2)	Var (T6)	min. 150	min. 220	min. %7	min. 75
AlSi7Mg		Yok	min. 80	min. 160	min. %7	min. 60
AlSi11Mg		Yok	min. 80	min. 160	min. %7	min. 55
AlSi7Mg T6	Dış flanş (3)	Var (T6)	min. 150	min. 220	min. %7	min. 75
AlSi7Mg		Yok	min. 80	min. 160	min. %7	min. 60
AlSi11Mg		Yok	min. 80	min. 160	min. %7	min. 55

2.2 Tasarım Doğrulama ve Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışmaları

Jantlara ait tasarım doğrulama çalışmaları, kalıp tasarımı doğrulama ve ürün tasarımı doğrulama başlıkları altında incelenebilir. Bir jant modeline ait ürün üç boyutlu modellemesi tamamlandıktan sonra, kalıp tasarımı tamamlanır. Henüz kalıp üretilmeden önce, kalıp içerisinde alüminyum alaşım akışını incelemek üzere, sonlu hacimler analiz yöntemi ile döküm simülasyonu yapılır. Döküm simülasyon çalışmalarının temel amacı, yapılan kalıp tasarımını doğrulamaktır. Döküm simülasyon çalışmaları paralelinde, ürüne ait ISO 7141 13° darbe ve hızlandırılmış ömür sonlu elemanlar analiz çalışmaları yapılır. ISO 7141 13° darbe ve hızlandırılmış ömür testleri, jantlara ait doğrulama testleri arasından en önemli iki mekanik test olup, tasarım risklerinin ürün tasarım aşamasında belirlenerek gerekli değişikliklerin uygulanması gerekir. Bu nedenle, mekanik test simülasyonları, orjinal ekipman üreticileri için ön şart niteliğindedir.

2.2.1 Kalıp tasarımı doğrulama ve döküm simülasyonu

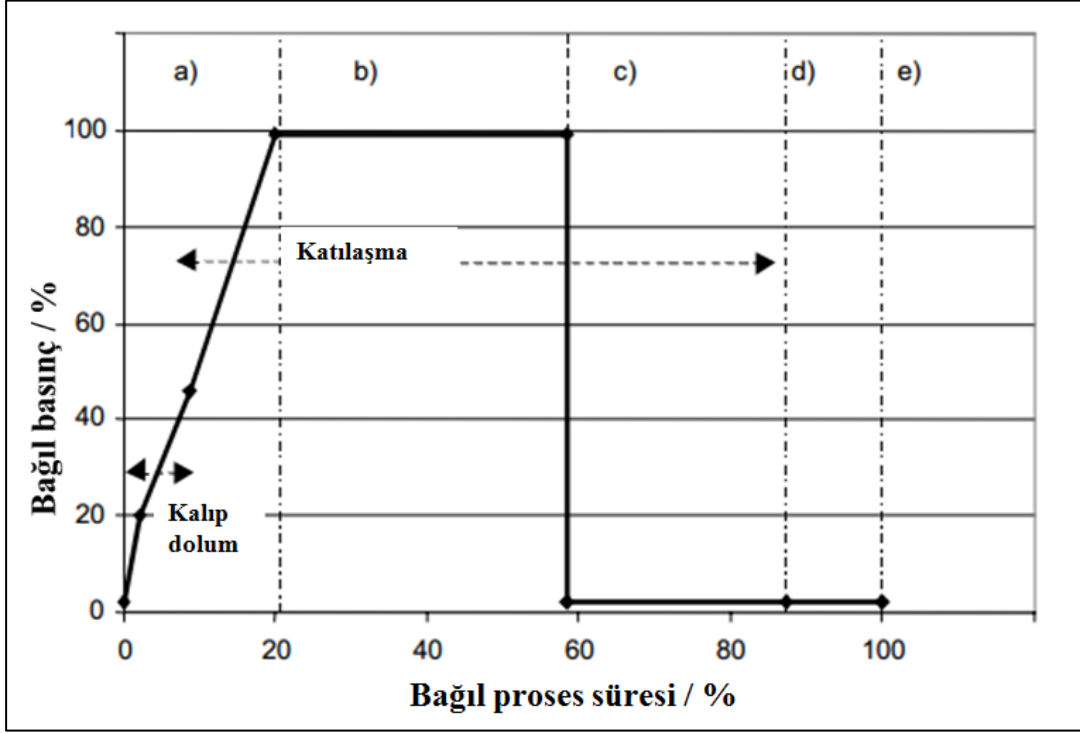
Kalıp tasarımı doğrulama çalışmaları kapsamında yapılan döküm simülasyonlarında Magma Giessereitechnologie GmbH firması tarafından ortaya çıkarılan Magma

sonlu hacimler yazılımının 5.3 versiyonu kullanılmıştır. Magma, döküm proses simülasyonu yazılımı konusunda dünya çapında en yaygın olarak kullanılan simülasyon programıdır. Magma programı kullanılarak, döküme ait dolum, katılaşma ve soğumadan oluşan tüm çevrimin simülasyonunu gerçekleştirmek ve döküm hatalarını %90 doğruluk ile tahmin etmek mümkündür [35]. Magma programı kullanılarak, jant için üç farklı analiz yapılabilir. Bu simülasyonlardan birincisi dolum simülasyonudur. Dolum simülasyonu sonucunda; oksit oluşum miktarı, oksit oluşum lokasyonu, dolum süresi, türbülans oluşumu, soğuk birleşme hatası kontrolü, kalıp üzerindeki sıcaklıklar ve dolum hızları gözlemlenebilir. Katılaşma simülasyonu ile jant üzerinde hotspot bölgeleri, kalıp üzerindeki sıcaklıklar, toplam porozite kontrolü ve katılaşma hızı görülebilir. Artık gerilme analizi ile jant üzerinde soğuk kırılma ve sıcak yırtılma oluşumu konuları incelenir. Soğuk kırılma, jant soğurken, kesit değişiminin ani olduğu bölgelerde oluşur. Sıcak yırtılma ise beslemenin yetersiz olması durumunda, sıvı hapsolan alanlarda oluşan yırtıktır [36]. Ancak bu analiz çok kritik görülen durumlarda veya müşteri talebi doğrultusunda yapılmaktadır.

Magma programı ile döküm simülasyonunun girdilerinden en önemlisi, janta ait üç boyutlu modeldir. Üç boyutlu model hazırlandıktan sonra, talaşlı imalat prosesi ile oluşturulan deliklerin kaldırılması, çıkma açılarının ve çekme boşluğu, distorsiyon gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Bu faktörler göz önünde bulundurularak, alt ve üst çekirdek, yan blok, beslemeler ve yolluk tasarımı yapılır. Model oluşturulduktan sonra; simülasyon için gerekli olan eriyik metal, kalıp, çekirdek ve beslemelerin malzeme özellikleri, metal kalıp ısı geçiş katsayısı, döküm sıcaklığı gibi parametreler girilerek simülasyon başlatılır. Birbiri ile etkileşim halinde bulunan tüm malzemelerin ısı geçiş katsayıları; simülasyon başlamadan önce girilmelidir. Malzemelerin alaşım oranları, sıvı katı geçiş sıcaklıkları, kullanılan soğutmaların çalışma süreleri önemli girdiler arasındadır [37].

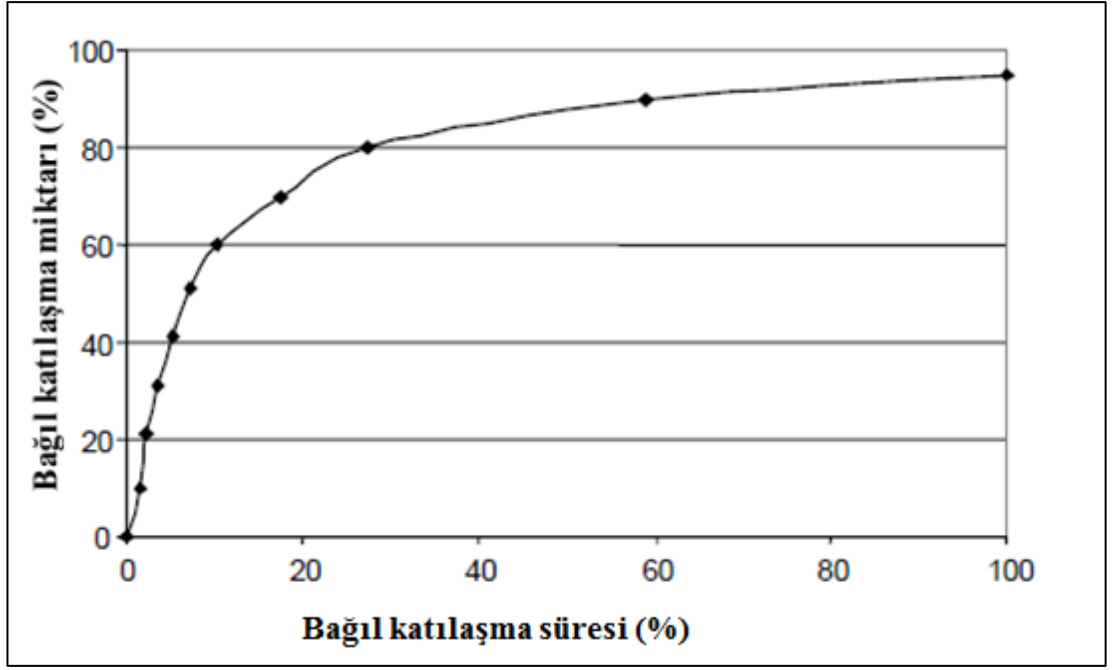
Kalıp, basınç yardımı ile altında bulunan tezgahıtan aldığı eriyik metal ile doldurulur. Dolum, tezgah ile kalıp arasına konumlandırılmış olan yükseltici tüp ile gerçekleştirilir. Dolum, jantın göbeğinden başlar, daha sonra stil yüzeyi, yani federler dolar, en son ise lastik kesidi dolumu tamamlanır. Kalıp içerisinde çalışan soğutmalar, dolum sırası ve sonrasında termokupl yardımı ile kontrollü olarak çalıştırılırlar. Dolum tamamlandıktan sonra beslemenin devam edebilmesi için basınç bir süre daha verilir. Kalıp dolumu, yüksek oranda jantın geometrisi ile orantılıdır.

Şekil 2.2’de, bu çalışmada incelenen ürün büyüklüğünü temsil eden jantlar için basınç grafiği, proses süresi ile orantılı olarak verilmiştir.



Şekil 2.2 : 7 J x 16'' jant için bağıl proses süresi ve basınç grafiği [36].

Proses süresi toplamda dört aşamada değerlendirilebilir. Bu aşamalar kalıp dolumu, basınç uygulama süresi, katılaşma süresi ve jantın kalıptan alınması aşamalarıdır. Kalıp dolumu, yaklaşık 35 – 40 s. aralığında gerçekleşir. Kalıp dolumu sonrası katılaşma, basınç uygulama süresi boyunca devam eder. Eş fazlı sıcaklığın altına; yani alüminyum dendritlerinin oluştuğu sıcaklığa inildiği anda, besleme devam etmez. Bu sürede soğutma devam eder, böylece jantın kalıp içerisinden alınırken çarpılma ve kalıbın fazla ısınma riskleri azaltılır. Şekil 2.3’te, bu çalışmada incelenen ürün büyüklüğünü temsil eden jantlar için, bağıl katılaşma miktarının zamana göre değişimi verilmiştir.



Şekil 2.3 : 7 J x 16” jant için bağıl katılaşma miktarı ve katılaşma süresi grafiği [36].

Bu çalışma kapsamında; ürüne ait üç boyutlu model tasarımı tamamlandıktan sonra, kalıp tasarımı hazırlanmıştır. Bu kalıp tasarımı içerisinde AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları dolum ve katılaşma simülasyonları yapılmış ve katılaşma süresi farklılıkları gösterilmiştir. Ek olarak, dolumda türbülans oluşumu gösterilmiş, türbülans için kritik kalıp dolum hızı konusuna değinilmiştir. Son olarak, her iki alaşım ile yapılan dolumda, meydana gelen toplam porozite oranı farkı ve buna bağlı olarak kalıp tasarımında yapılması gereken soğutma tasarımı farklılıklarına değinilmiştir.

2.2.2 Ürün tasarımı doğrulama ve mekanik test simülasyonları

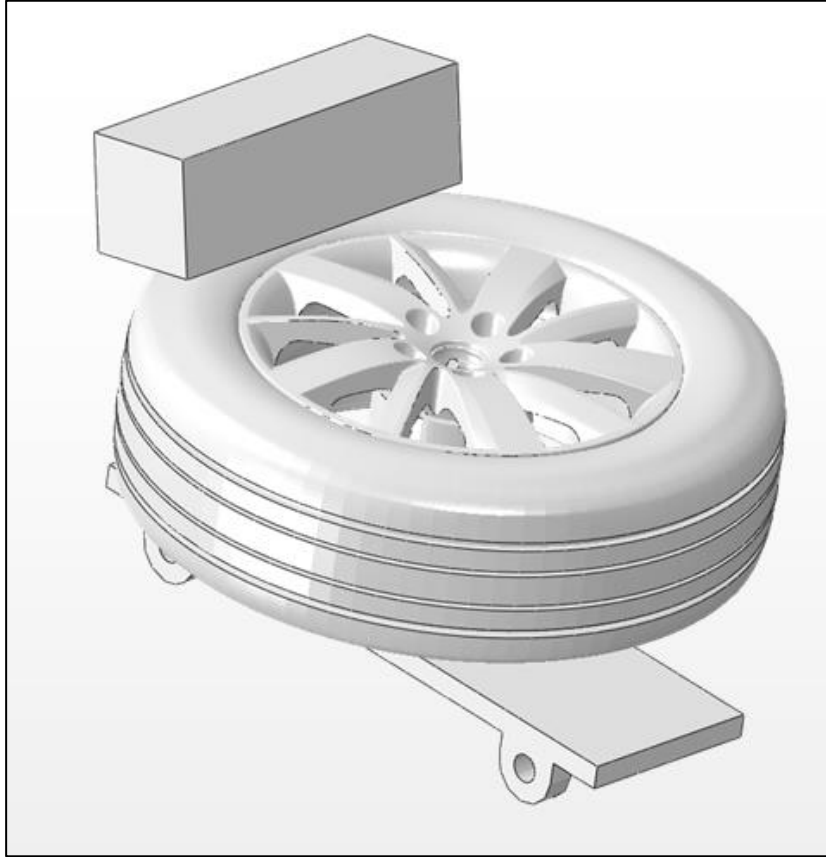
Jantlara ait doğrulama testleri kapsamında, mekanik testler olarak adlandırılan testlerden en kritik iki test, ISO 7141 13° darbe testi ve hızlandırılmış ömür testidir. Bu testlerin nasıl gerçekleştirildiği ile ilgili detaylı bilgiler bölüm 2.3.1 ISO 7141 13° darbe testi ve bölüm 2.3.2 hızlandırılmış ömür testi kısımlarında anlatılmıştır.

2.2.2.1. ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu

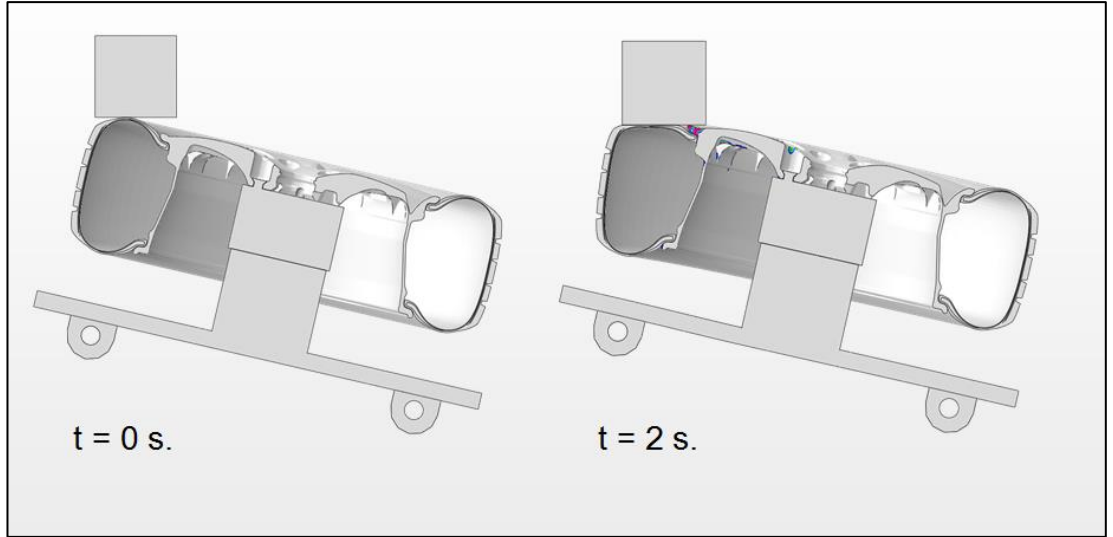
ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu, detayları bölüm 2.3.1 bölümünde anlatılan ISO 7141 13° darbe testinin birebir simülasyondur. Simülasyon, ABAQUS/Explicit 6.9. versiyonu kullanılarak dinamik olarak gerçekleştirilir. Abaqus/Explicit,

kompleks sınır koşullarının olduğu değişken yüklü sistemlerin çözülmesi için kullanılan özel amaçlı bir sonlu elemanlar analiz programıdır [38].

ISO 7141 13° darbe testi, lastik montajı yapılmış olan ve darbe teztı tezgahına 13° aı ile bağlanmış olan jantın; kritik olarak tanımlanmış bölgeleri üzerine, jantın spesifikasyonunda belirtilen yükün düşürülmesi ile gerçekleştirilen bir testtir. ABAQUS/Explicit 6.9 sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak, lastik montajı yapılmış ve tezgaha 13° aı ile bağlanmış modelin üzerine, ilgili test yükünün sonlu elemanlar analizi yöntemi ile düşürülmesi ile gerçekleştirilir. Gerçekte yükün düşürüldüğü yükseklik ile analizde kullanılan yükseklik farklıdır, çözüm süresini kısaltmak için janta ilk hız tanımlanarak analiz gerçekleştirilmektedir. ISO 7141 13° darbe testi simülasyonunda kullanılan elemanlar ve montajı şekil 2.4'te, darbe simülasyonu öncesi ve sonrası görünümü ise şekil 2.5'te verilmiştir.

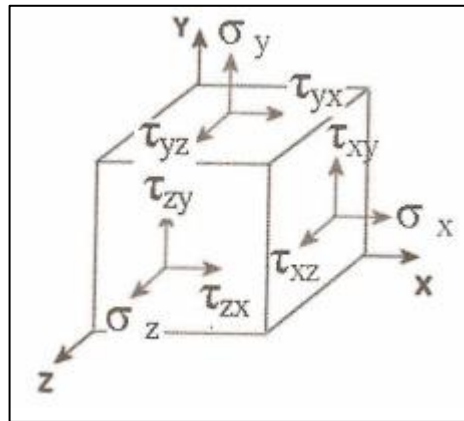


şekil 2.4 : ISO 7141 13° darbe testi simülasyonunda kullanılan elemanlar.



Şekil 2.5 : ISO 7141 13° darbe testi simülasyonunu öncesi ve sonrası.

ISO 7141 13° darbe testi; jant üzerine kaza anında ve ani olarak, jant üzerine gelebilecek olan yüklemeyi modellemek için yapılan bir testtir. Test sonucu, çatlak var veya çatlak yok şeklinde değerlendirilir. Test sonucunda, penetrant ile tespit edilen çatlak oluşmaz ve 1 dakika içerisinde lastik havasında ani bir iniş gözlemlenmez ise, test başarı ile tamamlanmış anlamına gelir [39]. ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonucunda “von Mises” ve “maksimum asal gerilme” değerleri kontrol edilmektedir. Bu konunun daha iyi anlaşılabilmesi için, von Mises ve maksimum asal gerilme teoremleri aşağıda anlatılmıştır. Von Mises gerilme değeri, jant üzerine üç boyutlu olarak etkiyen tüm gerilme hallerinin ölçümüdür. Bu gerilme değerleri, birim eleman üzerinde şekil 2.6’da gösterilmiştir.

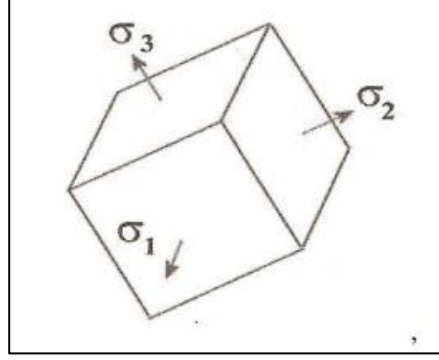


Şekil 2.6 : Birim eleman üzerine altı eksenle etkiyen gerilmeler [40].

Von Mises eşdeğer gerilme değeri, altı eksenle gerilme değerleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir [40]:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0.5 \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.1)$$

Von Mises gerilme değeri, asal gerilmeler cinsinden birim eleman üzerinde şekil 2.7’de gösterilmiştir [40].

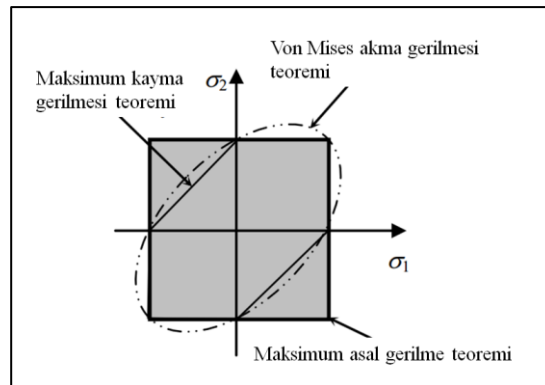


Şekil 2.7 : Birim eleman üzerine etkiyen asal gerilmeler [40].

Von Mises eşdeğer gerilme değeri, asal gerilmeler cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir [40]:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0.5 \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad (2.2)$$

Maksimum asal gerilme teoremine göre, kırılkan bir malzeme, maksimum asal gerilme değeri o malzeme için limit değerine ulaştığında çatlar. Bu kritik değer, eş eksenli çekme testinde ölçülen çekme gerilme değeridir. Bu teorem basittir, ancak sadece kırılkan malzemeler için geçerlidir [41]. Şekil 2.8’de, maksimum asal gerilme ve von Mises gerilme teoremleri güvenlik aralığı gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : Maksimum asal gerilme teoremi hata bölgesi [41].

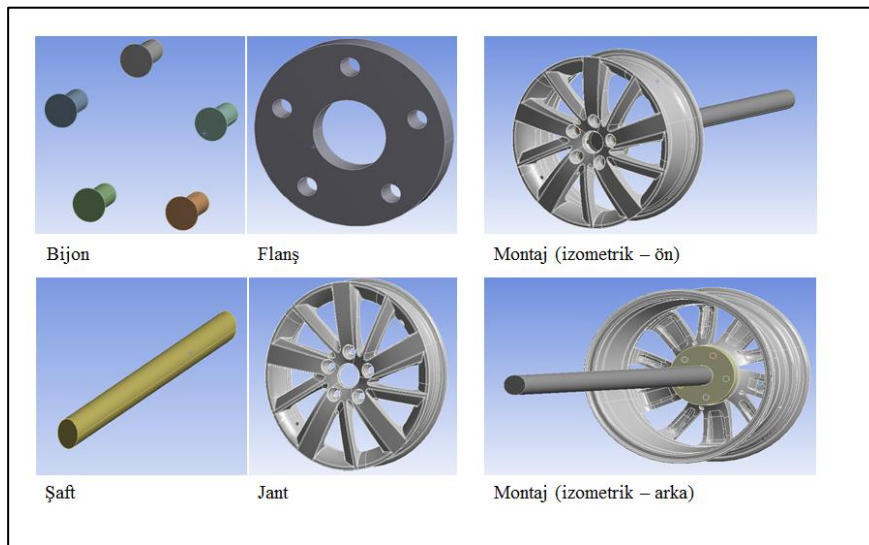
ISO 7141 13° darbe testi simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi, o malzeme için daha önceden belirlenmiş olan ve jantın farklı bölgelerinde değişkenlik gösteren limit değerleri ile yapılmaktadır. Bu doğrultuda, ortaya çıkan maksimum asal gerilme değerleri, jant üzerinde test sonucunda kalıcı olarak oluşan gerilme değerleri olup, von Mises gerilme değeri ise, yönden bağımsız, jantın test sırasında maruz kaldığı toplam gerilme değerinin büyüklüğünü ifade eder. Literatürde, kırılkan malzemeler için simülasyon sonuçlarının kontrolünde, maksimum asal gerilme değerlerinin kontrol edilmesi gerektiği, sünek malzemeler içinse von Mises gerilme değerlerinin sonuç değerlendirmede kullanıldığı belirtilmektedir [41]. ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonuç değerlendirme için, kırılkan malzemeler için geçerli olan maksimum asal gerilme teoremi sonucu elde edilen değerler ile değerlendirme yapılabilir, ancak gerilmenin nerede oluştuğunun ve tüm analiz boyunca jant üzerine etkiyen gerilme miktarının belirlenmesi için von Mises gerilme değeri de hesaplanarak kontrol edilmektedir. Bu simülasyon çalışması ile, yapılan simülasyon sonucunda elde edilen von Mises ve max. Principle gerilme değerleri üzerinden, test sonucunda jant üzerinde çatlak oluşup oluşmayacağı konusunda risk değerlendirilmesi yapılmaktadır. Jant üzerindeki bölgelerin, ISO 7141 13° darbe testi sonrası çatlak oluşumu kritikliği anlamında farklı dinamikler taşıdığı, jant modeli için ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonrası tek bir limit değerinin olmadığı, limitlerin bölgeler bazında ayrı ayrı belirlendiği belirtilmelidir. Bu simülasyon sonuçlarını değerlendirme limitleri, çok sayıda modele ait test sonucu ile analiz sonucu karşılaştırılarak, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımları ile üretilmiş jantlar için belirlenmiştir. AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımlarına ait malzeme verileri, yine yapılan deneysel çalışmalar sonucunda yapılan bir ortalama yaklaşımı ile tanımlanmıştır. Tüm ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu limitleri, alaşımın o bölgedeki gerçek kopma değerinin altında olmakla birlikte, bazı bölgelerde emniyet nedeniyle daha düşük limitler kullanılma ihtiyacı duyulmuştur.

2.2.2.2. Hızlandırılmış ömür testi simülasyonu

Hızlandırılmış ömür testi simülasyonu, detayları bölüm 2.3.2’de anlatılacak olan hızlandırılmış ömür testinin sonucu hakkında tasarım aşamasında ön bilgi vermesi amacı ile tasarlanmış, sonlu elemanlar statik analiz çalışmasıdır. Bu nedenle ISO 7141 13° darbe testi simülasyonunda olduğu gibi, simülasyon testin uygulandığı

şekilde yapılmaz. Simülasyon Ansys Workbench 14.5 programının statik analiz modülü kullanılarak gerçekleştirilir. Ansys Workbench yazılımı, fiziğin farklı disiplinlerinin bir arada kullanılarak birbirileri ile ilişkilerinin incelenebildiği bir sonlu elemanlar analiz programıdır. Ansys Workbench yazılımının farklı modülleri ile statik yük altında deformasyon ve gerilme analizi, modal analiz, elektromanyetik analiz, ısı transferi analizleri gibi farklı analizlerin gerçekleştirilmesi mümkündür [42]. Hızlandırılmış ömür testi, jantın şartnamesinde belirtilen moment değerinin, dönen janta sürekli uygulanarak çatlak başlangıcının tespit edilmesine dayanan bir ömür testidir [43]. Müşteri şartnamelerinde, uygulanan moment değerine karşılık jantın çatlaksız olarak tamamlaması gereken tur sayısı, yani ömür belirtilmiştir. Ana ekipman üreticisi, bu yaklaşım ile jantın toplam ömür beklentisini karşıladığını garanti etmektedir.

Hızlandırılmış ömür testinde uygulanan moment, janta 1 m. uzunluğunda bir mil üzerinden uygulanan kuvvet ile iletilir. Hızlandırılmış ömür testinin birebir analizinin gerçekleştirilmesi, gerekli alt yapı olmadığı için sağlanamamaktadır. Bu sebeple, jant tasarım aşamasında iken hızlandırılmış ömür testinde uygulanan moment değeri, simülasyon ortamında janta 1 m. boyunda mil üzerinden 360° boyunca statik olarak uygulanır. Mil, bijon ve flanş montajı test sırasında olduğu gibi sonlu elemanlar analiz modeli üzerinde de uygulanır (Şekil 2.9). Bu yükün jant üzerinde meydana getirdiği maksimum gerilme değeri kaydedilerek, jantın müşteri beklentisi olan ömrü çatlaksız olarak tamamlayıp tamamlayamayacağı hakkında bir yaklaşımda bulunulur.



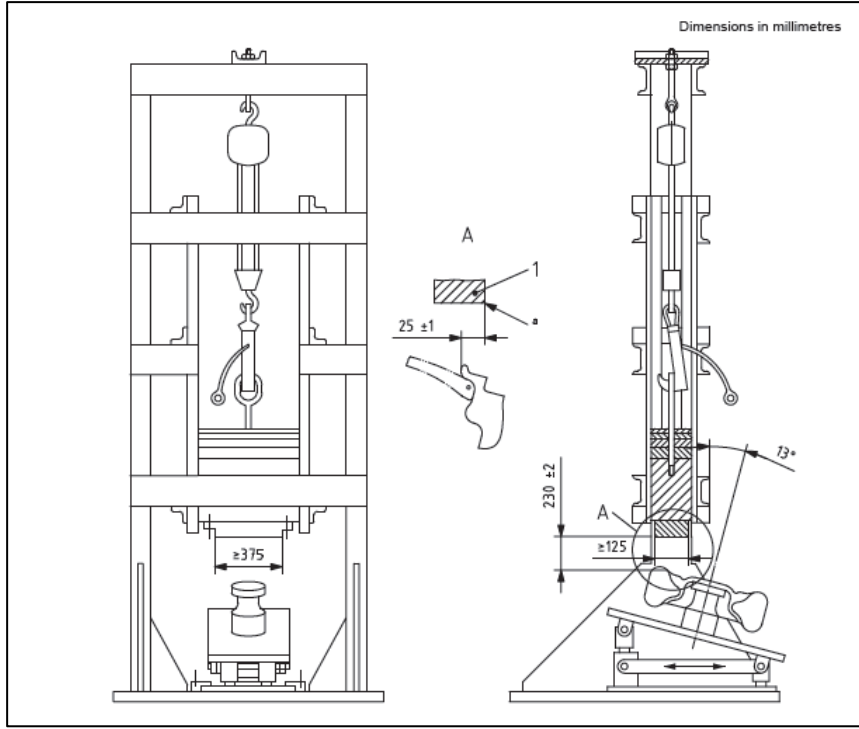
Şekil 2.9 : Hızlandırılmış ömür testi simülasyonunda kullanılan elemanlar bijon, şaft, jant ve flanş ile simülasyon modelinin montajı.

Analiz sonrası von Mises ortalama gerilme değerine bakılır. Hızlandırılmış ömür testi, sürekli yüklemenin olduğu ve yükün çekme-kayma olarak uygulandığı bir testtir. Özellikle bu tip yüklemelerin olduğu testlere ait simülasyonlarda, von Mises gerilme değerleri kontrol edilerek, hızlandırılmış ömür testi sonucunda çatlak oluşumu hakkında bir yaklaşımda bulunulmaya çalışılır [43]. Hızlandırılmış ömür testi simülasyon sonuçları, jantın stil adı verilen ön yüzeyi ve arka yüzeyinde oluşan maksimum von Mises gerilme değerleri kontrol edilerek değerlendirilir. Bu değerler için belirtilen limit değerleri, firma içerisinde kullanılan bir hesaplama yöntemi ile belirlenmektedir. ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu için yapıldığı gibi, hızlandırılmış ömür testi simülasyonu için de yapılan test ve simülasyon karşılaştırma çalışmaları ile stil yüzeyi adı verilen ön ve arka yüzeyler için limit von Mises gerilme değerleri belirlenmiştir. Bu hesaplama yönteminde, moment değerinden bağımsız olarak, müşteri beklentisi olan ömre göre güvenli olan gerilme değeri belirlenir ve analiz sonucu ile kıyaslanır. Analiz sonucunda oluşan von Mises gerilme değeri, bu limit değerinin üzerinde ise, tasarım çalışmaları ile bu değer güvenli aralığa çekilmesi için çalışmalar gerçekleştirilir.

2.3 Deney Tasarımı ve Ürün Doğrulama Testleri

2.3.1 ISO 7141 13° darbe testi

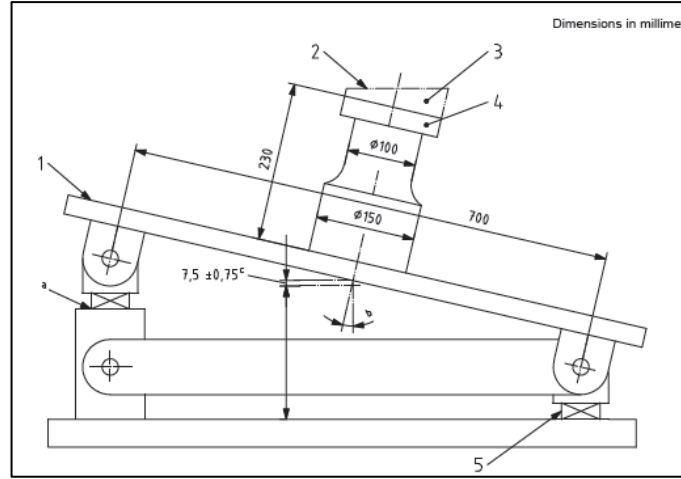
Bu testin amacı, yolcu araçlarında kullanılan alüminyum alaşımlı janta yanal olarak gelebilecek darbe yüklerine karşılık jantın dayanımının analiz edilmesi ve kalite kontrolünün yapılmasıdır. Test yapılırken, jant uygun lastik montajı yapılarak test sırasında kullanılır. Testte kullanılan jantların, her hangi bir testte veya bir araç montajında tekrar kullanımları uygun değildir. Test ekipmanı, lastik takılı jantın flanşına serbest düşme hareketi yapacak şekilde yataklanmış ve değişebilen ağırlık sisteminden oluşmuştur. Jant, dikey eksenle $130^{\circ} \pm 10^{\circ}$ açı yapacak şekilde ve en yüksek noktası üzerine düşey ağırlık gelecek şekilde bağlanmalıdır. Darbe plakasının yüzü, en az 150 mm. genişliğinde ve 500 mm. uzunluğunda ve köşeleri 6 mm. yuvarlatılmış olmalıdır. Jant bağlantı yuvası, 700 mm. uzunluğunda ve 200 mm. x 25 mm. kesitindeki çelik bir levhanın üst orta noktasına bağlanır. Levhanın uç kısımları, sıkıştırılan tip kauçuk rakorlar ile desteklenmelidir. Şekil 2.10'da test ekipmanı şematik olarak gösterilmiştir [39].



Şekil 2.10 : ISO 7141 13° darbe testi ekipmanı şematik görünümü [39].

Jant bağlantı yuvası üzerine konulacak kalibrasyon adaptörüne 1000 ± 20 kg'lık düşey kalibrasyon yükü uygulanır. Çelik levhanın ortasındaki düşey çökmenin 7.50 ± 0.75 mm. olarak ölçülmesi gerekir. Kalibrasyon işlemi yılda bir kez tekrarlanmalıdır.

Teste tabi tutulacak janta, uygun olarak seçilen en küçük nominal kesitte ve boyuttaki radyal tabanlı bir lastik takılır. Lastik şişirme basıncı, bu testin yapılacağı ana üretici tarafından karar verilmesi gereken bir değerdir, ancak böyle bir değer yok ise bu standarda göre 200 kPa (2.04 kg/cm^2) olmalıdır. Lastik takılmış jant, göbek adaptörü üzerine iyi durumdaki bijonlar (somon veya civatalar) kullanılarak monte edilir ve uygun tork değeri ile elle sıkılır. Test, değişik göbek aplikasyonlarında tekrarlanmalıdır. Ağırlık sisteminin darbe plakasından olan düşme yüksekliği jant flanşının en yüksek noktasından 230 ± 2 mm. olmalıdır. Ağırlık sistemi, lastiğin üstüne gelecek ve jant flanşı ile 25 ± 1 mm. mesafede olacak şekilde ayarlanmalıdır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : ISO 7141 13° darbe testi tezgahının şematik görünümü [39].

Düşen kısmın ağırlığı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$D = 0.6 \times W + 180 \text{ kg} \quad (2.3)$$

Bu formül uygulanırken, D (kg); düşen kısmın ağırlığı, W (kg) ise araç veya jant üreticileri tarafından saptanan maksimum statik jant yükü olarak alınır.

Test sonucu performans değerlendirme kriterleri müşterilere göre farklılık göstermez, ISO 7141 standardında belirtildiği şekildedir. Buna göre jant göbek bölgesinde penetrant ile tespit edilen bir kırılma olmamalıdır. Jant göbeği ve federler ile flanş arasında kopma olmamalıdır. Lastik hava basıncında 1 dk içinde ani düşme olmamalıdır. Jantta oluşacak şekil bozukluğu veya ağırlık plakasının, jantta çarpma yerinde yapacağı deformasyon kabul edilebilir [39].

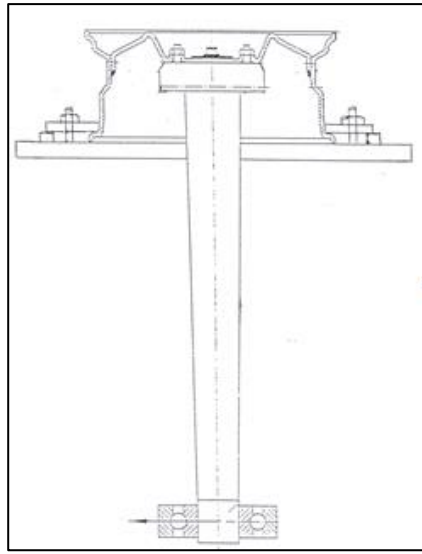
Test, Makra marka ISO 7141 13° darbe testi cihazında uygulanmıştır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 : ISO 7141 13° darbe testi cihazı.

2.3.2 Hızlandırılmış ömür testi

Hızlandırılmış ömür testinde, viraj boyunca tekerlek üzerine etkiyen kuvvetler simule edilerek jant üzerindeki etkileri incelenir. Sabit bir hızda dönen jantın göbek bağlantı yüzeyine sabit bir eğilme momenti uygulanır. Teste tabi tutulacak jant, uygun göbek flanş adaptörü seçilerek test makinasına emniyetli bir şekilde bağlanır. Yükleme kolu ile adaptörü, jantın bağlama yüzeyine iyi durumdaki civata veya somunla tutturulur. Civata ve somunlar yağlı olmamalıdır ve uygun tork değeri ile sıkılmalıdır [43]. Şekil 2.13'te hızlandırılmış ömür test makinası şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : Hızlandırılmış ömür testi test makinası şematik görünümü [43].

Test süresince minimum yükleme devri sonuna kadar civata veya somunlar tekrar sıkılarak kontrol edilir. Uygulanan eğilme momenti değerinin test süresince en fazla % ± 5 aralığında değişimine izin verilmelidir. Eğilme momenti sadece jant dönerken uygulanmalıdır. Test süresince janta uygulanacak eğilme momenti değeri, jantın dönme eksenine paralel ve/veya dikey olan kuvvetin konumunun (moment kolu) veya şiddetinin ayarlanması ile değiştirilir [43].

Eğilme momenti değeri aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$M = W \times S_m \times (q \times r + e) \quad (2.4)$$

Bu formül uygulanırken, M (Nm) eğilme momenti değeri, W (N) jant veya araç üreticileri tarafından belirlenen maksimum statik teker yükü, S_m test faktörü, q lastikle yol arasındaki sürtünme katsayısı ve r (m), statik yük uygulanmış lastik

yarıçapı değeri, e (m) ise jantın offset mesafesidir. Araç üreticilerinin belirlediği janta uygun en büyük lastik boyutu ölçüleri alınır. S_m test faktörü ve q sürtünme katsayısı, farklı müşteriler için ayrı bir tablo ile belirtilmektedir [43].

Test, INMESS marka hızlandırılmış ömür testi cihazında uygulanmıştır (Şekil 2.14).

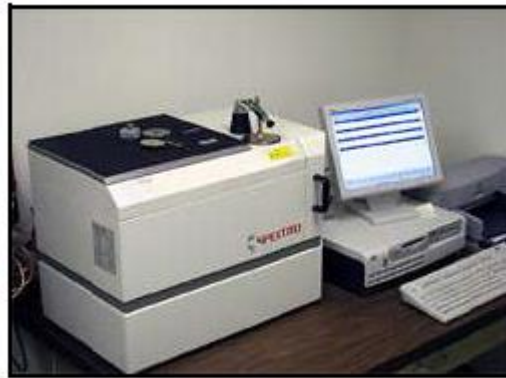


Şekil 2.14 : Hızlandırılmış ömür testi cihazı.

Test sonucunda, jantın müşteri şartnamesine göre belirtilen moment değerleri ile yine şartnamede belirtilen o moment değeri için tamamlanması gereken minimum tur sayısını sağlaması gerekir. Ayrıca, o moment değerleri için elde edilen tur sayıları ile oluşturulan Wöhler eğrisinin eğimi olan k değerinin, 5'ten büyük olması gerekir [43].

2.3.3 Kimyasal analiz

Kimyasal analiz, son ürün içerisindeki alaşım elementleri ve oranlarının tayini için gereklidir. Jant üzerinde yapılan kimyasal analiz, optik emisyon spektrometresi kullanılarak yapılır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 : Optik emisyon spektrometresi [44].

Optik emisyon spektrometresi kullanılarak yapılan kimyasal analiz, alevlerin ısıtıldığında her elementin karakteristik spektral çizgiler yayması prensibine dayanır [44]. Yayılan bu spektral çizgiler görünür olduğunda, renkleri görürüz (Şekil 2.16).

Element	Dalga Boyu [nm]					Alev Rengi
	800	700	600	500	400	
Lityum						kırmızı
Sodyum						sarı
Potasyum						eflatun
Kalsiyum						kırmızı
Stronsyum						kırmızı
Baryum						yeşil

Enerji, Frekans ve Dalga Sayısında Artış

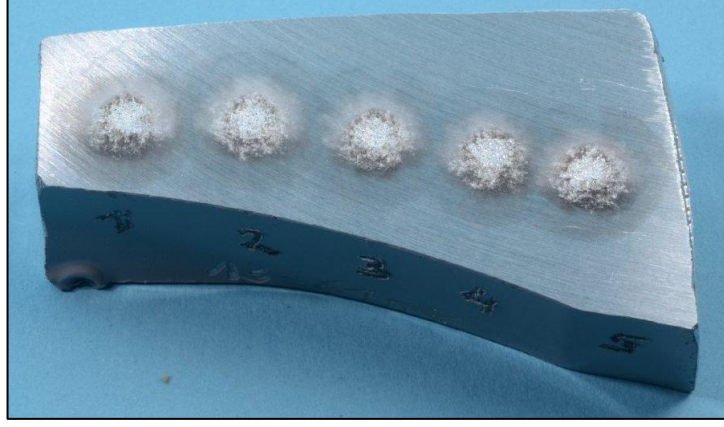
Şekil 2.16 : Elemente bağlı olarak elde edilen alev renkleri [44].

Yayılan spektral çizgiler, çoğunlukla mor ötesi (UV) aralığında bulunurlar. Yayılan bu spektral çizgilerin anlaşılabilmesi için birbirinden ayırt edilebilmeleri gereklidir. Bu amaçla prizma yerine ızgara reflektör kullanılır. Çizgilerin şiddeti, yüklenme iştirilmiş araç algılayıcı veya çipleri ile (charge coupled device) ölçülür. Ölçülen bu değerler, elementlerin ağırlık yüzdesine dönüştürülerek ifade edilir. Tüm elementleri buharlaştırmak ve spektral çizgilerin tamamını elde edebilmek için, uyarma iki elektrot arasında akım darbesi (spark) veya elektrik boşalımı (ark) ile sağlanır. Elektrotlar metal veya grafitten meydana gelir. Test edilen numune metal, elektrotlardan biri görevini görür. İletken olmayan örnekler, test öncesinde grafit tozu ile taşlanır ve alt elektrota yerleştirilir [44]. Alt elektrot, çanak şeklindedir (Şekil 2.17).



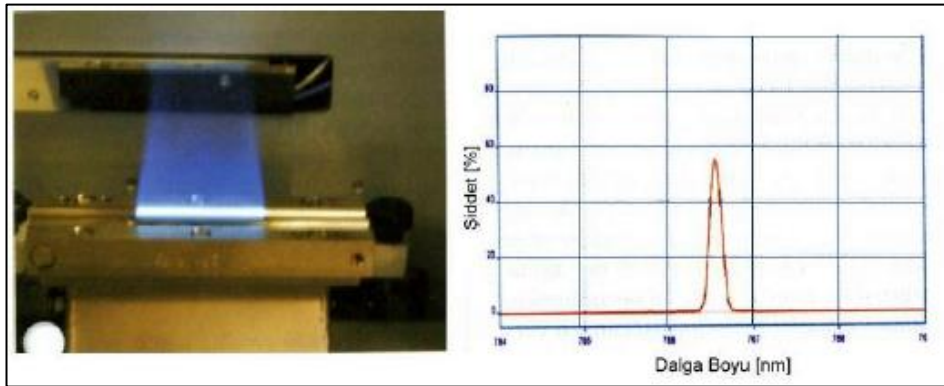
Şekil 2.17 : Ark/spark OES şematik görünümü [44].

Optik emisyon spektrometresi ile bir örneğin test edilmesi yakma olarak da ifade edilir. Bunun nedeni, ark/spark prosesi buharlaştırma sırasında, kullanılan örneğin bir kısmının harcanması, örnek üzerinde koyu renkli ve pürüzlü bir noktanın oluşmasıdır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 : Optik emisyon spektrometresi ile test edilen bir yüzey örneği.

Günümüz teknolojisi ile, bir çok kimyasal optik spektrometre uygulaması ark/spark kaynağı yerine plazma ve lazer kaynağı ile yapılmaktadır. Metal endüstrisinde ark/spark spektrometrelerinin kullanımı yaygındır. Bu yöntemin avantajları, test süresinin kısa, sonuçların kesin ve doğruluk oranının yüksek olması şeklinde sıralanabilir. Test edilen örneğin spektrumu ile, spektrometrenin bilgisayarında yüklü olan standart karşılaştırılır. Böylece, alaşım içerisinde bulunan elementler nitel olarak belirlenir (Şekil 2.19). Spektral çizgilerin ölçülen şiddet değerleri, elementlerin miktarları ile doğru orantılı olduğu için numunenin kimyasal kompozisyonu bu ölçüm ile nicel olarak da ifade edilebilir. Bu yöntem ile demir, çelik, alüminyum, nikel, bakır, çinko, kurşun içindeki alaşım elementleri tayin edilebilir [44].



Şekil 2.19 : Alev resmi (sağ) ve alaşım içindeki Potasyum elementi dalga boyu [44].

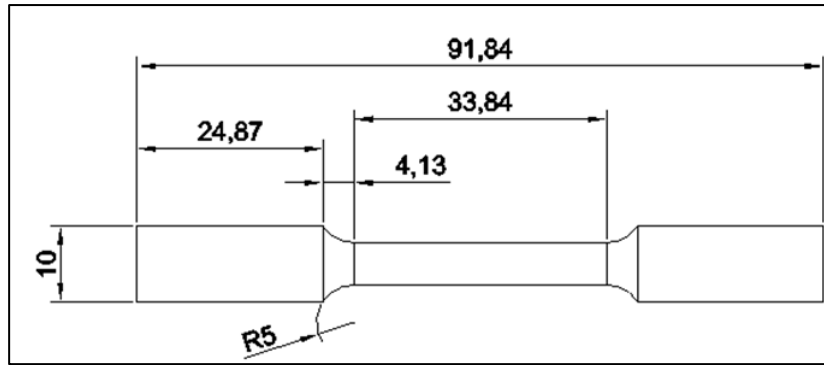
Stronsiyum modifikasyonlu AlSi11Mg ve AlSi7Mg alaşımları için belirlenmiş olan limitler, çizelge 2.2’de gösterilmiştir. Bu limitler müşteri şartnamelerinde de ayrıca belirtilmiş olup, genellikle AB direktifleri olan 2000/53/EC ve 2002/525/EC’e göre belirlenmişlerdir.

Çizelge 2.2: AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşım elementi oranı değer aralığı [34].

Element [%]	Alaşım [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Ca	Sn	Sr	Sb	P
Maksimum	AlSi11Mg	12	0.1	0.02	0.04	0.25	0.04	0.1	0.02	0.02	0.01	0.003	0.01	0.025	0.005	0.002
Minimum		11	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Maksimum	AlSi7Mg	7.5	0.1	0.02	0.04	0.4	0.04	0.2	0.02	0.02	0.01	0.003	0.01	0.025	0.005	0.002
Minimum		6.5	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00

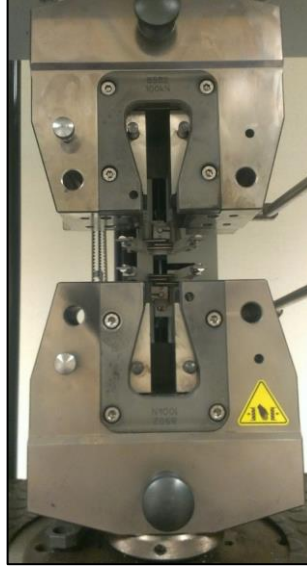
2.3.4 Çekme testi

Jantın metalurjik özelliklerini temsil etmek için, her müşteri, jantın farklı bölgelerinden çekme çubuğu alınarak kontrol edilmesini talep etmektedir. Jant üzerinden feder, dış flanş ve iç flanş bölgelerinden çekme çubuğu hazırlarken, ürün resmine bakılarak resimde belirtilen yerlerden testereyle parça alınır. Çekme çubuğu ölçüleri, DIN 50125 standardı ile belirlenmiştir (Şekil 2.20). Bu ölçülere göre imal edilen çekme çubuklarının imalat kolaylığı için, brüt halde 10 mm x 10 mm x 100 mm’lik parçadan işlenmeleri uygundur.



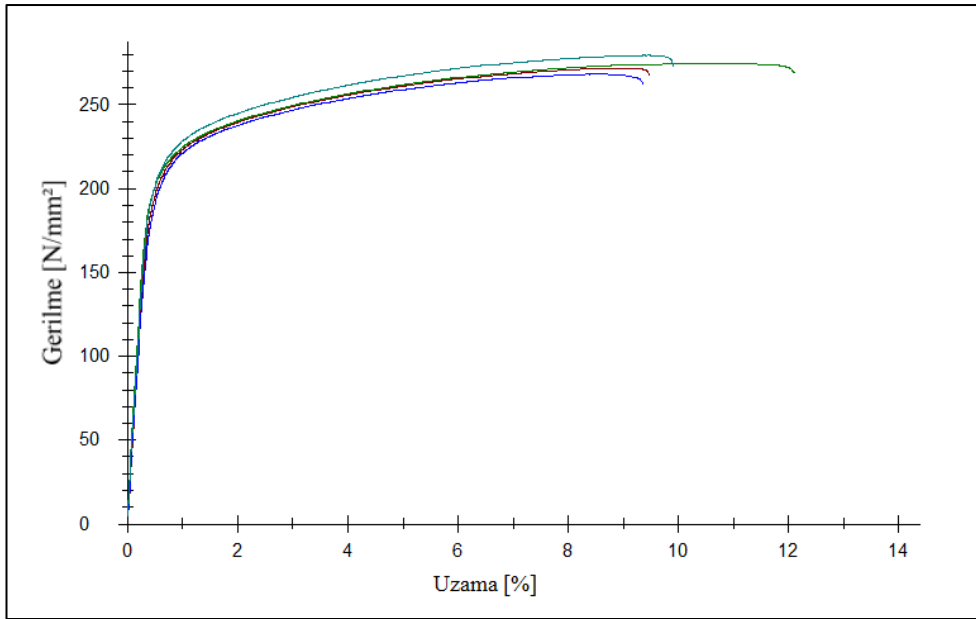
Şekil 2.20 : DIN 50125 çekme çubuğu ölçüleri [45].

Test, Zwick marka çekme testi cihazı ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.21). Çubuk çekme hızı 5 mm/min olarak belirlenmiştir. Çekme testi sırasında maksimum 100 kN kopma kuvveti uygulanır [46].



Şekil 2.21 : Çekme testi cihazı [46].

Çekme testi sonucunda AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlar için elde edilen gerilme – kopma uzaması grafiği örneği şekil 2.22’de verilmiştir.

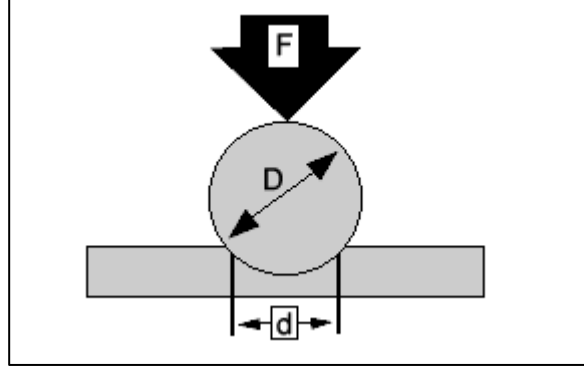


Şekil 2.22 : Çekme testi ölçüm sonucu gerilme – kopma uzaması grafiği [46].

2.3.5 Sertlik testi

Brinell sertlik deneyi, dövme veya döküm ürünlerin sertlik değerini tayin etmede yaygın olarak kullanılan bir sertlik ölçüm methodudur. Bunun sebebi, dövme veya döküm parçalarının, Rockwell veya Vickers sertlik deneyi uygulaması için, iç yapılarının kaba ve yumuşak kalmasından kaynaklanır. Brinell sertlik ölçümü, ASTM E10 ve ISO 6506 standartlarında tanımlandığı gibi yapılır [47]. Brinell

sertlik deneyi, malzeme yüzeyine belirli bir yükün (F), belirli bir çaptaki (D) sert malzemeden yapılmış bir bilya yardımıyla belirli bir süre uygulanması sonucu yüzeyde kalıcı bir iz meydana getirmek esasına dayanır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 : Brinell sertlik ölçüm methodu [47].

Kuvvet, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi hesaplanır:

$$HB = \frac{2xF}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (2.5)$$

Bu hesaplama yapılırken;

- D= küre çapı
- d= iz çapı
- F= Uygulanan kuvvet
- HB= Brinell sertlik değeri olarak alınır.

Brinell sertlik ölçümü, Innovatest Nexus 3000 serisi sertlik ölçüm cihazının ve Innovaview görüntü analiz sistemi kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 2.24).



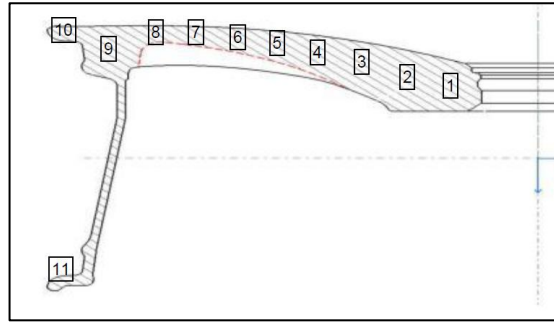
Şekil 2.24 : Sertlik ölçüm cihazı (sol) ve sonuç görüntüleme (sağ) [48].

Jant üzerinde sertlik ölçümü, jant kesidi boyunca stil yüzeyi ve iç flanş üzerinden yapılır [48]. Deney tasarımıda kullanılan alaşımlar için sertlik değerleri aşağıda verilmiştir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3: AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları için minimum Brinell sertlik değerleri [34].

Alaşım	Sertlik (Brinell Sertlik Değeri - HBW 5/250)
AlSi7Mg T6	min. 75
AlSi7Mg	min. 60
AlSi11Mg	min. 55

Bu değerler, şekil 2.25'te gösterilen kesit üzerinden alınan tüm ölçümler için sağlanmalıdır.



Şekil 2.25 : Jant üzerinde Brinell sertlik ölçüm pozisyonları [48].

2.3.6 Mikroyapı analizi

Değişik büyütmelelerde numune mikroyapısının incelenmesinde ters metal mikroskobu kullanılır (Şekil 2.26). Numune mikroyapı analizi, ISO/IEC 17025 standardında belirtildiği gibi yapılır [49].



Şekil 2.26 : Mikroyapı analizinde kullanılan ters metal mikroskobu [49].

Jant üzerinden alınan metalurjik analiz bölgeleri, lastik yüzeyi, feder, göbek, iç flanş ve dış flanş kesitleridir. Numune alındıktan sonra, analiz yapılacak yüzey, parlatma cihazında temizlenerek düzleştirilir. Bu amaçla numune veya numunelerin analiz edilecek yüzeyleri sırasıyla 180, 320, 500, 800, 1200 ve 2400 ölçülü zımparalardan geçirilerek temizlenir ve parlatılır. Final parlatma olarak siyah keçe kullanılır. Numune veya numuneler siyah keçe üzerinde, bezelye tanesi büyüklüğünde Alümina veya Elmas pasta kullanılarak temizlenir ve parlatılır. Her zımpara ve keçe değişiminde, parlatma yönü 90° değiştirilir. Numuneler alkol ve saf su ile yıkanır. 15 s. süreyle dağlama çözeltisi (0.5 % HF) içinde tutulur. Sonra alkol ve saf suyla durulanır ve havayla kurutulur [50].

Mikroskop altında x50, x100, x200 büyütmelerde Sr modifikasyon işleminin performansı ve metaller arası bileşiklerin görünüşleri incelenir. Atlas de Micrographie Quantitative Des A-S7 G yayınında yer alan referans görüntülerle karşılaştırılarak dendrit büyüklükleri ve modifikasyon dereceleri saptanır. Ayrıca yüzeydeki döküm sağlığı hataları da incelenir [49].

Mikroyapı inceleme sonuçlarına göre %7 Si içeren Sr modifikasyonlu Al-Si alaşımı için; döküm sonrası yapı, katılaşma hızı uygun, ötektik silisyum fibröz olmalıdır. Mikroyapı içerisinde oksit ve çekme boşluklarına rastlanmamalıdır. Isıl işlem sonrası, ötektik yapıdaki Si, küresel halde olmalıdır. %11 Si içeren Al-Si alaşımı için; Sr modifikasyonu yapı boyunca homojen ve ötektik Si fibröz olmalıdır. Katılaşma hızı uygun, ötektik yapı ince olmalıdır. Mikroyapı içerisinde oksit ve çekme boşluklarına rastlanmamalıdır [50].

3. SONUÇLAR

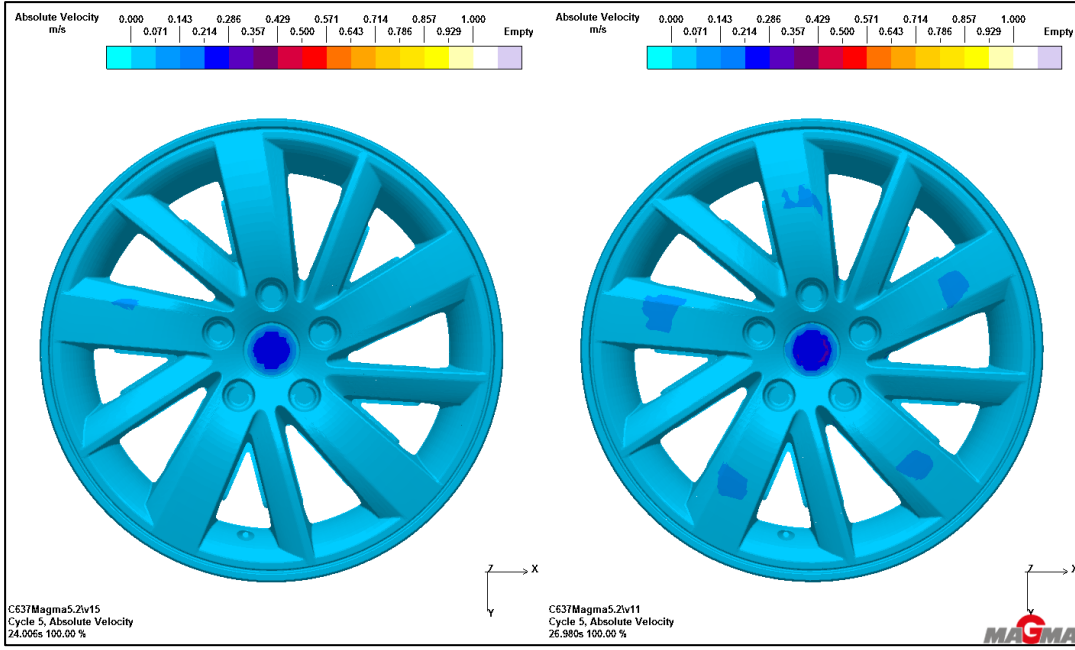
3.1 Tasarım Doğrulama ve Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışmaları Sonuçları

Tasarım doğrulama simülasyon sonuçları başlığı altında, kalıp tasarımı doğrulama ve ürün tasarımı doğrulama amaçlı yapılan simülasyon çalışmaları bulunmaktadır. Kalıp tasarımı doğrulamak için Magma 5.3 sonlu hacimler analiz programı kullanılarak yapılmış olan döküm simülasyonu sonuçları ve yorumları bölüm 3.1.1’de anlatılmıştır. Ürün tasarımı doğrulama çalışmaları için ABAQUS/Explicit 6.9 programı kullanılarak yapılan ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu bölüm 3.1.2.1’de, ANSYS Workbench 14.5 kullanılarak yapılan hızlandırılmış ömür testi analizi sonuçları ise bölüm 3.1.2.2’de detaylı olarak anlatılmıştır.

3.1.1 Döküm simülasyonu sonuçları

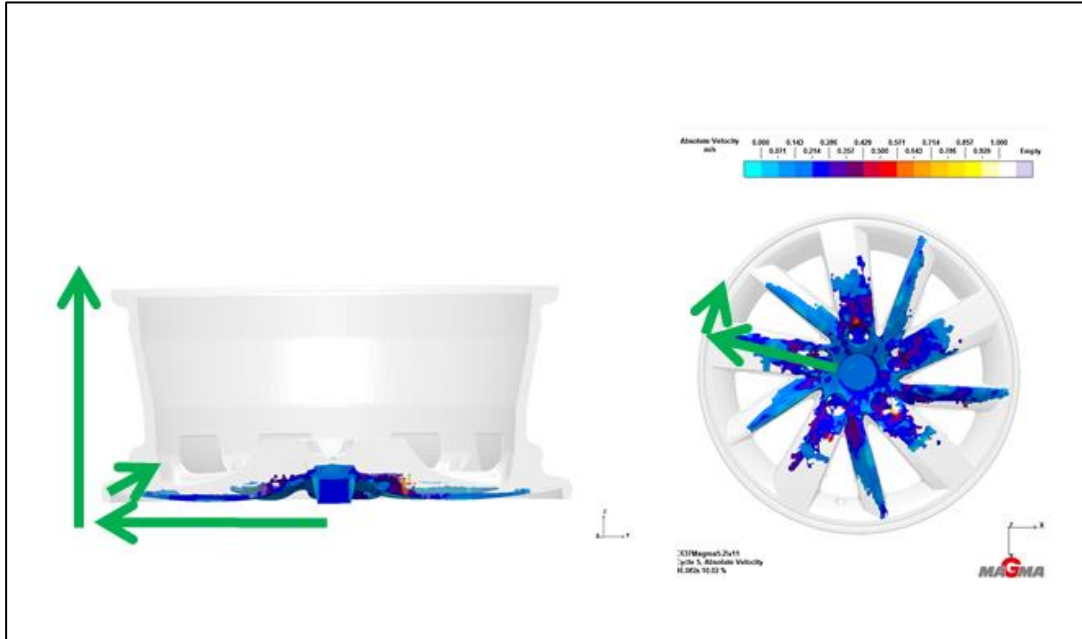
AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarının dolum ve katılaşma simülasyonları sonrasında, dolum ve katılaşma süreleri hakkında $\pm\%10$ sapma ile bilgi alınır.

AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları için dolum simülasyon farklılıkları incelendiğinde, toplam dolum süresinin her iki alaşım için de birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu süre, AlSi7Mg alaşımı için 24 s., AlSi11Mg alaşımı içinse 27 s. olarak görülmektedir. Bu sonuçlara istinaden; bu alaşımların, bu tasarım için aynı kalıba dolum süreleri arasında pratikte bir farklılık olmayacağı söylenebilir. Şekil 3.1’de, her iki alaşım için de kalıp dolumun tamamlandığı ana ait dolum hızları gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : AlSi7Mg alaşımı için kalıp dolum simülasyonu (sol) ve AlSi11Mg alaşımı için kalıp dolum simülasyonu (sağ).

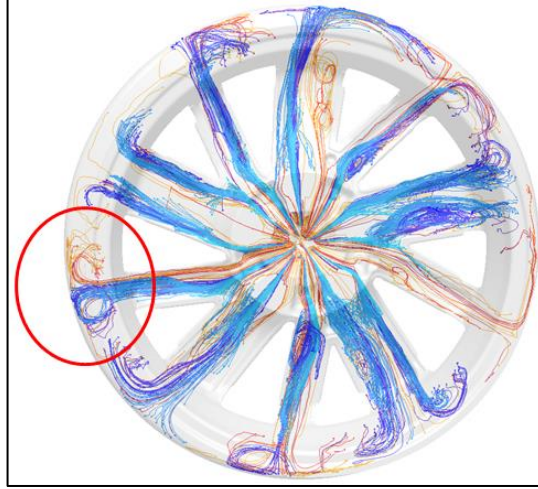
Kalıp içerisinde metal akış yönü göbek bölgesinden lastik yüzeyine doğrudur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Alüminyum alaşım jant kalıbı içerisinde metal dolum yönü.

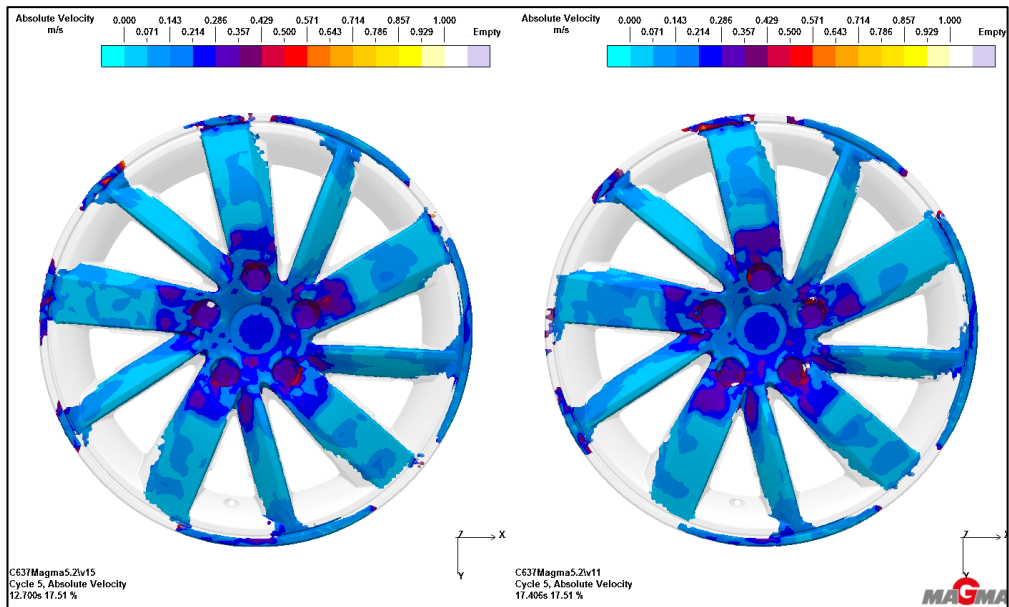
Metal dış flanş bölgesine geldiğinde; hem sağda gösterilen yönde çevre boyunca doluma devam etme, hem de solda gösterilen lastik kesidi boyunca doluma devam etme davranışı içerisine girer. Metalin iki yöne aynı anda ilerlemek istediği durumlarda, türbülans oluşumu gözlemlenir. Kalıp dolum simülasyonu sonucunda,

türbülans oluşan bölgeler de gözlemlenir. Şekil 3.3'te bu bölge kırmızı daire ile işaretlenmiştir.



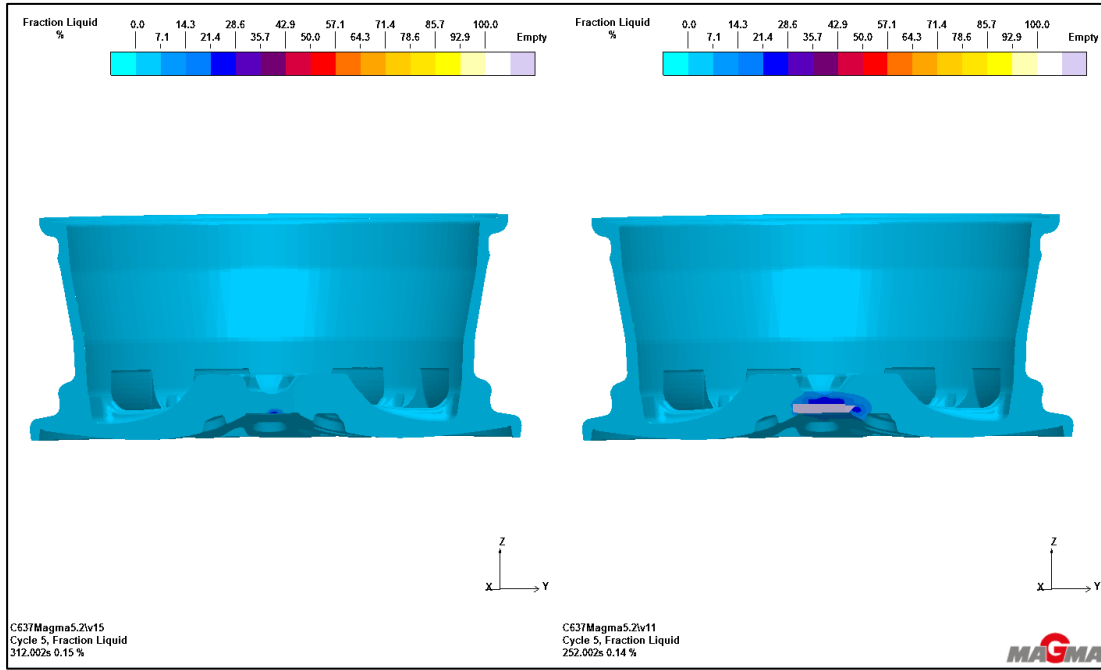
Şekil 3.3 : Jant dökümü sırasında kalıp içerisinde türbülans oluşumu.

Bu sonuç gözlemlendiğinde, o bölgedeki dolum hızının kontrol edilmesi gerekir. Eğer dolum hızı 0.5 m/s altında ise; o bölgede türbülansın sakıncası olmadığı anlaşılır. Bu simülasyon sonucunda, aynı kalıp içerisinde hem AlSi7Mg hem de AlSi11Mg alaşımları için türbülans oluşumunun gözlemlendiği bölgelerde dolum hızları kontrol edilmiştir (Şekil 3.4). Bu kontroller sonucunda dolum hızının 0.5 m/s'yi aşmadığı gözlemlenmiş, oluşan türbülansın çekme boşluğu oluşumuna neden olmayacağına karar verilmiştir.



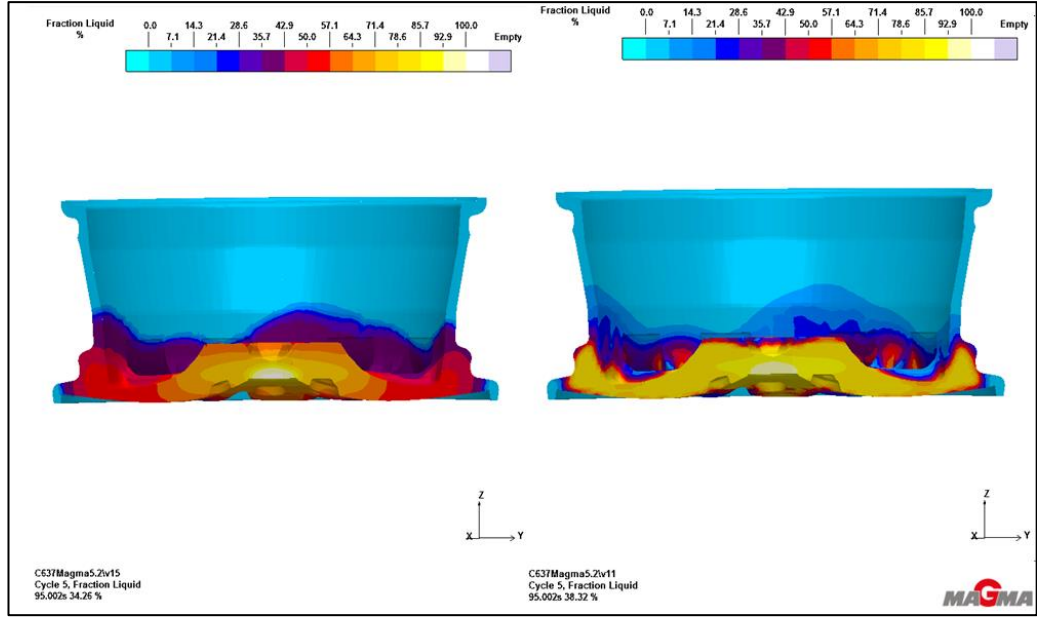
Şekil 3.4 : Jant kalıbı içerisinde türbülans oluşan bölgelerde dolum hızı kontrolü.

AlSi7Mg ve AlSi11Mg katılaşma simülasyonları farklılıkları incelendiğinde, AlSi7Mg alaşımına ait katılaşma süresinin, simülasyona göre 312 s., AlSi11Mg alaşımına ait katılaşma süresinin ise 252 s. olduğu görülmektedir. AlSi7Mg alaşımının, AlSi11Mg alaşımına göre daha geniş bir katılaşma sıcaklık aralığı olduğu bölüm 1.2.1.2’de, gerçek döküm operasyonunda da AlSi7Mg alaşımının AlSi11Mg alaşımına göre katılaşma süresinin daha fazla olduğu ise bölüm 1.2.2.3’te detaylı olarak anlatılmıştı. Simülasyon sonuçları, gerçek döküm ile paralel farklılıklar göstermektedir (Şekil 3.5).



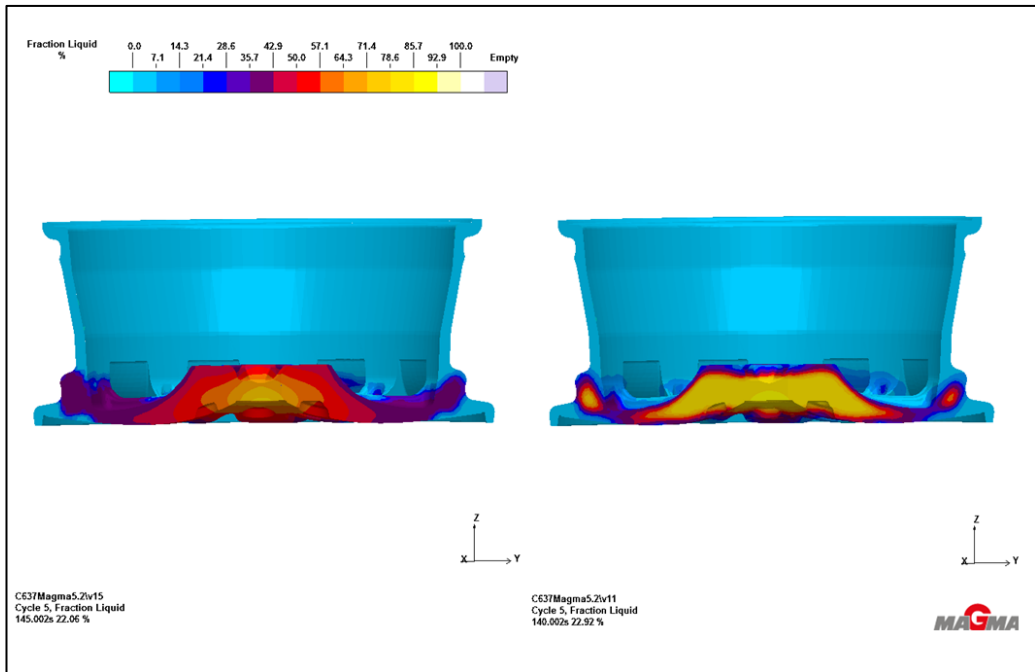
Şekil 3.5 : AlSi7Mg alaşımı dökümü için katılaşma süresi (sol) ve AlSi11Mg alaşımı dökümü için katılaşma süresi (sağ).

Katılaşma hızı grafikleri incelendiğinde, aynı anda AlSi11Mg alaşımında katılaşan miktarın, AlSi7Mg alaşımına göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.6).



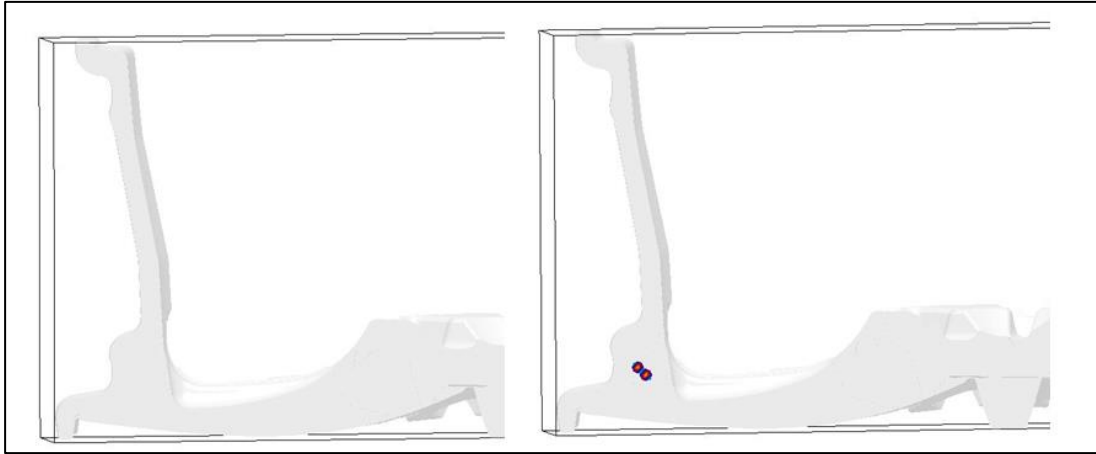
Şekil 3.6 : AlSi7Mg (sol) ve AlSi11Mg (sağ) alaşımları için katılaşmanın 95. saniyesinde katılaştıran miktar görünümü.

Her iki alaşım için, zamandan bağımsız, aynı kalan sıvı oranı gözetilerek alınan görüntüler birbirileri ile kıyaslandığında, AlSi11Mg alaşımı ile yapılan döküm simülasyonu sonucu topuk bölgesinde sıvı metal oranının daha fazla olduğu ve bölgenin besleme yetersizliğinden ötürü sıcak kaldığı gözlemlenmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : AlSi7Mg (sol) ve AlSi11Mg (sağ) alaşımları için topuk bölgesi katılaşma karşılaştırması.

Aynı sıvı oranı için AlSi11Mg bölgesinde topuk bölgesinde katılaşmanın daha güç gerçekleşmesi, pratikte karşımıza AlSi11Mg alaşımı için hızlı katılaşmanın meydana getirdiği porozite problemi olarak da karşımıza çıkmaktadır. Bu durumun boyutunun kalıp tasarımı aşamasında tespit edilmesi, problemin tasarım aşamasında kalıp içerisine yapılan uygun soğutma tasarımı ile giderilmesini sağlar. Aşağıdaki şekilde AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları için toplam porozite oranı gösterilmiştir (Şekil 3.8). Toplam porozite oranına, katılaşma modülü altında belirli bir seviye üzerindeki porozite sonuçlarından bakılır.



Şekil 3.8 : AlSi7Mg (sol) ve AlSi11Mg (sağ) alaşımları toplam porozite miktarı oranı karşılaştırması.

3.1.2 Mekanik test simülasyon sonuçları

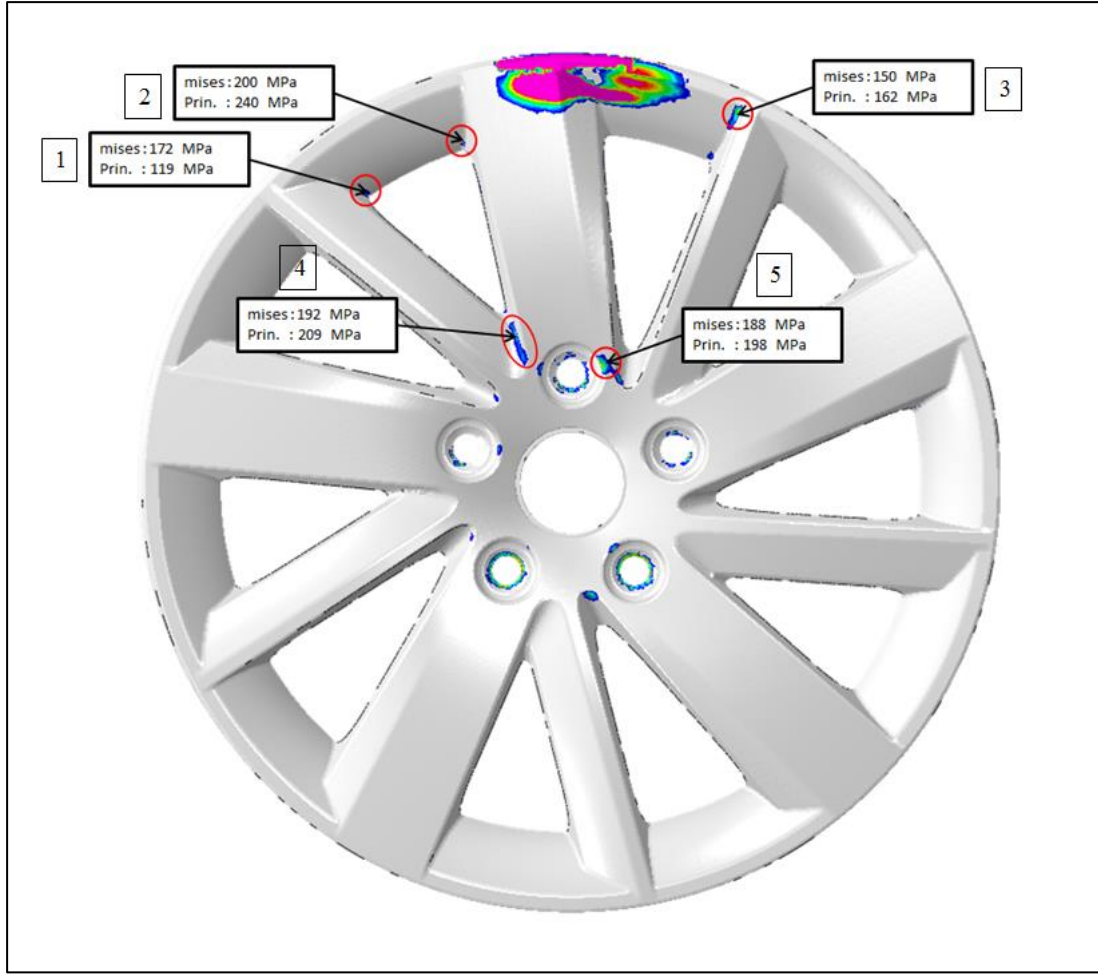
Ürün tasarımı doğrulama çalışmaları için ABAQUS/Explicit 6.9 programı kullanılarak yapılan ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu bölüm 3.1.2.1’de, ANSYS Workbench 14.5 kullanılarak yapılan hızlandırılmış ömür testi analizi sonuçları ise bölüm 3.1.2.2’de detaylı olarak anlatılmıştır.

3.1.3 ISO 7141 13° darbe testi simülasyon sonuçları

ISO7141 darbe testi simülasyonu, Abaqus/Explicit 6.9 sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak dinamik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon çalışması ile, yapılan simülasyon sonucunda elde edilen von Mises ve max. Principle gerilme değerleri üzerinden, test sonucunda jant üzerinde çatlak oluşup oluşmayacağı konusunda risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Jant üzerindeki bölgelerin, ISO 7141 13° darbe testi sonrası çatlak oluşumu kritikliği anlamında farklı dinamikler taşıdığı, jant modeli için darbe simülasyonu sonrası tek bir limit değerinin olmadığı, limitlerin bölgeler bazında ayrı ayrı belirlendiği bölüm 2.2.2.1’de detaylı olarak anlatılmıştı.

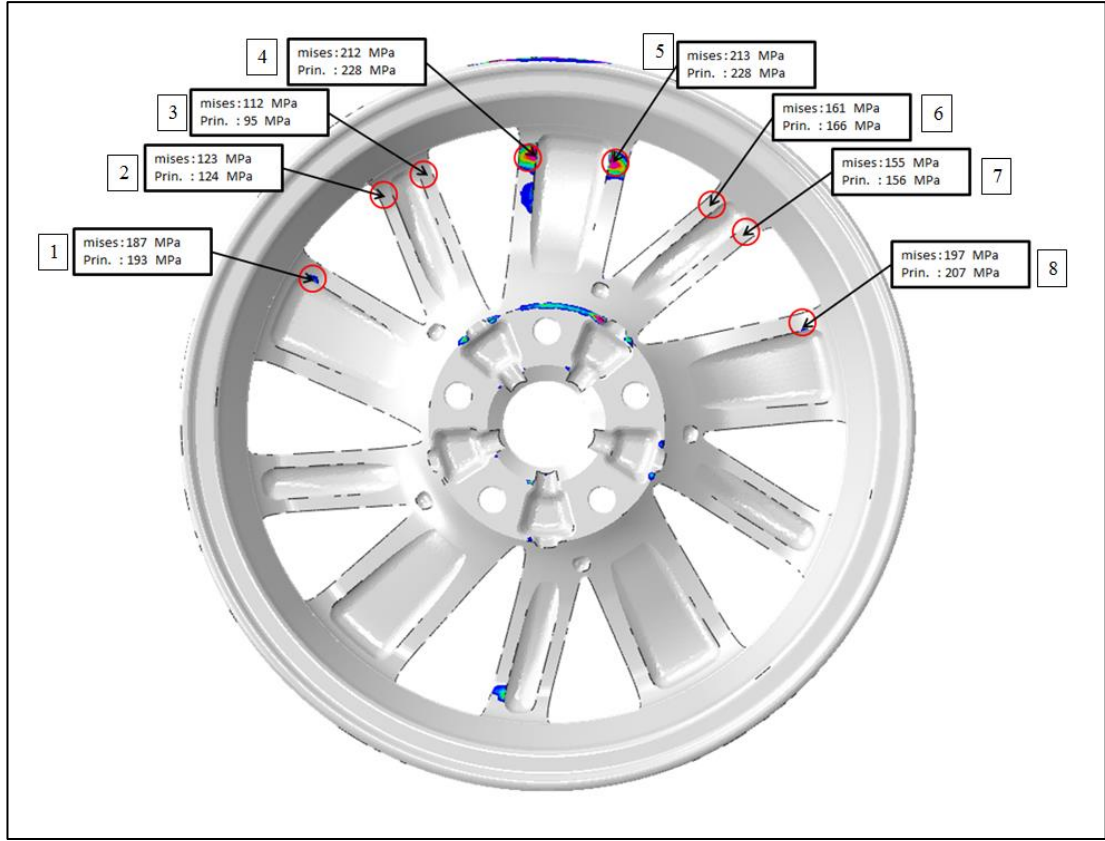
Bu bölümde çalışma kapsamında incelenen jant modeline ait ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonuçları AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımları için yorumlanmıştır.

AlSi7Mg T6 alaşımı ile yapılan ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonuçlarına göre, stil yüzeyinde kritik görülen 5 gerilme değeri yorumlanmıştır. Buna göre, 1 numaralı bölgede oluşan 172 MPa von Mises gerilme değeri, analiz boyunca janta etki eden toplam gerilme değerini, 119 MPa maksimum asal gerilme değeri ise analiz sonucunda jantın üzerinde oluşan gerilme değerini ifade etmektedir. 119 MPa, jant için izin verilen ve gerçekleşen akma gerilme değerinin de altında bir değer olduğundan, bu bölgede kritik bir durum gözlemlenmemiştir. 2 numaralı bölgede oluşan maksimum asal gerilme değeri 240 MPa'dır, bu değer o bölge için akma gerilme değeri üzerinde ancak çekme gerilme değeri altında olduğundan, ayrıca ISO 7141 13° darbe testi sonrası stil yüzeyinde o bölgede çatlak oluşumu genellikle gözlemlenmediğinden, bu değer de kritik olarak değerlendirilmemiştir. Bu değer, o bölgenin geometrisinden ötürü yüksek olarak oluştuğu yorumu yapılmıştır. Aynı şekilde 3 numaralı bölgede oluşam 162 MPa maksimum asal gerilme değeri, bu alaşım için akma gerilme değeri limitinin altında kaldığından, bu değer de uygun olarak değerlendirilmiştir. Göbek bölgesi çevresindeki gerilme değerleri olan 4 ve 5 numaralı gerilme değerlerine bakıldığında, aynı şekilde alaşımın akma gerilme değeri limitinin üzerinde ancak çekme gerilme değeri altında gerilme değerleri gözlemlendiğinden, AlSi7Mg T6 alaşımı için stil yüzeyinde kritik bir durum gözlemlenmemiştir (Şekil 3.9).



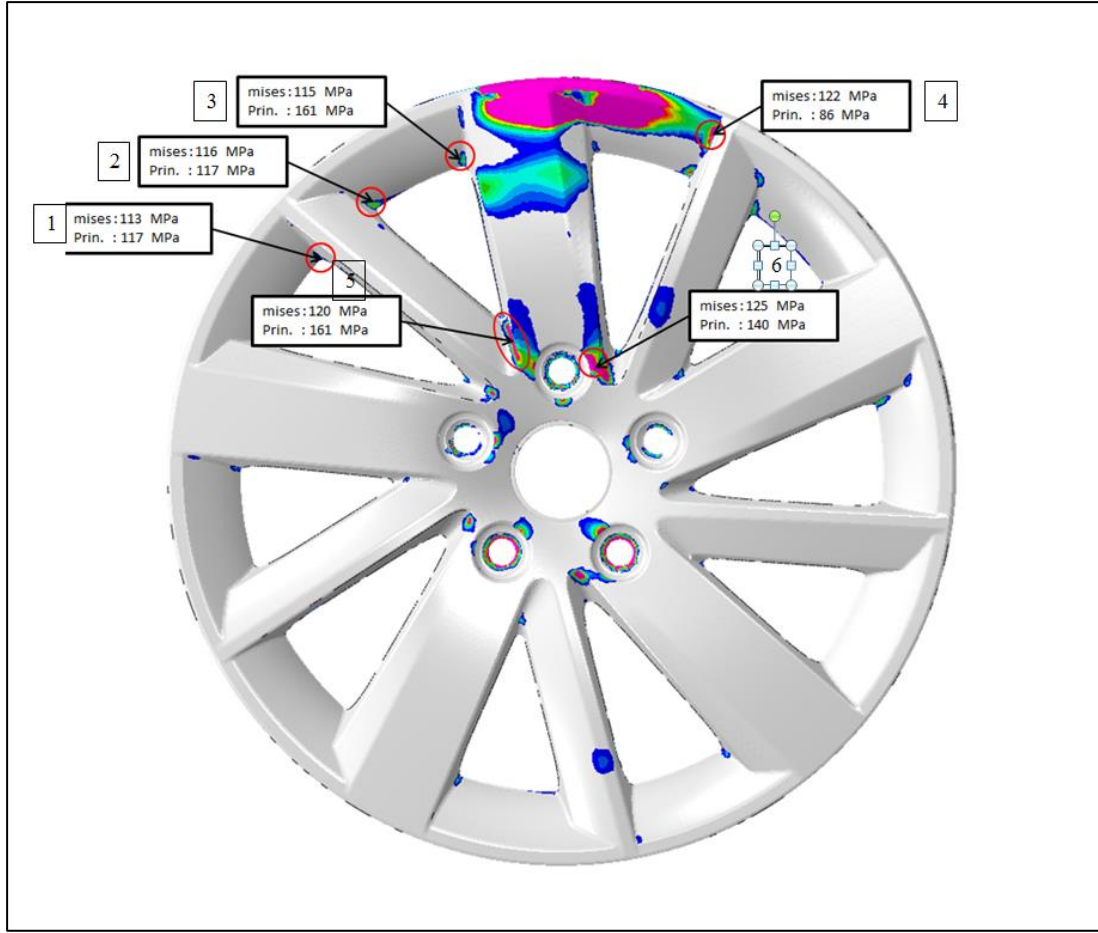
Şekil 3.9 : AlSi7Mg T6 alaşımı ile yapılan ISO 7141 13° darbe testi simülasyon sonucu stil yüzeyinde kritik bölgeler ve gerilme değerleri.

AlSi7Mg T6 alaşımı ile yapılan > ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonuçlarına göre, jantın arka yüzeyinde kritik görülen 8 bölgede gerilme değerleri yorumlanmıştır. 4 ve 5 numaralı bölgede oluşan yüksek gerilme değerleri, jantın üzerine vurulan kol üzerinde olduğundan, diğer bölgelere göre daha yüksek olup, alaşımın çekme gerilme değerinden daha düşük olduğundan uygun olarak değerlendirilmiştir. 1, 2, 3, 6 ve 7 numaralı bölgelerde oluşan gerilme değerleri, alaşımın akma gerilme değeri altında kaldığından, bu bölgeler de uygun olarak değerlendirilmiştir. 8 numaralı bölgede oluşan 207 MPa maksimum asal gerilme değeri, yine alaşımın akma gerilme değeri üzerinde, ancak o bölge için izin verilen limit değerler altında olduğundan, bu alaşım ile yapılan ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonucu kritiklik gözlemlenmemiştir (Şekil 3.10).



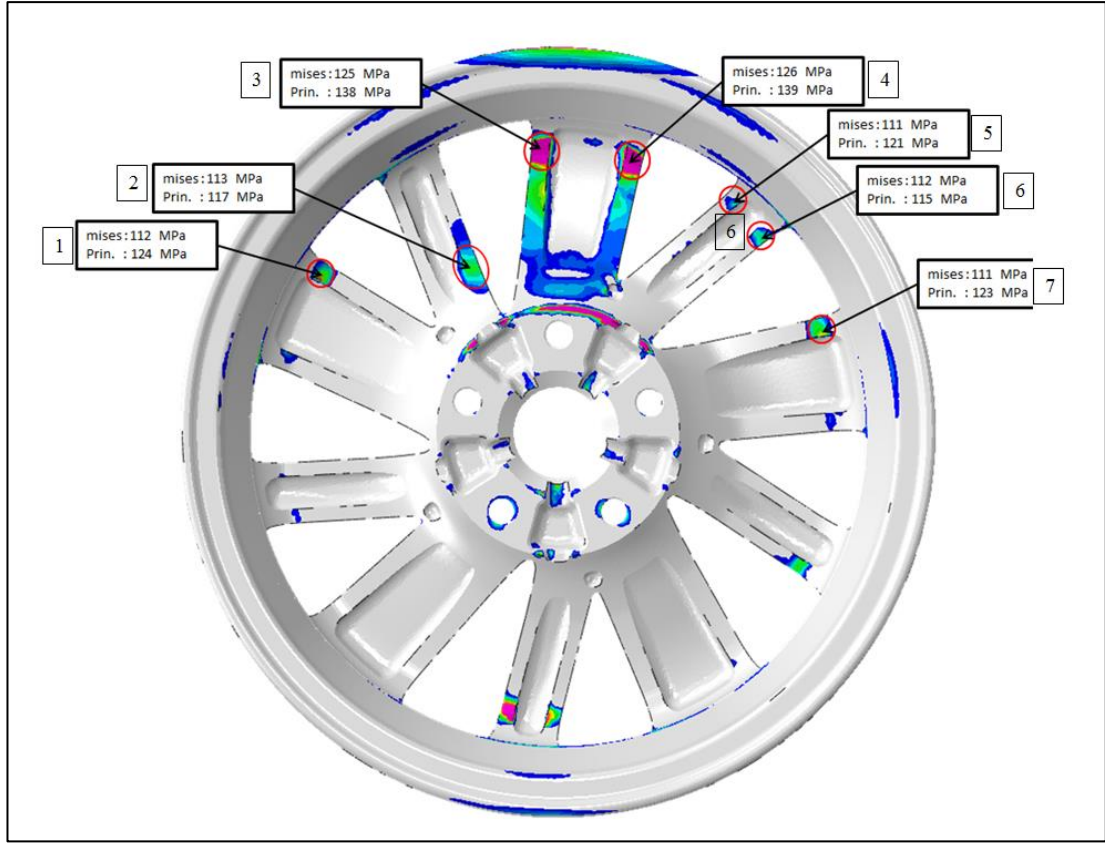
Şekil 3.10 : AlSi7Mg T6 jantı ile ISO 7141 13° darbe testi simülasyon sonucu arka yüzeyde kritik bölgeler ve gerilme değerleri.

AlSi11Mg alaşımı ile yapılan ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonuçlarına göre, stil yüzeyinde kritik görülen 6 gerilme değeri yorumlanmıştır. Buna göre, 6 bölgede de meydana gelen maksimum asal gerilme değerleri, alaşımın akma gerilme değeri üzerinde olup, kopma limit değerleri altındadır. Analiz boyunca jant üzerine etkiyen toplam gerilme değeri olan von Mises gerilme değerleri kontrol edildiğinde, alaşımın çekme gerilme değeri üzerinde bir gerilme değeri gözlemlenmediğinden, analiz sonucu uygun olarak değerlendirilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : AlSi11Mg jantı ile ISO 7141 13°darbe testi simülasyonu sonucu stil yüzeyinde kritik bölgeler ve gerilme değerleri.

AlSi11Mg alaşımı ile yapılan ISO 7141 13° darbe testi simülasyonu sonuçlarına göre, jant arka yüzeyinde kritik görülen 7 gerilme değeri yorumlanmıştır. Bölgelerin tamamında oluşan gerilme değerleri, akma gerilme değerinin altında olup, alaşım için çekme gerilme değerine uzak olduğundan, simülasyon sonuçları uygun olarak yorumlanmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 : AlSi11Mg jantı ile ISO 7141 13° darbe testi simülasyon sonucu arka yüzeyinde kritik bölgeler ve gerilme değerleri.

3.1.4 Hızlandırılmış ömür testi simülasyon sonuçları

Hızlandırılmış ömür testi simülasyonu, ANSYS Workbench 14.5 sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu jant için müşteri beklentisi olan ömür ve moment değeri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.1: Müşteri şartnamesine göre janta uygulanan moment değeri ve jantın tamamlaması gereken çatlaksız tur sayısı (ömür).

Çatlaksız tur sayısı (Ömür) [n]	Moment değeri [Nm]
200000	2871
1800000	1914

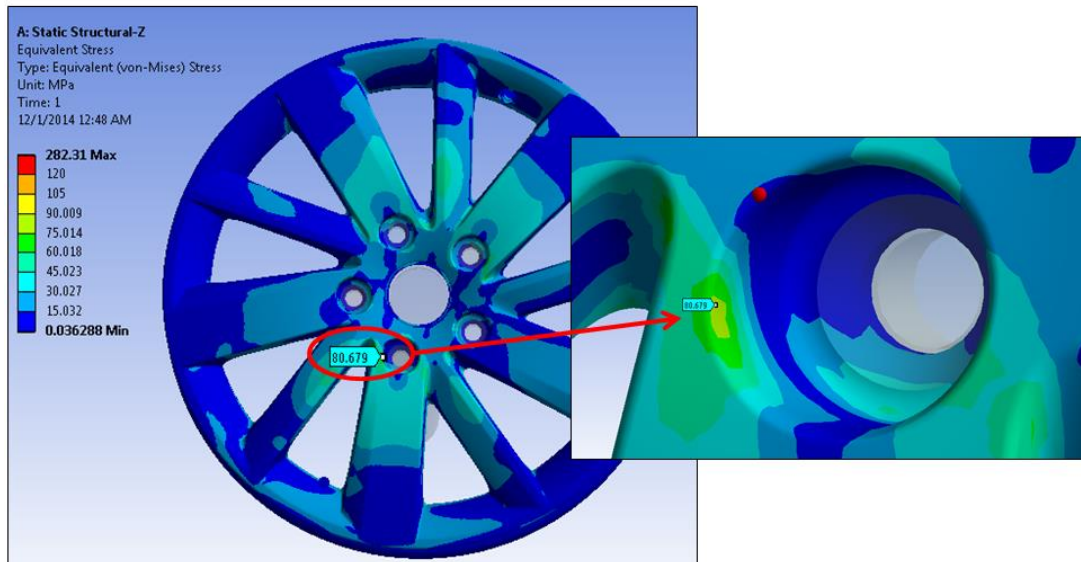
Simülasyon limitleri ise, bölüm 2.1.2.2’de anlatıldığı gibi firma içerisinde kullanılan ve jantın çatlaksız tamamlaması gereken tur sayısına dayanan bir hesaplama yöntemi ile belirlenmektedir. Bu limitler; AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş jantlar için belirtildiği şekilde hesaplanır, AlSi11Mg ve AlSi7Mg jantlar içinse; yapılan deneysel çalışmalar sonucu hesaplanan değer 10 MPa altında kabul edilebileceğine karar

verilmiştir. Buna göre hızlandırılmış ömür testi simülasyonu için von Mises limit gerilme değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.2: Çatlaksız tur sayısına göre hızlandırılmış ömür testi simülasyonu von Mises limit değerleri.

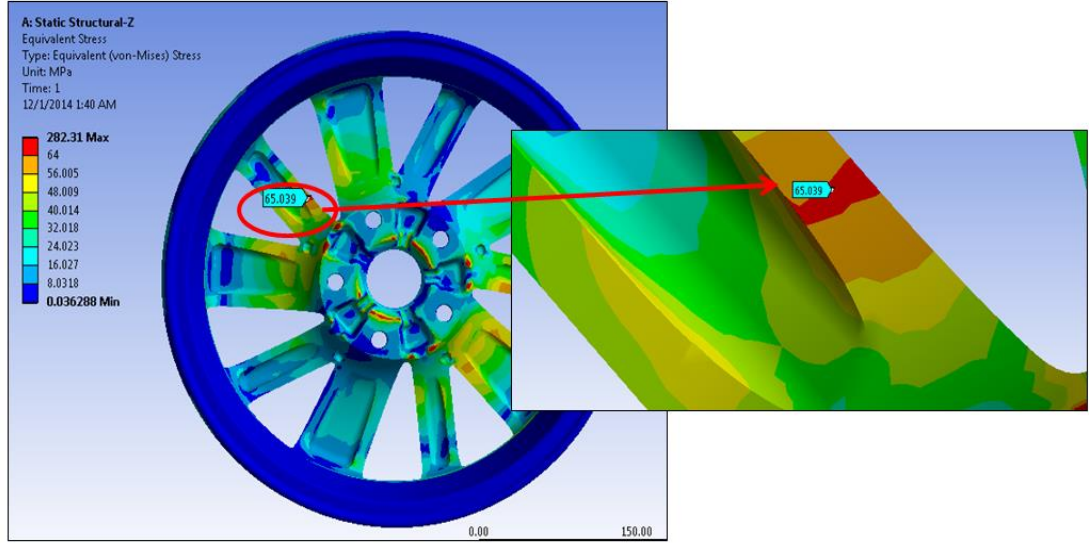
Jant	ANSYS hızlandırılmış ömür testi simülasyonu limit değeri	
	Ön yüzey (stil)	Arka yüzey
AlSi7Mg T6	122 MPa	111 Mpa
AlSi11Mg - AlSi7Mg	112 Mpa	101 Mpa

Jantın stil yüzeyi adı verilen ön yüzeyinde, tek eksenli simülasyon sonucu oluşan maksimum gerilme, bijon çevresinde meydana gelmiştir. Oluşan von Mises gerilme değeri 81 MPa'dır. Bu değer, her iki alaşım için de izin verilen limit değerinin oldukça altında bir değerdir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 : Jant stil yüzeyinde maksimum gerilme oluşan bölge.

Jant arka yüzeyinde, tek eksenli simülasyon sonucu ön yüzeyde maksimum gerilme, kol üzerinde meydana gelmiştir. Oluşan von Mises gerilme değeri 61 MPa'dır. Bu değer, her iki alaşım için de izin verilen limit değerinin oldukça altında bir değerdir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 : Jant arka yüzeyinde maksimum gerilme oluşan bölge.

Bu sonuçlara göre, bu jantın tasarımının hızlandırılmış ömür testi anlamında fazla güvenli olarak yapıldığı anlaşılmaktadır. Çünkü dayanımı daha düşük olan AlSi11Mg alaşımına göre oluşan gerilme değerleri de, limit değerlerinin oldukça altındadır. Bu tasarımda; gerilme değerlerinin kol ucuna doğru yayılması için ağırlık azaltma çalışmalarına gidilebilir. Ancak ISO 7141 13° darbe testi simülasyon sonuçları, akma gerilme değerinin üzerinde ve limit değerlerine yakın olduğundan, jant üzerinde ağırlık azaltma çalışmaları yapılmamasına karar verilmiştir.

3.2 Deney Tasarımı ve Ürün Doğrulama Test Sonuçları

Jantlara ait ürün doğrulama testleri kapsamında, ISO 7141 13° darbe testi, hızlandırılmış ömür testi, referans bölgelerinden alınan çekme numuneleri ile çekme testi, alaşımlara ait kimyasal analiz, referans bölgelere ait Brinell sertlik ölçümü ve mikroyapı inceleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

3.2.1 ISO 7141 13° darbe testi sonuçları

Bu çalışma kapsamında incelenen modele ait teker yükü 550 kg. olarak şartnamede tanımlanmıştır. Buna göre darbe yükü, denklem 2.3'te verilen formül ile hesaplanır ve 510 kg. olarak elde edilir.

$$D = 0.6 \times 550 + 180 \text{ kg}$$

$$D = 510 \text{ kg.}$$

(3.1)

Testler için kullanılan lastikler, 205/55 R16 büyüklüğündedir. ISO 7141 13° darbe testi için şartname içerisinde pozisyonlar şekil 3.15'te gösterilmiştir. Her pozisyon için 3 adet jant teste tabi tutulur.



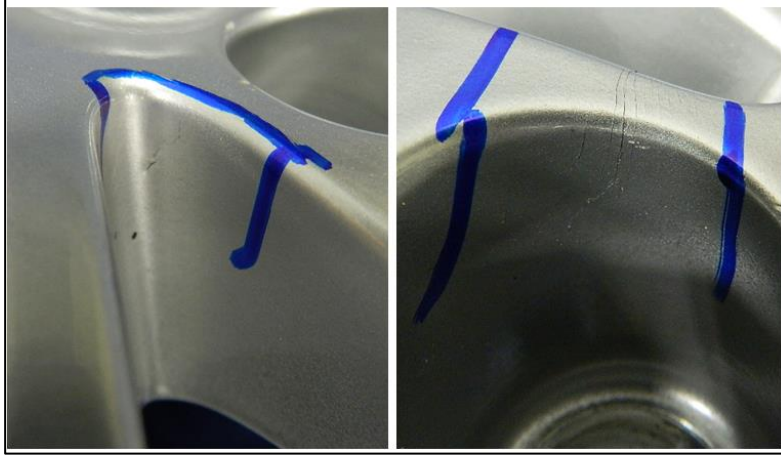
Şekil 3.15 : Jant için belirlenen darbe pozisyonları.

Buna göre AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları ile üretilen 6'şar adet jant, öncelikle 510 kg. darbe yükü ile test edilmiştir. Jant üzerinde; jantın güvenilirlik aralığını belirleyebilmek için teker yükü +25 kg. ve +50 kg. artırılarak da testler uygulanmaktadır. Tüm jantlar üzerinde, belirtilen darbe yükleri ile testler uygulanmıştır. Ek olarak, jantın hangi yükte kırılacağını kontrolü için AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş jant üzerinde yük arttırımı yapılarak testler uygulanmış ve çatlak bölgeleri incelenmiştir. Bu alaşımın seçilmesinin nedeni, uygun adette numunenin elimizde olmasıdır. Sonuçta, tüm jantlar +50 kg. arttırılmış darbe yükü ile de testleri uygun olarak tamamladıklarından, bu jantın darbe performansı her üç alaşım için de uygun olarak değerlendirilmiştir. Diğer alaşımlar olan AlSi11Mg ve AlSi7Mg alaşımları ile de yük arttırımı, jant üzerinde çatlak oluşana kadar yapılabilir. Sonuçlar

çizelge 3.3'te verilmiş, çatlayan bölgelere ait fotoğraflar ise Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.3: AlSi11Mg, AlSi7Mg ve AlSi7Mg T6 jantlarına ait darbe testi sonuçları.

Darbe Bölgesi	Alaşım	Darbe Yüğü	Test sonucu		
			Jant 1	Jant 2	Jant 3
Feder üzeri	AlSi7Mg T6	510 kg.	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		510 kg.	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		535 kg. (+25 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		535 kg. (+25 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		560 kg. (+50 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		560 kg. (+50 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		585 kg. (+75 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		585 kg. (+75 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		610 kg (+100 kg)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		610 kg (+100 kg)	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		635 kg (+125 kg)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		635 kg (+125 kg)	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		660 kg (+150 kg)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		660 kg (+150 kg)	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		685 kg (+175 kg)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		685 kg (+175 kg)	Uygun	Uygun değil	Uygun
Feder üzeri		710 (+200 kg)	Uygun	Uygun değil	Uygun değil
Feder üzeri	AlSi7Mg	510 kg.	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		510 kg.	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		535 kg. (+25 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		535 kg. (+25 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		560 kg. (+50 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		560 kg. (+50 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri	AlSi11Mg	510 kg.	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		510 kg.	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		535 kg. (+25 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		535 kg. (+25 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Feder üzeri		560 kg. (+50 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun
Sübag üzeri		560 kg. (+50 kg.)	Uygun	Uygun	Uygun



Şekil 3.16 : Sübap üzeri +175kg. darbe yükü testi sonrası feder arası çatlak bölgesi ve feder üzeri pozisyonda +200 kg. darbe yükü ile yapılan test sonrası bijon kenarı çatlak bölgesi

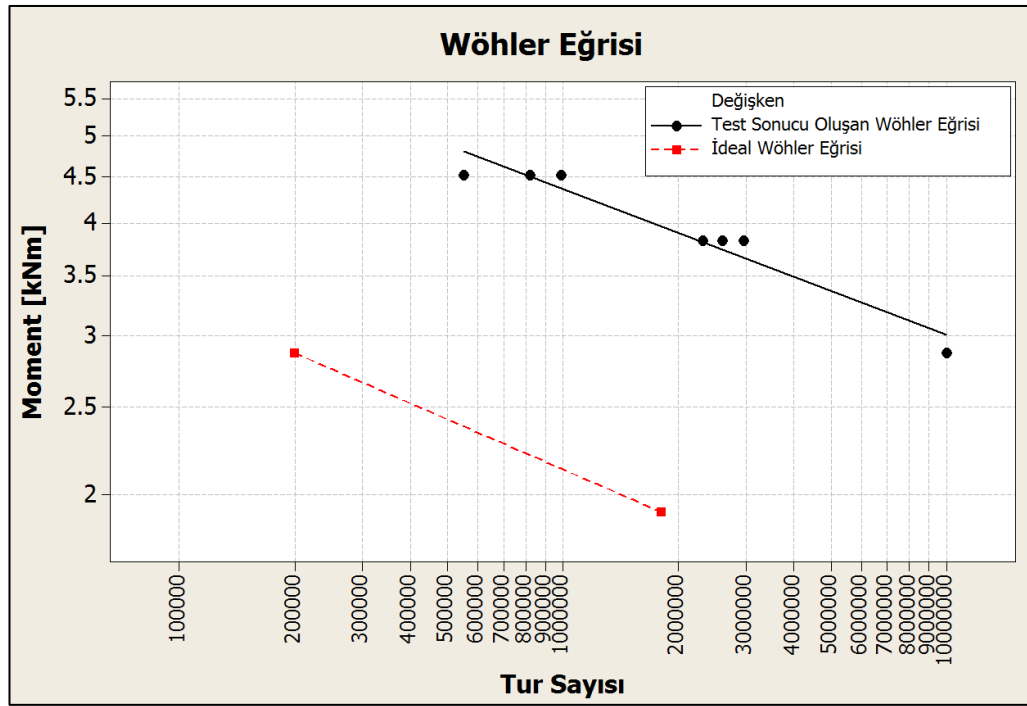
3.2.2 Hızlandırılmış ömür testi sonuçları

Hızlandırılmış ömür testi kapsamında, müşteri şartnamesinde belirtilen moment değerleri uygulanarak test gerçekleştirilir. Jantın ulaştığı ömür, o moment değeri için kaydedilerek, müşteri beklentisi olan minimum ömür şartını sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Ayrıca bu değerlerden oluşan Wöhler eğrisi çizdirilerek eğimi kontrol edilir. Daha önce çizelge 3.1’de verilen müşteri şartnamesine göre jantın ömrü ve moment değeri tablosuna göre test gerçekleştirilmiş ve sonuçları yorumlanmıştır. Buna göre, tüm jantların belirtilen moment değerlerinde ulaştığı ömür, çizelge 3.4’te verilmiştir. Buna göre ulaşılan tüm tur sayıları, müşteri beklentilerini karşılamaktadır.

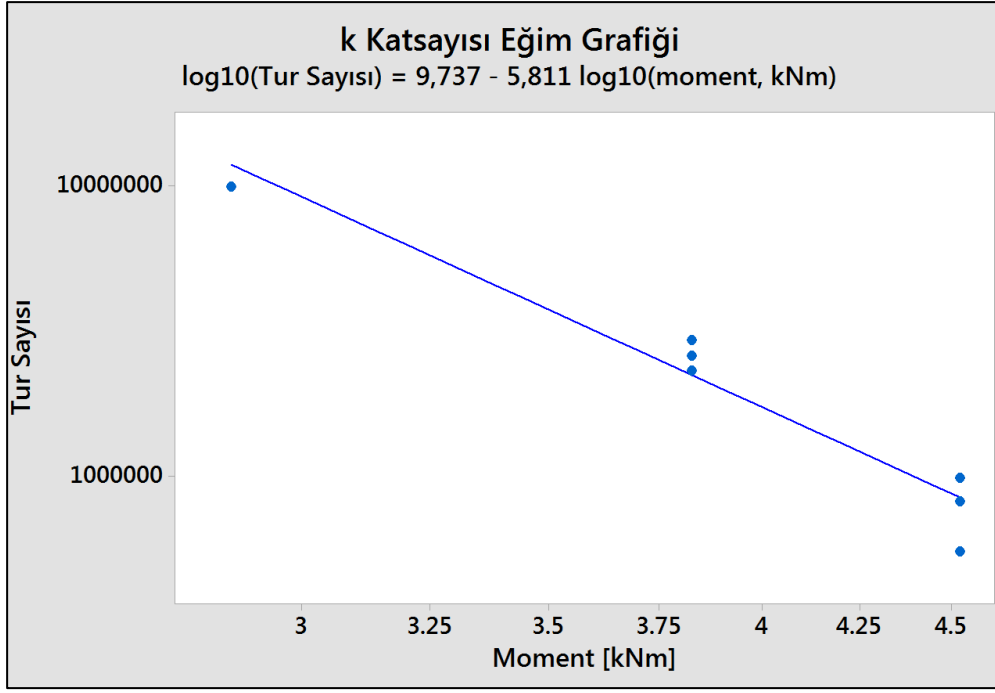
Çizelge 3.4: Test sonucu AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları ile üretilmiş jantların ulaştığı maksimum ömür değerleri.

S/N jant no.	Moment değeri [Nm]	Tespit edilen çatlaksız tur sayısı		Moment değeri [Nm]	Tespit edilen çatlaksız tur sayısı		Tespit edilen çatlaksız tur sayısı
		AlSi11Mg			AlSi7Mg		AlSi7Mg T6
5b	1	3828	1829449	3828	3150840	3828	2315521
6b	2	3828	1503709	3828	4426066	3828	2961325
7b	3	4524	571198	4524	1156075	4524	991053
8b	4	4524	341030	4524	1610100	4524	552264
9	5	3828	1647236	5220	356689	3828	1947300
10	6	4524	708185	5220	474900	4524	822834
11	7	2871	10000000	2871	10000000	2871	10000000

Test sonuçlarına ait Wöhler eğrileri de ilerleyen şekillerde verilmiştir. Wöhler eğrilerini doğru oluşturabilmek ve test süresini kısaltmak için, moment değerleri yükseltilmiştir, çünkü müşteri beklentisi olan 2871 Nm. moment altında 200000 tur sayısı için tüm jantlar 10^6 tur atmıştır. Jantı çatlatıp limit tur değerini görebilmek için moment değerleri yükseltilmiş, Wöhler eğrisi bu değerlere göre düzenlenmiştir. Buna göre Şekil 3.17’de AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilen jantlara ait Wöhler eğrisi, Şekil 3.18’de ise Wöhler eğrisi eğim değerini oluşturan grafik verilmektedir. Wöhler eğrisi grafiği üzerinde kesikli çizgi ile belirtilen eğri, minimum müşteri gerekliliğini temsil eder. Eğrinin eğimi ile ortaya çıkacak olan eğim değerlerinin birbirine yakın olması ve mavi eğriyi oluşturan tur sayılarının bu değerlerden büyük olması hedeflenir. Eğim değerinin hesaplandığı grafiğe göre, $k = 5,811$ değerindedir ve 5’ten büyük olduğu için uygundur. Bu kriterlere göre AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş jantlar, hızlandırılmış ömür test performansı açısından uygundur.

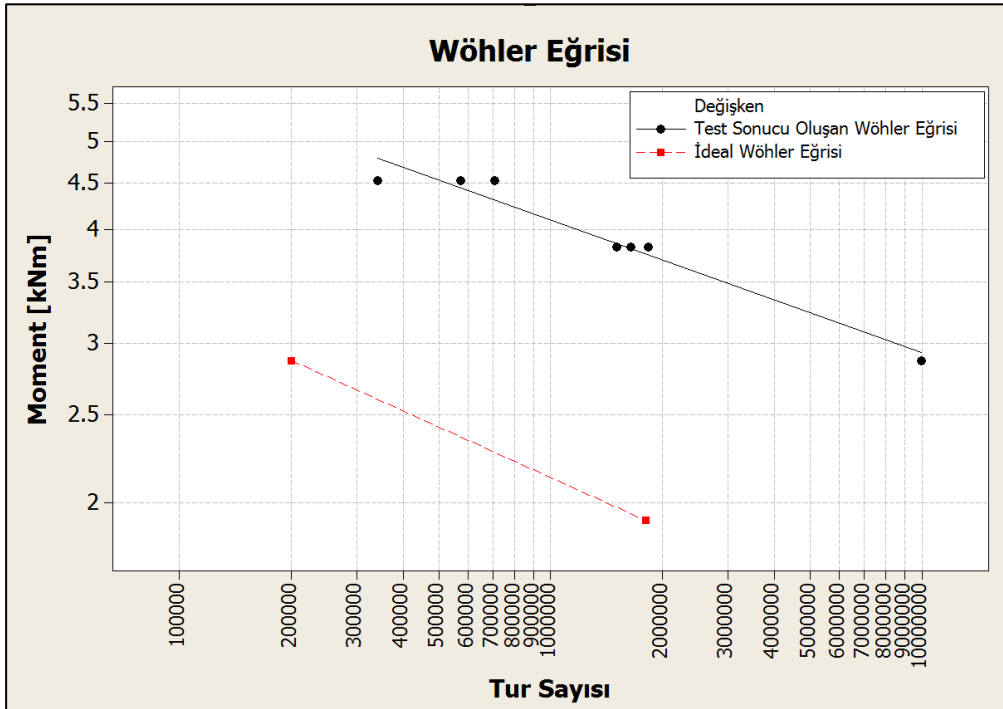


Şekil 3.17 : AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş janta ait Wöhler eğrisi.

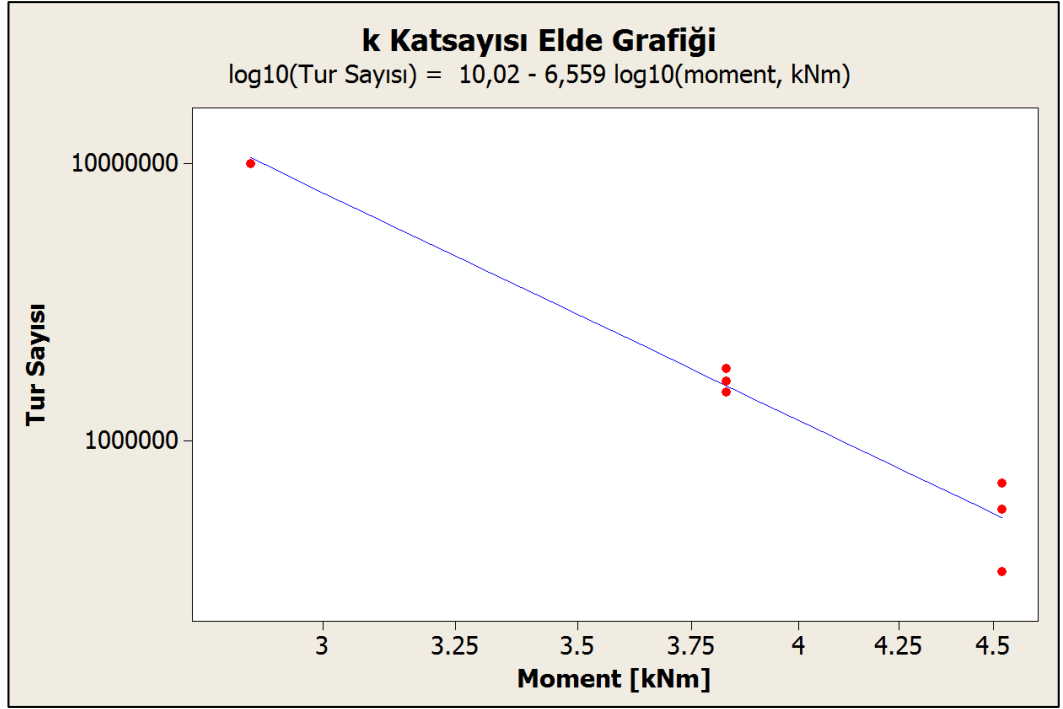


Şekil 3.18 : AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş janta ait k katsayısı eğim grafiği.

Şekil 3.19’da AlSi7Mg alaşımı ile üretilen jantlara ait Wöhler eğrisi, Şekil 3.20’da ise Wöhler eğrisi eğim değerini oluşturan grafik verilmektedir. Eğim değerinin hesaplandığı grafiğe göre, $k = 6,559$ değerindedir ve 5’ten büyük olduğu için uygundur. Bu kriterlere göre AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş jantlar, dinamik virajla hızlandırılmış ömür test performansı açısından uygundur.

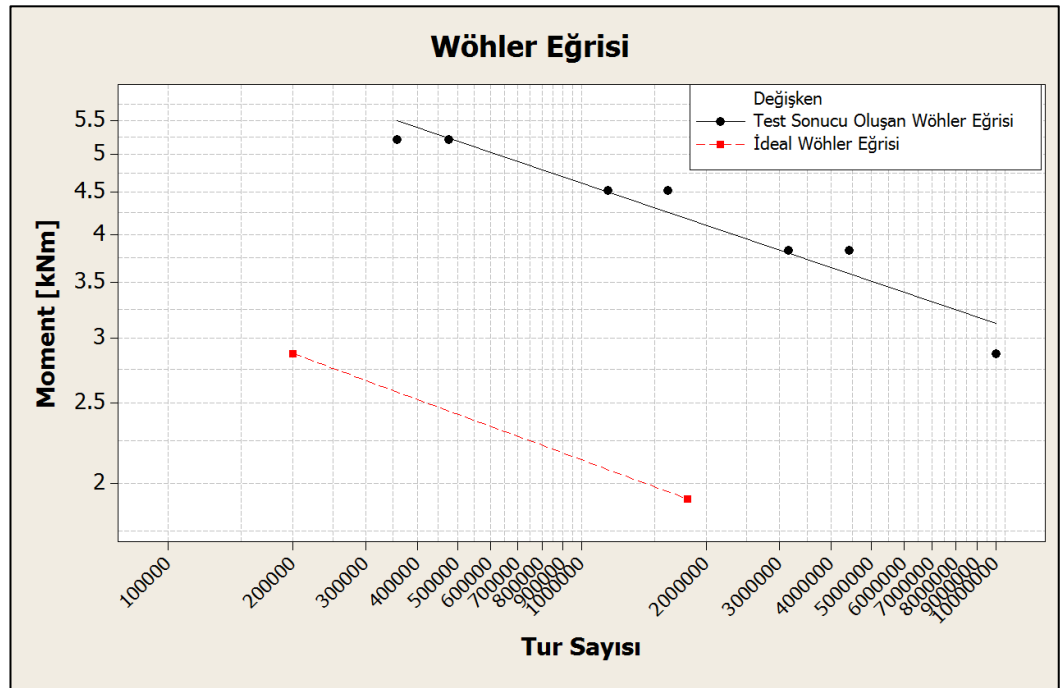


Şekil 3.19 : AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş janta ait Wöhler eğrisi.

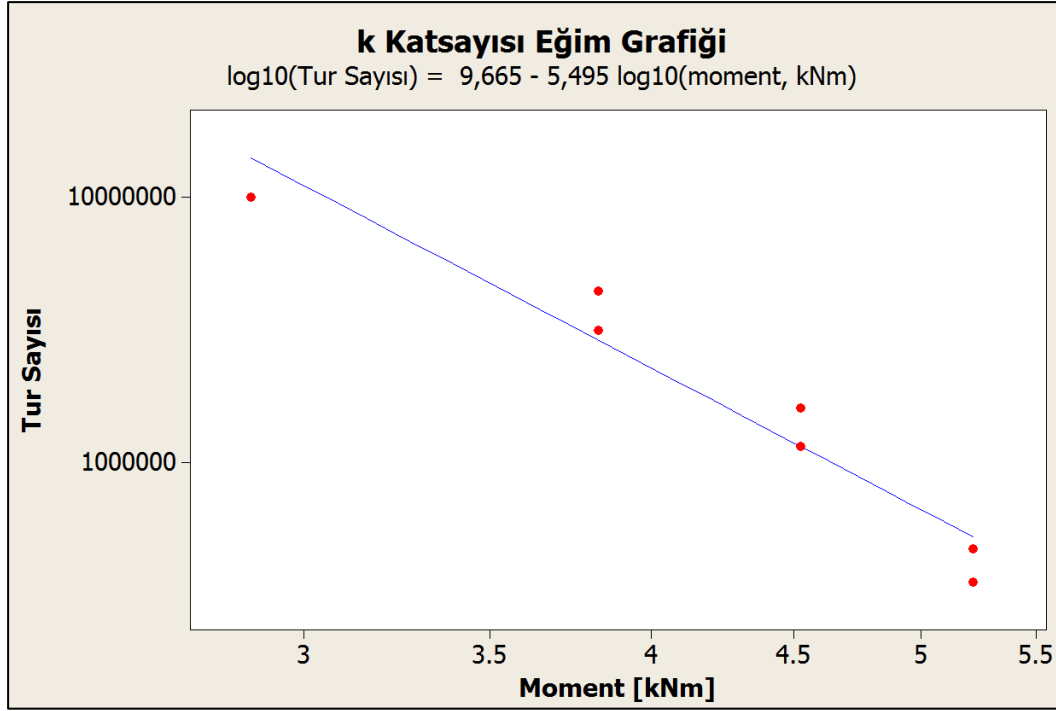


Şekil 3.20 : AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş janta ait k katsayısı eğim grafiği.

Şekil 3.21’de AlSi11Mg alaşımı ile üretilen jantlara ait Wöhler eğrisi, Şekil 3.22’de ise Wöhler eğrisi eğim değerini oluşturan grafik verilmektedir. Eğim değerinin hesaplandığı grafiğe göre, $k = 5,495$ değerindedir ve 5’ten büyük olduğu için uygundur. Bu kriterlere göre AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş jantlar, dinamik virajla hızlandırılmış ömür test performansı açısından uygundur.



Şekil 3.21 : AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş janta ait Wöhler eğrisi.



Şekil 3.22 : AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş janta ait k katsayısı eğim grafiği.

3.2.3 Kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal analiz, bölüm 2.1.3'te anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar aşağıdaki excel tablosunda listelenmiştir. Uygun olan değerler (+) ile işaretlenmiştir. %Si oranı, özellikle AlSi7Mg alaşımları için %Mg oranı, tane inceltme için kullanılan %Ti oranı ve modifikasyon elementi olarak kullanılan %Sr oranı, alaşımin metalurjik özellikleri açısından belirleyici olan elementlerdir. Yapılan kimyasal analiz sonucunda, her iki alaşım için de alaşımı oluşturan element yüzde oranları uygundur (Çizelge 3.5).

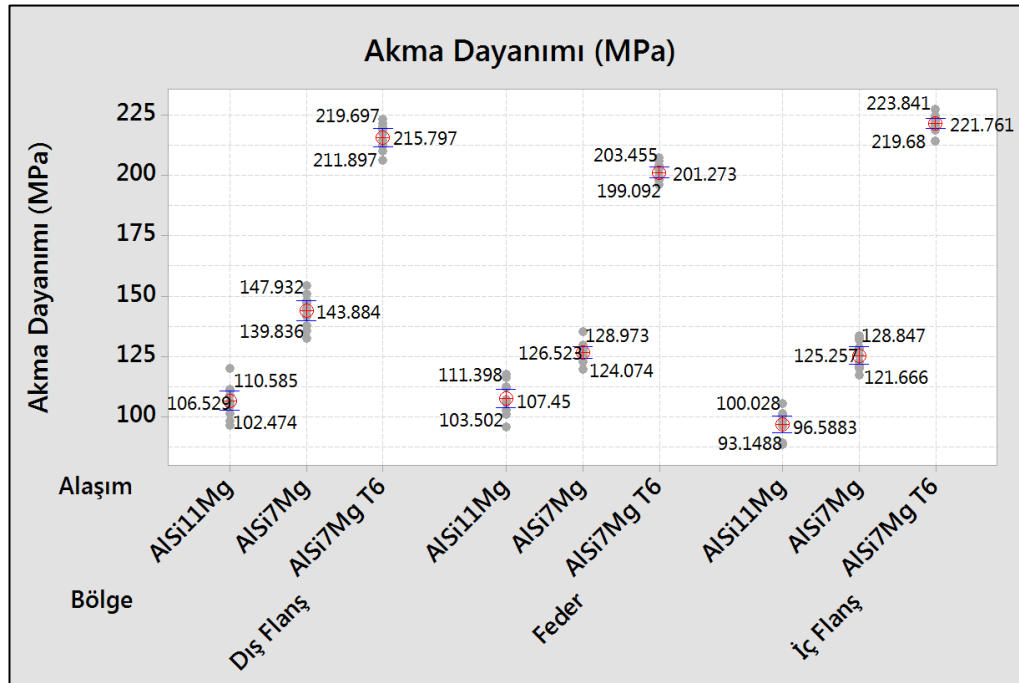
Çizelge 3.5: AlSi11Mg ve AlSi7Mg alaşımlarına ait kimyasal analiz sonuçları.

Alaşım [%]	Element	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Ca	Sn	Sr	Sb	P
AlSi11Mg	Maksimum	-	12	0.14	0.02	0.04	0.25	0.04	0.14	0.02	0.02	0.01	0.003	0.01	0.025	0.005	0.002
	Minimum	-	10.5	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
	Analiz sonucu	88.7255	10.8717	0.1095	0.0021	0.0024	0.1219	0.0026	0.1121	0.0018	0.0048	0.0006	0.0018	0.0001	0.0189	0.0000	0.0004
	Değerlendirme	Uygun	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
AlSi7Mg	Maksimum	-	7.5	0.14	0.02	0.04	0.4	0.04	0.15	0.02	0.02	0.01	0.003	0.01	0.025	0.005	0.002
	Minimum	-	6.5	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
	Analiz sonucu	92.3796	7.0900	0.0800	0.0020	0.0026	0.2900	0.0045	0.0970	0.0010	0.0060	0.0008	0.0006	0.0002	0.0200	0.0000	0.0001
	Değerlendirme	Uygun	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

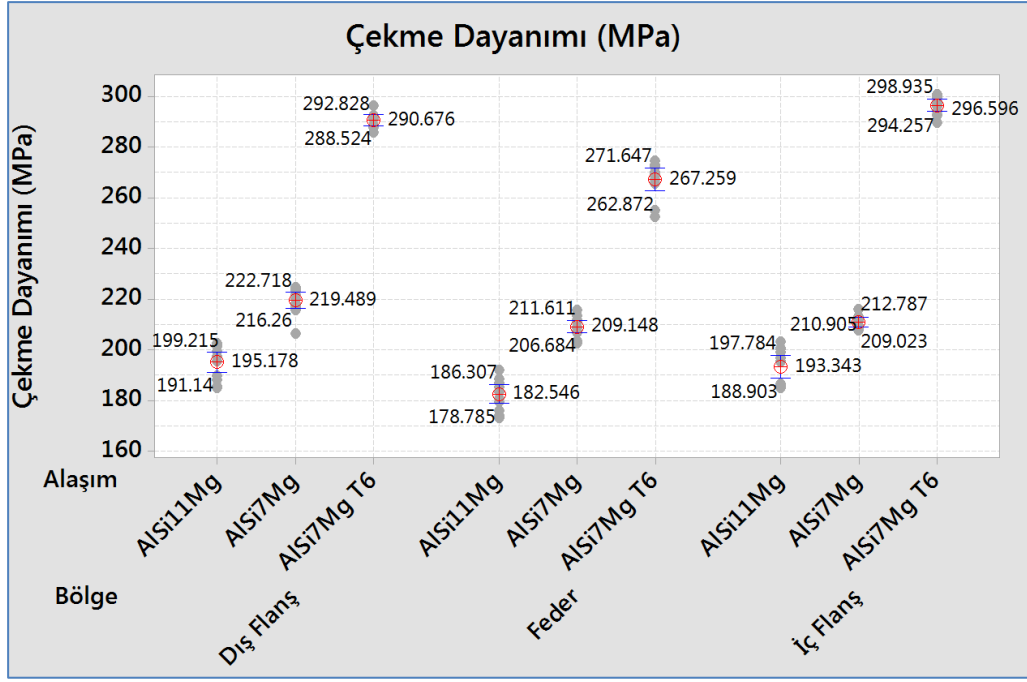
3.2.4 Çekme testi sonuçları

Jantlara ait çekme testi kapsamında, jantın iç flanş, dış flanş ve feder bölgelerinden alınan çekme çubuklarına ait akma, kopma ve kopma uzaması değerleri ortalaması sunulmuştur. Bu çubukların nereden alındığı daha önce bölüm 2.1’de şekil 2.1 ile gösterilmişti. Jantın müşteri tarafından belirlenmiş bölgelerinden alınan çekme çubuklarına ait akma, kopma ve kopma uzaması değerleri için müşteri tarafından belirlenen minimum değerler daha önce çizelge 2.1’de sunulmuştu.

Şekil 3.23 ve şekil 3.24’te, AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımlarına ait akma ve çekme gerilmesi değerleri sırasıyla sunulmuştur. Her bölgeden 12 adet çekme çubuğu ile gerçekleştirilen test sonuçları Minitab v16 programı ile değerlendirilerek sunulmuştur.

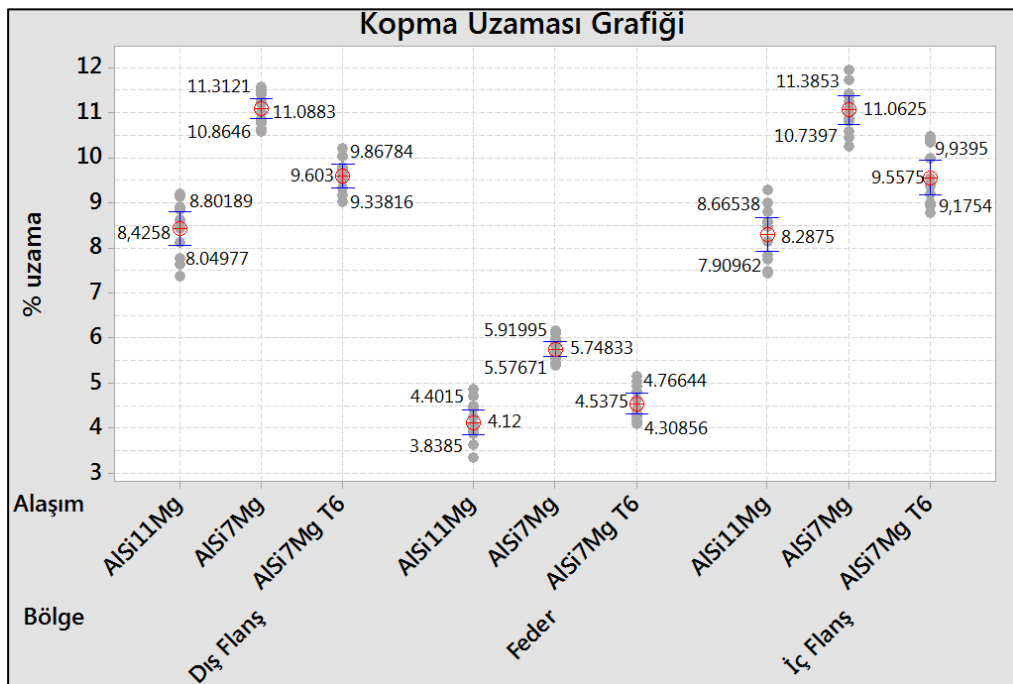


Şekil 3.23 : AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımlı jantlara ait feder, iç flanş ve dış flanş akma gerilmesi değerleri.



Şekil 3.24 : AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımlı jantlara ait feder, iç flanş ve dış flanş çekme gerilmesi değerleri.

Daha önce anlatıldığı gibi, en iyi dayanım değerlerine AlSi7Mg T6 alaşımında ulaşılmaktadır. Beklendiği üzere, AlSi11Mg alaşımına ait dayanım değerleri ise en düşük değerlerdir. Ancak tüm test sonuçları, bu tasarım için müşteri beklentilerinin karşılandığını gösterdiğinden, akma ve kopma değerleri anlamıda her üç alaşım da uygun olarak değerlendirilmiştir. Şekil 3.25'te AlSi7Mg, AlSi11Mg ve AlSi7Mg T6 alaşımlarına ait kopma uzaması sonuçları verilmiştir.

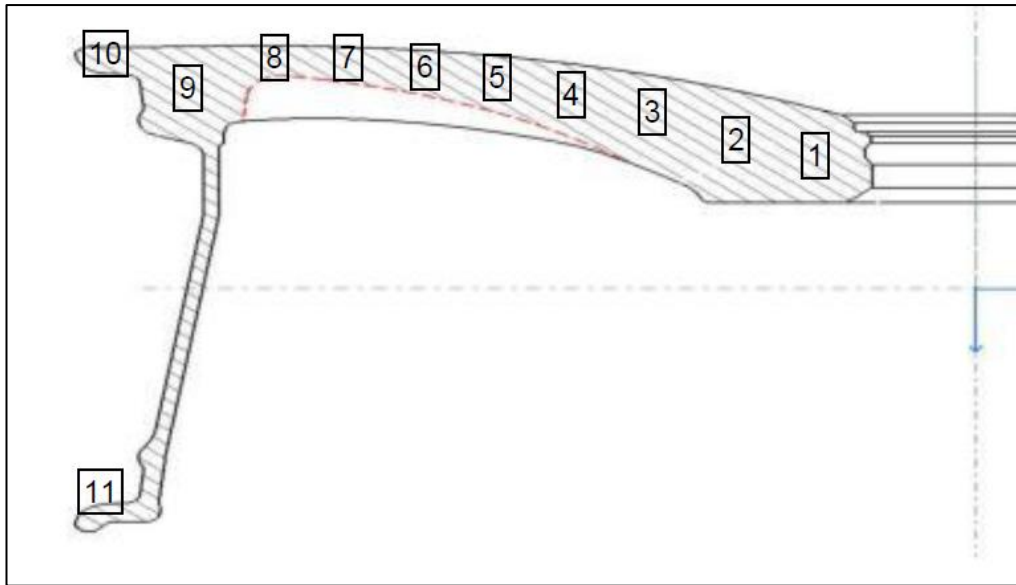


Şekil 3.25 : AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımlı jantlara ait feder, iç flanş ve dış flanş kopma uzaması değerleri.

En iyi kopma uzaması sonuçları, AlSi7Mg alaşımı ile üretilmiş jant üzerinden alınan çekme çubuğu örneklerinden alınmıştır. Teoriye göre, AlSi11Mg alaşımlarına ait kopma uzaması sonuçlarının daha yüksek olması beklenir, ancak bu durum, aynı döküm koşulları altında üretilen AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlı jantların kıyaslanmasında geçerli olabilir. Pratikte, AlSi11Mg alaşımı ile jant dökümünde katılaşma için yeterli süre olmadığından, soğutmalar AlSi7Mg alaşımına göre daha az efektifir. Soğuma hızı arttıkça, kopma uzaması değerleri artar. Bu nedenle AlSi7Mg kopma uzaması değerleri AlSi11Mg alaşımına kıyasla daha yüksektir. AlSi7Mg ve AlSi7Mg T6 alaşımlarına ait kopma uzaması değerleri kıyaslandığında ise, ısıtıl işlem sonrası dayanım artışının kopma uzaması değerlerinde bir miktar düşüşe sebep olduğu gözlemlenir. Ancak elde edilen değerlerin tamamı, müşteri beklentilerini karşıladığından, sonuçlar uygundur.

3.2.5 Sertlik testi sonuçları

Sertlik ölçüm sonuçları, bölüm 2.1.4.2’de anlatıldığı gibi Şekil 3.26’de gösterilen noktalar üzerinden alınmış ve sonuçlar yayınlanmıştır (Çizelge 3.6).



Şekil 3.26 : Brinell sertlik testi için jant kesidi üzerinde ölçüm alınan noktalar.

Çizelge 3.6: Sertlik ölçümü sonuçları.

Bölge	Alaşım					
	AlSi7Mg T6 (min 75 HB)		AlSi7Mg (min 60 HB)		AlSi11Mg (min. 55 HB)	
1	93	93.5	70.1	69.8	62.2	62
2	92.7	92.1	70.9	70.4	61.6	60.4
3	91.6	92.2	71.4	71	65.1	65.5
4	90.9	93	70.7	70.7	65.2	65.6
5	90.3	94	70.2	70.2	63.9	63.7
6	91.4	94.9	69.8	69.8	63.3	62.8
7	92.2	92.7	68.8	68.8	62.9	62.1
8	94	91.9	68.9	68.9	62.7	61.5
9	93.4	91.1	70.4	70.4	63.3	62.5
10	93.2	94.6	66.2	66.2	64.2	63.3
11	95	95.7	67.5	67.5	64.1	63.9

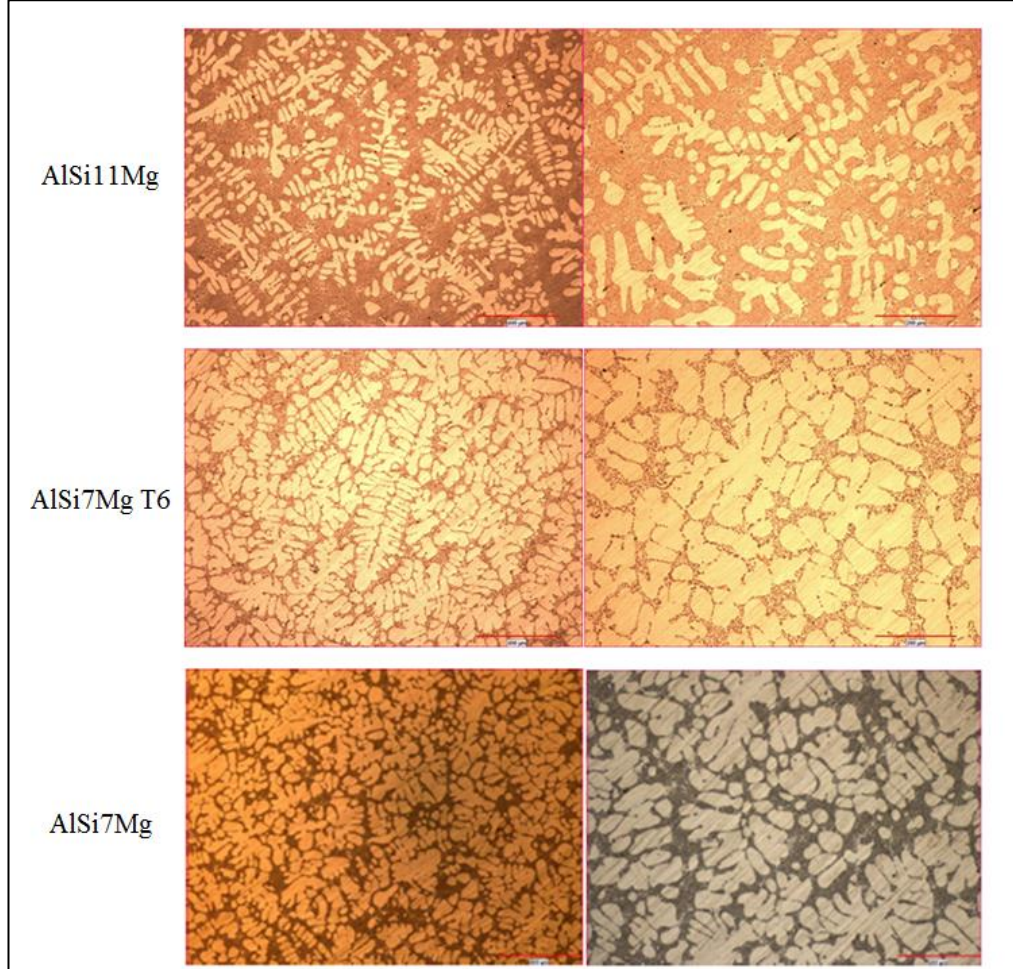
Ölçüm sonuçlarının tamamı, olması gereken minimum sertlik değerinin üzerinde olduğundan sertlik ölçüm sonuçları her üç alaşımla üretilen jantlar için uygun olarak değerlendirilmiştir.

3.2.6 Mikroyapı analiz sonuçları

AlSi7Mg ısıtıl işlemsiz, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımlı jantlara ait mikroyapı kontrolleri beş bölgede gerçekleştirilmiştir. Bu bölgeler göbek, feder, lastik yüzeyi, iç flanş ve dış flanş bölgeleridir. Bu bölgelerde yapılan mikroyapı kontrolleri ve gözlemler sırasıyla aktarılmıştır. Mikroyapı fotoğrafları, her alaşım için sol (400x) ve sağ (200x) olacak şekilde verilmiştir.

AlSi11Mg dış flanş mikroyapısına bakıldığında dendrit kollarının homojen dağıldığını görebiliriz. Yapıda oksit ve intermetalik bileşen bulunmamaktadır. AlSi11Mg mikroyapı içerisinde yüksek hidrojen oranı ile döküm yapılması nedeniyle düşük seviyede gaz boşlukları bulunmaktadır, bu boşluklar yapıda küçük siyah noktalar olarak görünürler. Hızlı katılaşma nedeniyle oluşan bu gaz boşlukları, X-ray kontrolünde fire oranına sebebiyet vermezler, çünkü hızlı katılaşma nedeniyle boyutları büyük değildir. Gaz boşluğu büyüklüğü yavaş katılaşma ile artar. AlSi11Mg alaşımında ötektik Si fazı fibröz yapıdadır, Sr modifikasyonu ile iğne şeklinde olan Si yapısı fibröz yapıya dönüşmüştür. Modifikasyon seviyesi yeterlidir. AlSi7Mg T6 dış flanş mikroyapısına bakıldığında; dendrit kollarının homojen dağıldığını görebiliriz. Oksit ve intermetalik bileşen bulunmamaktadır. Ötektik yapı

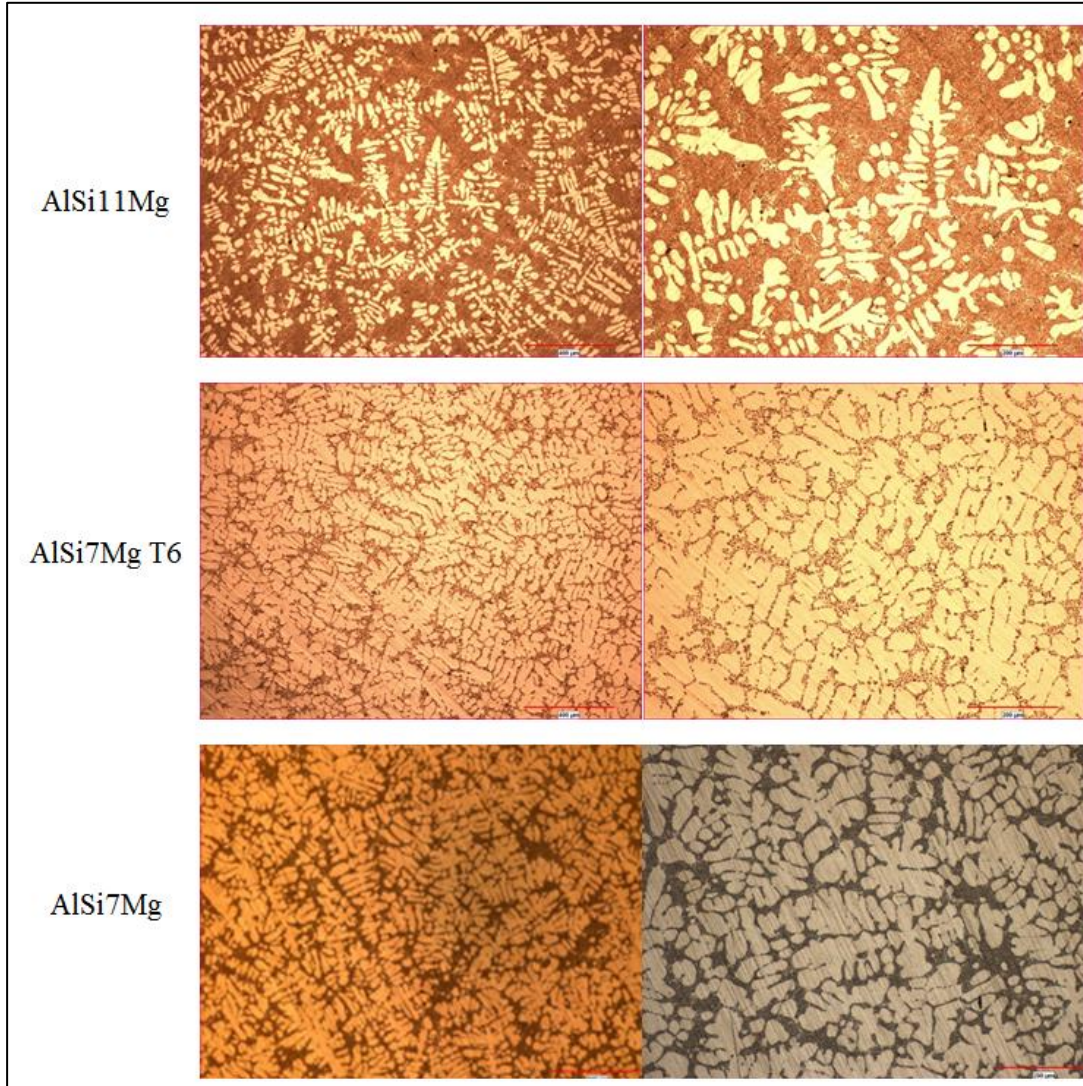
ısıtıl işlem sonrası küresel yapıdadır, AlSi7Mg T6'ya ait 200x büyütme olan sağdaki fotoğrafta görülebilir. AlSi7Mg dış flanş mikroyapısına bakıldığında dendrit kollarının homojen dağıldığını görebiliriz. Oksit ve intermetalik bileşen bulunmamaktadır. Ötektik yapı fibröz yapıda olup, modifikasyon seviyesi yeterlidir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 : AlSi11Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi7Mg dış flanş mikroyapı karşılaştırması.

AlSi11Mg iç flanş mikroyapısına bakıldığında dendrit kollarının homojen dağıldığını görebiliriz. Yapı içerisinde oksit ve intermetalik bileşen bulunmamaktadır. AlSi11Mg mikroyapısı içerisinde, yüksek hidrojen oranı ile döküm yapılması nedeniyle düşük seviyede mikro gaz boşlukları bulunmaktadır. Ötektik Si fazı fibröz yapıdadır. AlSi7Mg T6 iç flanş mikroyapısına bakıldığında dendrit kollarının homojen dağıldığını görebiliriz. Yapı içerisinde oksit ve intermetalik bileşenler bulunmamaktadır. Ötektik Si yapısı küresel yapıdadır, modifikasyon seviyesi iyidir. Dendrit yapısının içine yayılan siyah bölgelerden, yapı içerisinde az seviyede çekme boşluğu olduğu görülmektedir. AlSi7Mg iç flanş mikroyapısına bakıldığında, dendrit

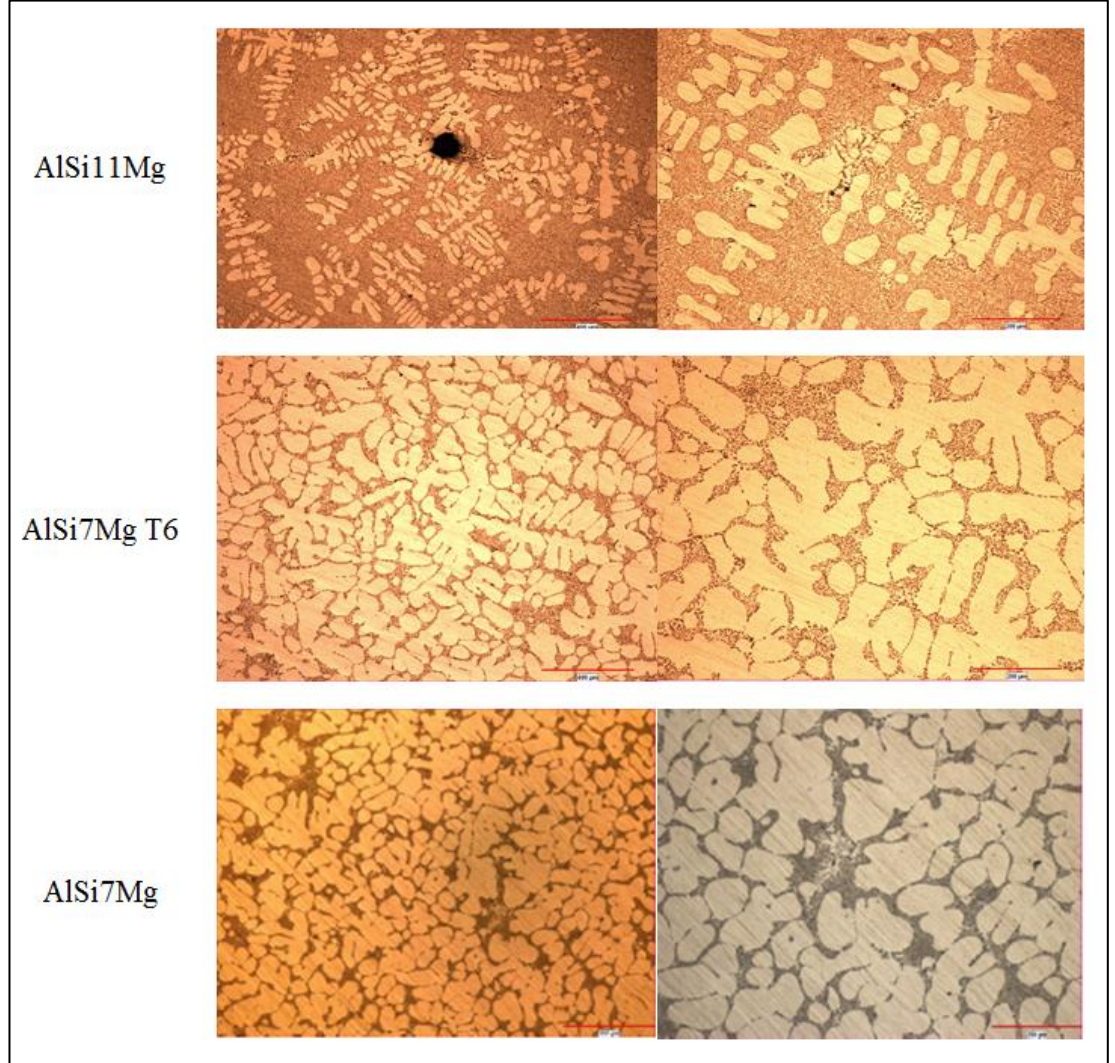
kollarının homojen dağıldığını görebiliriz. Yapı içerisinde oksit ve intermetalik bileşen bulunmamaktadır. Ötektik Si yapısı fibröz küresel yapıdadır, modifikasyon seviyesi iyidir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 : AlSi11Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi7Mg iç flanş mikroyapı karşılaştırması.

AlSi11Mg feder mikroyapısına baktığımızda dendrit kollarının homojen olarak dağıldığını görürüz. Ötektik yapı AlSi7Mg T6 alaşım için küresel, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları için fibröz olarak şekillenmiştir. Tüm mikroyapılarda modifikasyon iyi seviyededir. AlSi11Mg alaşımı mikroyapısı içerisinde, yüksek hidrojen oranı ile döküm yapılması nedeniyle kabul kriterlerinin üzerinde gaz boşluğu görünmüştür (Şekil 3.29). Yapı içerisinde ayrıca Fe-Mn ve Fe-Si intermetalikliği tespit edilmiştir (Şekil 3.30). AlSi7Mg T6 feder mikroyapısına bakıldığında, yapıda intermetalik oksit ve çekme boşluğu olmadığı görülür. AlSi7Mg

mikroyapısı içinde de intermetalik bileşen, oksit, çekme ve gaz boşluğu görülmemiştir. Bazı bölgelerde Fe-Mn intermetalliği yer almaktadır (Şekil 3.29).

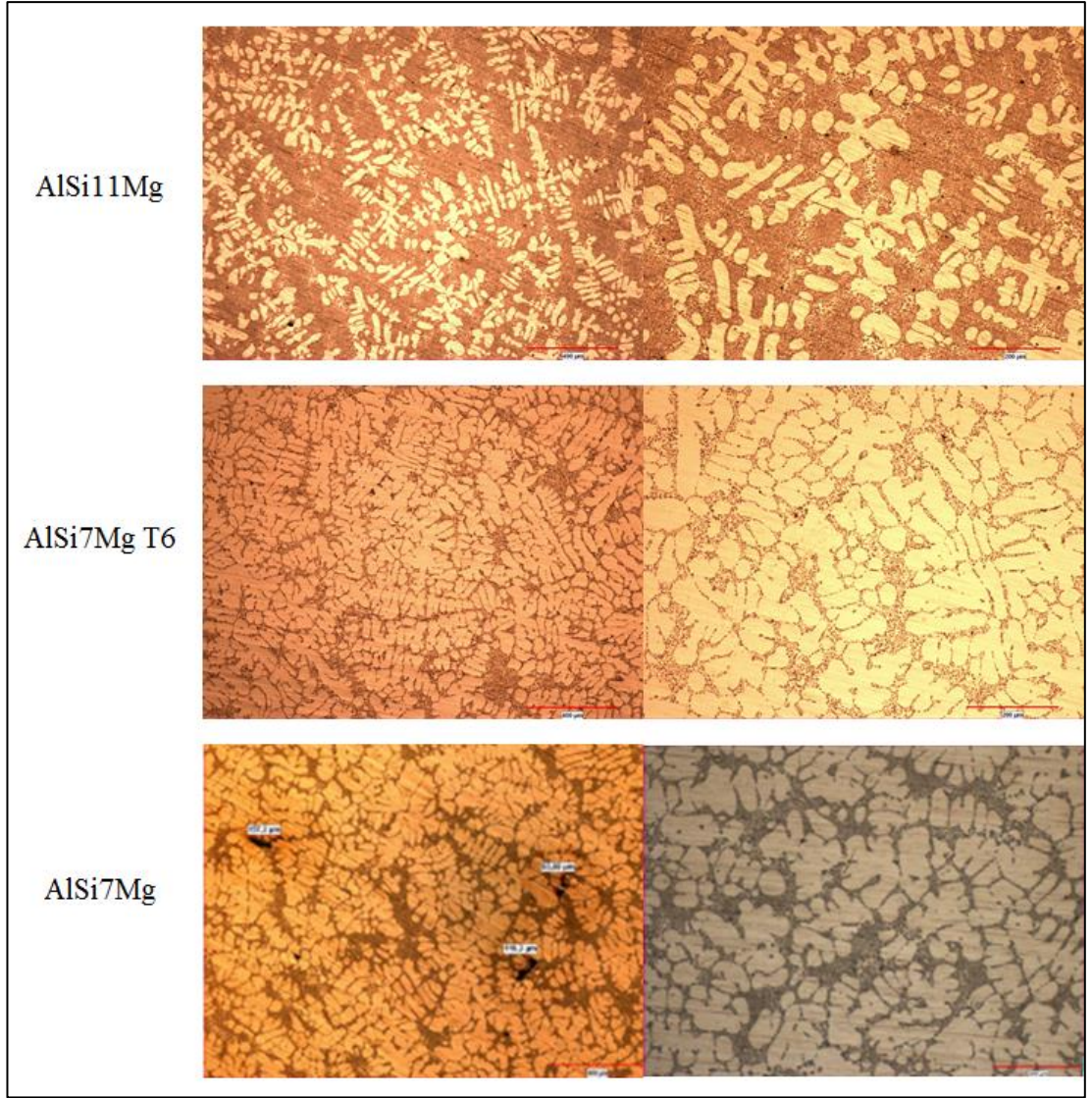


Şekil 3.29 : AlSi11Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi7Mg feder mikroyapı karşılaştırması.



Şekil 3.30 : AlSi11Mg mikroyapısı içerisinde gaz boşluğu (1) ve Fe-Mn intermetalik oluşumu (2).

AlSi11Mg alaşımına ait göbek mikroyapı incelemesinde, aluminyum dendritlerinin homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Yapı içerisinde Fe-Mn ve Fe-Si intermetalik bileşenleri bulunur. Ötektik yapı AlSi7Mg T6 alaşım için küresel, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları için fibröz olarak şekillenmiştir. Tüm mikroyapılarda modifikasyon iyi seviyededir (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 : AlSi11Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi7Mg göbek mikroyapı karşılaştırması.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

AlSi7Mg, AlSi11Mg ve AlSi7Mg T6 alaşımları ile ayrı ayrı tarihlerde aynı kalıp kullanılarak üretilen, çok kollu stil tasarımına sahip 6,5 J x 16” jantlara, yeni proje devreye alma sürecinde uygulanan tüm test ve simülasyon çalışmaları uygulanmış ve sonuçlar birbirileri ile kıyaslanmıştır. Bu test ve simülasyon çalışmaları yapılmadan, jantın farklı bir alaşım ile üretilmesinin uygun olup olmayacağına karar verilemez, onay süreci eksik olan jant üzerinde alaşım değişikliği yapılması müşteriler tarafından uygun bulunmayacağı için onaylanamaz. Yapılan çalışmalar sonucunda, tüm simülasyon ve test sonuçlarının uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak; ISO 7141 13° darbe testi +150 kg. yükle dahi uygun olan AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş jantlarda, AlSi7Mg T6 alaşımının kullanılmasının maliyet kaybı yaratacağı söylenebilir. Bu jantın müşteri beklentileri, hem AlSi7Mg hem de AlSi11Mg alaşımı ile üretilmiş bir jant ile de karşılanmaktadır. Özellikle maliyet anlamında daha uygun olan AlSi11Mg alaşımlı jantlar ile de yüksek yüklerde darbe testleri tekrarlanarak, ISO 7141 13° darbe testi sonuçları fazla güvenli ise kesitlerde inceltme yapılmak suretiyle hafifleştirme çalışmaları yapıp yapılmayacağına karar verilebilir.

AlSi11Mg alaşımı ile yapılmış döküm simülasyon sonuçlarına göre; topuk bölgesinde gaz boşluğu oluşumunun, kalıp tasarımı içerisine eklenen fazla soğutmayla giderilmesi gerekmektedir. Hem döküm simülasyonu, hem de mikroyapı analiz sonuçları o bölgede gaz boşluğu seviyesinin istenen değerlerin üzerinde olduğunu göstermektedir. Bu problem kalıp içerisine eklenecek bir soğutma ile giderilerek bu kalıp içerisinde AlSi11Mg alaşımı ile üretim yapılabilir.

Aşağıdaki çizelgede, AlSi11Mg, AlSi7Mg ve AlSi7Mg T6 alaşımları için dökülen ürün adedi, sağlam ürün adedi ve fire oranları yaklaşık olarak tanımlanmıştır. AlSi11Mg alaşımı ile birim zamanda dökülen ürün adedi yaklaşık %15-20 oranında daha fazladır. Bu rakam AlSi7Mg ve AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş jantlar için aynı ve yaklaşık olarak %17 kabul edilmiştir, çünkü ısıtılma işleminin getirdiği maliyet jant başına ayrıca hesaplanmaktadır. Bu değerler model bazında farklılıklar

göstermektedir, her jant tasarımı için aynı kabul edilemez. Bu nedenle verilen fire oranları bir yaklaşık değer olarak kabul edilmelidir.

AlSi11Mg alaşımı ile üretilmiş jantlara ait fire oranı yaklaşık %5, AlSi7Mg ile yaklaşık %10 ve AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilmiş jantlarda %18 olarak kabul ettiğimizde, döküm süreleri ile de birleştirerek 100 üründen elde edilen sağlam ürün sayısıkabaca hesaplanmıştır. Bu durumda AlSi11Mg alaşımı ile üretilen jantın birim fiyatı “x” olarak kabul edilirse, AlSi7Mg alaşımı ile üretilen jant için bu rakam 1,26x, AlSi7Mg T6 alaşımı ile üretilen jantın da $1,39x + 3$ € olarak hesaplanabilir. Bu durumda, x değerini yaklaşık 40 € olarak hesaplarsak, 1 AlSi11Mg alaşımlı jant 30 €, AlSi7Mg alaşımlı jant 37,8 € ve AlSi7Mg T6 alaşımlı jant 41,7 € olarak hesaplanabilir.

Sonuçta bu jantın 41,7 € yerine 30 €’ya üretilmesi, geçiş aşamasında harcanan mühendislik maliyetleri hariç, yılda 10000 adet satılan bir ürün için 100000 €’luk bir kazanç anlamına gelir.

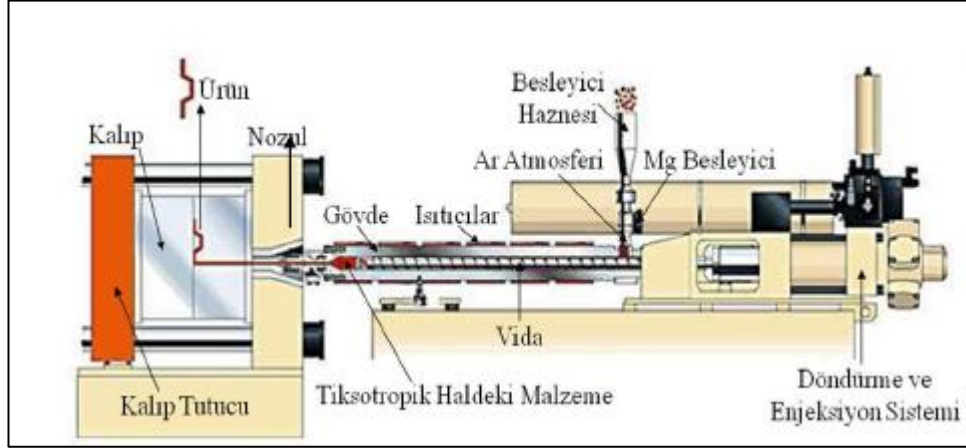
Çizelge 4.1: AlSi7Mg, AlSi7Mg T6 ve AlSi11Mg alaşımları ile üretilen jantlar için dökülen ürün adedi ve fire oranı.

Dökülen ürün adedi (t)			Sağlam ürün adedi			Fire oranı (%)		
AlSi11 Mg	AlSi7 Mg	AlSi7 Mg T6	AlSi11 Mg	AlSi7 Mg	AlSi7 Mg T6	AlSi11 Mg	AlSi7 Mg	AlSi7 Mg T6
100	83	83	95	75	68	5%	10%	18%

Alçak basınçlı alüminyum alaşım döküm yöntemi dışında binek araç jant üretiminde kullanılan yöntemlerden biri tikso kalıplama yöntemidir. Tikso şekillendirme yöntemlerinin alt başlığı olarak incelenen tikso kalıplama yönteminde üretim, diğer tüm tikso şekillendirme yöntemlerinde olduğu gibi; üç temel aşamadan oluşur. Bu adımlar sırasıyla; kimyasal tane inceltme, elektromanyetik karıştırma ve termomekanik işlemler ile ön malzemenin üretilmesi, ön malzemenin indüksiyon yardımı ile yarı katı yarı sıvı faza ısıtılması ve tikso kalıplama yöntemi ile şekillendirilmesi prensibine dayanır.

Bu yöntem, prensip olarak plastik enjeksiyona benzemektedir. Besleyici haznede 2 – 5 mm. olarak bulunan Mg talaşları, Ar atmosferi altında kalıba ulaşır. Isıtıcılar yardımı ile alaşım, dendritik olmayan küresel mikroyapıya sahip yarı katı hale gelmiş olur. Geleneksel döküm ve plastik enjeksiyon teknolojisinin bir araya geldiği bu

yöntemde, yoğunluğu yüksek ve karmaşık geometriye sahip ürünler elde edilmektedir. Tikso-kalıplama presi şekil 4.5’de şematik olarak gösterilmektedir [51].



Şekil 4.1: Tikso kalıplama presi [51].

Tikso şekillendirme tekniklerinin avantajları olarak; alaşıma laminar akış kazandırması, üretimde tam kontrol ve otomasyonu sağlaması, Düşük enjeksiyon sıcaklığı ve döküm süresinin kalıp ömrünü arttırması, kısa üretim çevrimi ve otomasyon sonucunda verimlilik artışı, ince kesitlerin doldurulması ve hafif parçaların şekillendirilmesini kolaylaştırması, son şekle yakın parça üretebilme kabiliyeti nedeniyle ihtiyaç duyulan ek proses adımlarının azalması, üretim sonrası işlemlerin azaltılması ve geleneksel döküm yöntemlerine göre %65 enerji tasarrufu sağlanması verilebilir. Geleneksel döküm yöntemlerinde meydana gelen türbülanslı sıvı akışı, gaz ve mikro çekme boşlukları, sıcak yırtılma ve segregasyon gibi döküm hataları azalır. Bu tekniğin dezavantajları ise, her alaşıma tiksotropik özellik kazandırma şekli ve enjeksiyon işlem parametreleri farklı olmasından ötürü en uygun özelliklerin deneysel olarak bulunabilmesi, tikso döküm için gerekli olan rheo döküm malzeme kaynağının yetersiz ve maliyetli olması, ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, profesyonel elemana ihtiyaç duyulması şeklinde sıralanabilir [52].

Tikso-kalıplama yöntemi ile otomotiv sektörüne yönelik parça üretimi, Japonya gibi bazı ülkelerde yapılabilmektedir. Üretilen parçaların dayanımlarının, geleneksel yöntemlere göre daha yüksek olması ve parçaların hafif olmaları, bu yöntemin lüks otomobil firmaları tarafından tercih edilmesini sağlamıştır. Bu firmalar için bu yöntem ile jant üretimi yapılabilmektedir [51]. Ancak orta sınıf araçlarda yüksek adette üretimlerde, maliyet avantajından ötürü alçak basınçlı alüminyum alaşım jant üretimi tercih edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Başer, T. A.** (2012). Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Mühendis ve Makina*. Cilt 53, Sayı 635, Sf. 51-58.
- [2] **Dal, K.** (2012). Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği Sektör Raporu. *Subcon Turkey*. Cilt 9, Sayı S-101.
- [3] **Url-1** <<http://www.cms.com.tr/>>, alındığı tarih: 12.11.2014
- [4] **Standards Manual.** (2014). Rims, *European Tyre and Rim Technical Organization*, Brüksel.
- [5] **Ron Cobden, Alcan ve Banbury.** (1994). Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys, *Training in Aluminium Application Technologies*, Lec. 1501, Sf. 20–21.
- [6] **Erdoğan, A.** (2008). Alüminyum ve Alaşımları. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [7] **Jacobs, M.H.** (1999). Aluminium: Introduction to Mechanical Properties, Solidification and Casting, Joining and Corrosion of Aluminium and its Alloys, *Training in Aluminium Application Technologies*, Lec. 1205, Sf. 8.
- [8] **The Aluminium Automotive Manual.** (2002). Products–Cast alloys and products, *European Aluminium Association*, Sf.25 – 30, Brüksel.
- [9] **Campbell, J.** (2002). *The New Metallurgy of Cast Metals - Castings*, University of Birmingham. West Walvern, Worcestershire, UK.
- [10] **The Aluminium Automotive Manual.** (2002). Manufacturing–Casting Methods, *European Aluminium Association*, Sf.81 – 82. Brüksel.
- [11] **Gruzleski, J.E. ve Closset, B.M.** (1990). *The Treatment of Liquid Aluminium–Silicon Alloys*, American Foundrymen's Society, Des Plaines, Illionis.
- [12] **Mondolfo, L.F.** (1976). *Aluminium Alloys – Structure and Properties*, Butterworhts, London – Boston.
- [13] **Liu,Z., Wang, M., Weng Y., Song T., Huo, Y. ve Xie, J.** (2003) Effect of Silicon on Grain Refinement of Aluminum Produced by Electrolysis, *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 10. Sf. 1 – 2.
- [14] **Demir, E.** Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Master Tezi 2008.
- [15] **Krishnan R., G. ve Somasekheran Nair, E.M.** (2013). Study of Strontium Modification in Aluminium Alloy, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, (ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 3, Issue 10, Sf. 753.
- [16] **ASM Handbook Comitee,** 1988: ASM Metals Handbook: Vol. 15 Casting, ASM International.
- [17] **Murray, J.L. ve McAlister, A.J.** (1984). *The Al-Si (Aluminium-Silicon) System*, Volume 5, Issue 1, pp 74-84.
- [18] **Ercan, Y. (2012).** Al-Si ötektik alaşımları, CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş., İzmir.

- [19] **Ertuğ, B., Odabaşı, A., Eruslu, N. ve Addemir, O.** (t.y.). *Döküm Parçalarında Distorsiyon*, İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Maslak.
- [20] **Url-2** <<http://www.mrl.ucsb.edu/~edkramer/LectureVGsMat100B/99Lecture14VGs/Al-SiPhaseDiagramVG.html/>> alındığı tarih: 15.10.2014
- [21] **Major J.F.** (1997). *Porosity Control and Fatigue Behaviour in A356 T6 Aluminium Alloy*, AFS Transactions, 97-94, pp. 901-906.
- [22] **Barresi, J., Kerr, M.J., Wang H., Couper, M.J.** (2000). *Effect of Magnesium, Iron and Cooling Rate on the Mechanical Properties of AlSi7Mg Foundry Alloys*, Transactions of American Foundryman Society, Pittsburgh.
- [23] **Gauthier, J., Louchez, P., Samuel, F.H.**, (1995). *Heat Treatment of 319.2 Al Automotive Alloy: Part 1, Solution Heat Treatment.*, vol.8, Transactions of American Foundryman Society, Pittsburgh.
- [24] **Mohamed, A.M.A., Samuel, F.H.** (2012). *A Review on the Heat Treatment of Al-Si-Cu/Mg Casting Alloys*, Heat Treatment-Conventional and Novel Applications, Dr Frank Czerwinski (Ed.), ISBN: 978-953-51-0768-2, InTech, DOI: 10.5772/50282.
- [25] **Url-3** <<http://www.alcoa.com/global/en/home.asp/>> alındığı tarih: 20.10.2014
- [26] **Url-4** <<http://www.jamak.com.tr/tr/>> alındığı tarih: 20.10.2014
- [27] **Topçuoğlu, Ö., Çe, Ö.B., Aybarç, U. ve Keskiç, M.** (2014). Alçak Basınç Döküm Prosesinde Kullanılan Kalıp Kaplama Malzemesinin Metal Akışkanlığına Etkisi, *7. Uluslararası Ankiros Döküm Kongresi*, İstanbul.
- [28] **Bonollo, F., Urban, J., Bonatto, B. ve Botter, M.** (2005). Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark. DTG - University of Padova, Vicenza.
- [29] **Dispınar, D. Akhtar, S. Nordmark, A., Di Sabatino, M. Ve Arnberg, L.** (2012). Correlation between Mechanical Properties and Porosity Distribution of A356 in Gravity Die Casting and Low Pressure Die Casting. *10.4028/www.scientific.net/AMR.445.28, Sf. 283-288.*
- [30] **Aran, A.** (2007). *Döküm Teknolojisi İmal Usülleri Ders Notları*. İstanbul.
- [31] **Metko Hüttenes Albertus Kimya.** (2013). *Demir ve Demirdışı Alaşımlar İçin Metal Tretmanları*. Türkdöküm, Sayı: 28. Sf. 60 – 62.
- [32] **Akın, Ü., Nurlu, M.** (2008). *Spiral Kaynaklı Çelik Hat Borularının Kaynak Dikişlerinin Radyoskopik Test Yöntemi İle Muayenesi*. 3. Uluslararası Tahribatsız Muayene Sempozyumu ve Fuarı. İstanbul, Türkiye.
- [33] **Demir, C. Menteşe, E.B., Togay, M.A.** (t.y.). *Aluminyum Isıl İşleminde Su Verme Uygulamaları Ve Kalıntı Gerilme Etkisi*. Componenta Döktaş, Manisa
- [34] **CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş.** (2010). *Dökülmüş Ürün Malzeme Şartnamesi*. İzmir.

- [35] **Url-5** <www.siempelkamp.com/index.php?id=2135&L=3&tx_ttnews%5Btt_news%5D=684&cHash=7b8ca67ec45a857d1f26c046d1b4c219> alındığı tarih: 17.11.2014
- [36] **Meurer, B., Haferkamp, D. ve Jörg, A.** (t.y.). *Use of simulation in the production of cast aluminium wheels*. Kronprinz Werke GmbH, Solingen.
- [37] **Ravi, B.** (2008). *Casting Simulation and Optimisation: Benefits, Bottlenecks and Best Practices*. Mechanical Engineering Department, Indian Institute of Technology, Bombay, Mumbai.
- [38] **Url-6** <<http://imechanica.org/files/0-overview%20Explicit.pdf>> alındığı tarih: 17.11.2014
- [39] **ISO 7141.** (2005). Road vehicles - Light alloy wheels - Impact test, *International Standard Organization*, Geneva.
- [40] **Url-7** <http://kisi.deu.edu.tr/zeki.kiral/CAD/Failure_Assesment.pdf> alındığı tarih: 20.11.2014
- [41] **Url-8** <<http://www2.mae.ufl.edu/nkim/eas4200c/VonMisesCriterion.pdf>> alındığı tarih: 20.11.2014
- [42] **Url-9** <<http://www.figes.com.tr/ansys/ansys-nedir.php/>> alındığı tarih: 25.11.2014
- [43] **CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş.** (2012). Hızlandırılmış Ömür Test Şartnamesi. İzmir.
- [44] **Url-10** <<http://metalurji.kocaeli.edu.tr/files/lab2/Foy.pdf/>> alındığı tarih: 25.11.2014
- [45] **DIN 50125.** (2009). Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben, *Deutsches Institut für Normung*, Berlin.
- [46] **CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş.** (2012). Çekme Testi Şartnamesi. İzmir.
- [47] **Url-10** <http://www.instron.us/wa/applications/test_types/hardness/brinell.aspx> alındığı tarih: 25.11.2014
- [48] **CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş.** (2012). Sertlik Ölçümü Şartnamesi. İzmir.
- [49] **ISO/IEC 17025. (2010).** General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, *International Standard Organization*, Geneva.
- [50] **CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş.** (2013). Mikroyapı İnceleme Şartnamesi. İzmir.
- [51] **Uğur, S.** ETIAL - 61 AlMgSi Alaşımının Yarı – Katı Metal Döküm Tekniği ile Şekillendirilmesi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [52] **Özer, M.** Yarı – Katı Döküm Tekniği ile Üretilen Al-Si Alaşımlarında Yapı – Özellik İlişkisinin İncelenmesi

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Didem Tarkun

Doğum Tarihi ve Yeri: 14.01.1987 / Karşıyaka

E-posta : didem.tarkun@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Proje yönetimi (Mevcut ürün geliştirme, kalite iyileştirme, yeni ürün devreye alma ve ürün maliyet azaltma) konusunda 6 yıllık deneyim
- CAD konusunda UG NX Siemens, CATIA V5, SolidWorks gibi farklı tasarım programları ile 6 yıllık deneyim (katı modelleme, drafting ve yüzey modelleme)
- CAE programları ANSYS Workbench, Abaqus ve Nastran sonlu elemanlar simülasyonları konusunda 2 yıllık deneyim (yapısal analiz ve modal analiz)
- 6 Sigma Kara Kuşak Sertifikası (11.2012 – BSH Academy Berlin Technology Center Laundry Care)
- Kaizen ödülü (2010) – BSH Ev Aletleri San. Ve Tic. A.Ş. - Çamaşır Makinası Fabrikası
- BSH Bosch Siemens Ev Aletleri Çamaşır Makinası Fabrikası Çerkezköy – Ürün Geliştirme Mühendisi (07.2009 – 06.2011)
- BSH Bosch Siemens Hausgeräte GmbH Berlin – Ürün Geliştirme Takım Lideri (06.2011 – 11.2012) – 6 Sigma Kara Kuşak Sertifikası
- Meditera Grup – Arge Proje Lideri (11.2012 – 08.2013)
- CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş. – Proje Lideri (08.2013 - ...)