

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALTERNATİF ALAŞIMLI JANT MALZEMESİ İLE MEKANİK
ÖZELLİKLERİ İYİLEŞTİRİLMİŞ ÜRÜN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur ÖZAYDIN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALTERNATİF ALAŞIMLI JANT MALZEMESİ İLE MEKANİK
ÖZELLİKLERİ İYİLEŞTİRİLMİŞ ÜRÜN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Onur ÖZAYDIN
(503101307)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 5031013017 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Onur ÖZAYDIN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ALTERNATİF ALAŞIMLI JANT MALZEMESİ İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİ İYİLEŞTİRİLMİŞ ÜRÜN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Şafak YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Nisan 2019**
Savunma Tarihi : **10 Haziran 2019**





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu çalışma sürecinde bana desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Adnan Dikicioğlu'na, bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için gerekli tüm fırsatları sunan Cevher Jant Sanayii'deki tüm iş arkadaşlarıma, özellikle Sn. Ali Öktem'e, Sn. Elvan Armakan'a, Sn. Oğuz Özmen'e ve Cevher Jant Ailesine teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde bana destek olan Anneme, Babama ve Ablama teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Nisan 2019

Onur Özaydın
Makine Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	4
1.3 Alüminyum Döküm	7
1.3.1 Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması	8
1.3.2 Al-Si alaşımları	9
1.3.3 Faz diyagramları	10
1.3.4 Mikroyapı	11
1.3.5 Mekanik özellikleri artırıcı geliştirme çalışmaları	12
1.3.5.1 Tane inceltme	12
1.3.5.2 Modifikasyon	14
1.3.5.3 Isıl İşlem	15
1.3.6 Döküm hataları	16
1.4 Alüminyum Alaşımlı Jant Dökümü	19
2. MALZEME VE YÖNTEMLER	29
2.1 Malzeme	29
2.2 Tasarım Doğrulamada Sayısal Yöntem	35
2.2.1 Yorulma test simülasyonu	36
2.2.2 13° Darbe test simülasyonu	38
2.3 Ürün Doğrulamada Sayısal Yöntem	39
2.4 Tasarım Doğrulamada Deneysel Yöntem	42
2.4.1 Yorulma testi	43
2.4.2 13° darbe testi	45
2.5 Ürün Doğrulamada Deneysel Yöntem	47
3. BULGULAR	49
3.1 Malzeme Bulguları	49
3.2 Sayısal Yöntem Bulguları	52
3.3 Deneysel Yöntem Bulguları	63
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	71
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	77



KISALTMALAR

AFS	: American Foundrymen's Society
AHSS	: Advanced High Strength Steel
ATDN	: Analysis Thermal-Voltage-Derivative
DAS	: Dendrite Arm Spacing
EV	: Electric Vehicle
HF	: Hydrogen Fluoride
LPDC	: Low Pressure Die Casting
OES	: Optical Emission Spectrometry
SEM / EDS	: Scanning Electron Microscopy / Energy Dispersive Spectroscopy
SiC	: Silicon Carbide
UTS	: Ultimate Tensile Strength
YS	: Yield Strength



SEMBOLLER

e	: Jantın offset (ET değeri) değeri
M	: Eğilme momenti
q	: Lastik ile yol arasındaki sürtünme katsayısı
r	: Statik yük uygulanmış lastik yarıçapı değeri
Sm	: Test faktörü
W	: Maksimum statik jant yükü



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması.	8
Çizelge 1.2 : Alüminyum döküm alaşımlarının temper sınıflandırılması.	9
Çizelge 2.1 : İlgili alüminyum alaşımlarının kimyasal analizi.	30
Çizelge 2.2 : İlgili alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri.	31
Çizelge 3.1 : Alternatif malzeme (AlSi9Mg) kimyasal analiz sonuçları.	49
Çizelge 3.2 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantın sertlik sonuçları.	51
Çizelge 3.3 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantların mekanik özellik sonuçları..	52
Çizelge 3.4 : Kuvvet adımları ve bileşke kuvvet bileşenleri.	57
Çizelge 3.5 : Isıl işlem şartları.	64
Çizelge 3.6 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantların mekanik özellik sonuçları..	68
Çizelge 3.7 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantların yorulma sonuçları.	70
Çizelge 3.8 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantların darbe sonuçları.	70



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Al – Si faz diyagramı.	11
Şekil 1.2: Tane inceltme mekanizması.	13
Şekil 1.3: Sr modifikasyonunun mikroyapıya etkisi.....	14
Şekil 1.4: İnklüzyon örneği.....	17
Şekil 1.5: EDS ile inklüzyon analizi (a- selected area 1, b- selected area 2, c- EDS Spot 1, d-EDS Spot 2).....	17
Şekil 1.6: Türbülanslı dökümün şematik görüntüsü.	18
Şekil 1.7: Alüminyum alaşımlı jant üretim iş akışı şeması.	20
Şekil 1.8: Ergitme ocağı.	21
Şekil 1.9: AlTi ₅ B ₁ , AlSr ₁₅ ve Mg malzeme eklentileri.	22
Şekil 1.10: Azot (N) gazı vererek gaz giderme süreci.	22
Şekil 1.11: Transfer potasından bekletme ocağına transfer.	23
Şekil 1.12: Alçak basınç döküm tezgahı.	23
Şekil 1.13: Alçak basınç dökümün şematik gösterimi.	24
Şekil 1.14: X-Ray kontrol odası.	24
Şekil 1.15: Isıl işlem tesisi.	25
Şekil 1.16: Helyum sızdırma testinin şematik gösterimi.	26
Şekil 1.17: Boya sürecindeki toz boya uygulaması.	26
Şekil 1.18: Boya sürecindeki yaş boya uygulaması.....	27
Şekil 2.1: Kimyasal içeriği ölçülen numune örneği.....	30
Şekil 2.2: Çekme test cihazı.	31
Şekil 2.3: Brinell sertlik ölçüm cihazı.	32
Şekil 2.4: Jant kesitinde sertlik ölçümü alınan bölgeler.	33
Şekil 2.5: Optik mikroskop.....	33
Şekil 2.6: AlSi9Mg mikro yapı örneği.	34
Şekil 2.7: AlSi9Mg jant kesit mikro yapı örneği.	34
Şekil 2.8: Yorulma test simülasyonu için tanımlanan geometri.	36
Şekil 2.9: Yorulma test simülasyonu için sınır şartları.....	37
Şekil 2.10: 13° Darbe test simülasyonu için tanımlanan geometri.	38
Şekil 2.11: Döküm simülasyonu için geometri tanımlama.....	40
Şekil 2.12: Döküm simülasyonu için ağ yapısı.	41
Şekil 2.13: Döküm simülasyonu proses adımları.	41
Şekil 2.14: Yorulma test cihazı.....	43
Şekil 2.15: Santrifüj etkisini oluşturan ağırlık.	44
Şekil 2.16: 13° Darbe test cihazı.	45
Şekil 2.17: 13° Darbe test düzeneği.....	46
Şekil 2.18: 13° Darbe test aparatı detayı.	46
Şekil 2.19: Deneme döküm tezgahı.	47
Şekil 3.1 : Alternatif alaşımlı (AlSi9Mg) jantın makroyapısı.	50

Şekil 3.2 : Alternatif alaşım (AlSi9Mg) jantın mikroyapısı (a : iç flanş – X50, b: iç flanş – X100, c: dış flanş – X50, d: dış flanş – X100, e: feder X50, f: feder - X100).	50
Şekil 3.3 : Alternatif alaşım (AlSi9Mg) jantta metal akışı.	53
Şekil 3.4 : Alternatif alaşım (AlSi9Mg) jantta metal dolmuş akış yönü.	53
Şekil 3.5 : Sıvı metal oranı yaklaşık %90 oranındaki katılaşma durumu.	54
Şekil 3.6 : Sıvı metal oranı yaklaşık %60 oranındaki katılaşma durumu.	54
Şekil 3.7 : Sıvı metal oranı yaklaşık %30 oranındaki katılaşma durumu.	55
Şekil 3.8 : Proses şartları değiştirilerek porozitenin azaltılması (sağda).	55
Şekil 3.9 : Kuvvet adımlarının jant üzerinde oluşturduğu eşdeğer gerilme değerleri.	57
Şekil 3.10 : Şafta tanımlanan kuvvet yönleri (a: 1. Adım 4°, b: 12. Adım 48°, c: 18. Adım 72°).	58
Şekil 3.11 : Jant ön yüz max. eşdeğer gerilme (Von Mises).	58
Şekil 3.12 : Jant arka yüz max. eşdeğer gerilme (Von Mises).	59
Şekil 3.13 : 13° Darbe test simülasyonu için ağ yapısı (<i>mesh</i>) kurulmuş sistem.	60
Şekil 3.14 : 13° Darbe test simülasyon adımları.	61
Şekil 3.15 : 13° Darbe test simülasyonuna göre riskli bölgeler.	61
Şekil 3.16 : 13° Darbe test simülasyonuna göre riskli bölgedeki eleman seçimi.	62
Şekil 3.17 : 13° Darbe test simülasyonuna göre riskli bölgede değerlendirilmesi. ...	62
Şekil 3.18 : Kalıp hazırlığı ve deneme döküm başlangıcı.	63
Şekil 3.19 : Alternatif malzeme ile dökülen jant örnekleri.	63
Şekil 3.20 : Fırın içi sıcaklık ölçümlerinin alındığı önemli jant bölgeleri.	64
Şekil 3.21 : Isıl işlem şartlarının jant üzerinde tanımlı bölgelerindeki değerleri.	65
Şekil 3.22 : 165°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin akma dayanımına etkisi.	66
Şekil 3.23 : 165°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin çekme dayanımına etkisi.	66
Şekil 3.24 : 165°C’de farklı sürelerde uygulanan ısıl işlemin birim uzamaya etkisi.	66
Şekil 3.25 : 180°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin akma dayanımına etkisi.	67
Şekil 3.26 : 180°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin çekme dayanımına etkisi.	67
Şekil 3.27 : 180°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin birim uzamaya etkisi.	67
Şekil 3.28 : Tüm ısıl işlem deneme şartlarının akma dayanımına etkisi.	69
Şekil 3.29 : Tüm ısıl işlem deneme şartlarının çekme dayanımına etkisi.	69
Şekil 3.30 : Tüm ısıl işlem deneme şartlarının birim uzamaya etkisi.	69

ALTERNATİF ALAŞIMLI JANT MALZEMESİ İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİ İYİLEŞTİRİLMİŞ ÜRÜN GELİŞTİRMESİ

ÖZET

Alçak basınç döküm yönteminin kullanıldığı alüminyum alaşımli jant üretiminde AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları kullanımı en yaygın olan malzemelerdir. Bu iki ana malzeme arasındaki büyük fark ısıtma işlemi süreci olup, AlSi7Mg malzemesine T6 (Çözeltiye alma - Suverme - Yapay yaşlandırma) ısıtma işlemi uygulanırken AlSi11Mg malzemesine ısıtma işlemi uygulanmaz.

Bu çalışmada, AlSi7Mg ve AlSi11Mg arasında farklı Si konsantrasyonuna sahip alternatif alaşımli (AlSi9Mg) jant malzemesi ve bu malzemenin mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla bir ürün geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmadaki alternatif alaşımli jantın tüm sayısal ve deneysel çalışmalar ‘Cevher Jant Sanayii A.Ş.’de gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın başlangıcında bu çalışmada hazırlanan alternatif alaşımli literatürdeki uygulamaları incelenmiştir. Literatürde, çalışılan alternatif alaşımli farklı numune parça ve motor parçalarının dökümünün gerçekleştirildiği görülmüş fakat bu alternatif alaşımli jant dökümü yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durum, çalışmaya kendi alanında özgünlük getirmektedir. Alternatif alaşımli mekanik özelliklerinin artırılmasına yönelik çalışmalar incelendiğinde ise tane inceltme çalışmaları, modifikasyon çalışmaları ve ısıtma işlemi çalışmaları olduğu görülmüş ve alternatif alaşımli jantın mekanik özelliklerinin artırılabilmesi için bu geliştirme çalışmaları uygulanmıştır.

Jant ürünü için mevcutta takip edilen tasarım doğrulaması ve ürün doğrulaması süreci, alternatif alaşımli jant için de aynen uygulanarak ürünün doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama çalışmaları sayısal olarak ve deneysel olarak yapılmıştır. Tasarım doğrulamanın ilk adımında, alternatif alaşımli jant için Ansys yazılımının Workbench ve LS-Dyna modülleri kullanılarak sayısal yöntem yaklaşımı ile yorulma test simülasyonları ve 13° darbe test simülasyonları gerçekleştirilmiş ve tasarım sayısal olarak doğrulanmıştır. Ürün doğrulamanın ilk adımında ise alternatif alaşımli jant için MagmaSoft yazılımının MagmaWheel modülü kullanılarak sayısal yöntem yaklaşımı ile döküm simülasyonu gerçekleştirilmiş ve ürün sayısal olarak doğrulanmıştır.

Tasarım ve ürün doğrulamanın sayısal doğrulaması sonrası tasarım ve ürün doğrulamanın deneysel doğrulaması adımına geçilmiştir. İlk adımında sayısal olarak doğrulanan tasarımın ikinci adımında yorulma testi ve 13° testi alternatif alaşımli dökülen jantlara deneysel olarak uygulanarak tasarım deneysel olarak doğrulanmıştır. Ürün doğrulamanın ikinci adımında ise deneme dökümleri gerçekleştirilerek ürün deneysel olarak da doğrulanmıştır.

Deneysel yöntemler esnasında, mekanik özelliklerin artırılmasına yönelik geliştirme çalışmaları esnasında farklı ısıtma işlem sıcaklıkları (165 °C - 180 °C) ve farklı ısıtma işlem

uygulama süreleri (2 saat – 4 saat – 6 saat) denemeleri yapılarak mekanik özelliklerin artırılması üzerine çalışılmıştır.

2 saatten 6 saate kadar 165 °C’de, feder bölgesinde akma dayanımı ort. %14 artmakta, çekme dayanımı ort. %3 artmakta ve birim uzama ort. %16 azalmaktadır. Dış flanş bölgesinde akma dayanımı ort. %13 artmakta, çekme dayanımı ort. %3 artmakta ve birim uzama ort. %7 azalmaktadır. İç flanş bölgesinde akma dayanımı ort. %11 artmakta, çekme dayanımı ort. %4 artmakta ve birim uzama ort. %2 azalmaktadır.

2 saatten 6 saate kadar 180 °C’de, feder bölgesinde akma dayanımı ort. %21 artmakta, çekme dayanımı ort. %6 artmakta ve birim uzama ort. %30 azalmaktadır. Dış flanş bölgesinde akma dayanımı ort. %22 artmakta, çekme dayanımı ort. %7 artmakta ve birim uzama ort. %8 azalmaktadır. İç flanş bölgesinde akma dayanımı ort. %18 artmakta, çekme dayanımı ort. %5 artmakta ve birim uzama ort. %13 azalmaktadır.

Bulgular kısmında, öncelikle malzeme özelliklerinin incelendiği mikro yapı, makro yapı ve sertlik ölçümleri malzeme bulguları olarak incelenmiş, alternatif malzemenin uygunluğu kontrol edilmiştir. Bundan sonra, tasarım ve ürün doğrulama esnasında kullanılan sayısal yöntemlerden elde edilen yorulma test, 13° Darbe test bulguları ve döküm simülasyonlarından elde edilen bulgular incelenmiş ve alternatif alaşımlı jantın sayısal olarak uygunluğu kontrol edilmiştir. Daha sonra, tasarım ve ürün doğrulama esnasında kullanılan deneysel yöntemlerdeki deneme dökümlerinden elde edilen bulgular incelenmiş ve alternatif alaşımlı jantın deneysel olarak da uygunluğu kontrol edilmiştir.

Bulguların analizi adımıında, ısı işlem sürecinde artan sıcaklık değerleri ve artan uygulama süreleri ile akma ve çekme değerlerinde artış görünürken, birim uzama değerlerinde düşme görülmüştür. Arttırılması talep edilen mekanik özelliklere (akma dayanımı, çekme dayanımı, birim uzama) göre uygun ısı işlem şartlarının alternatif alaşımlı jantlara uygulanabileceği görülmüştür.

Tüm bulgular ve analiz sonuçlarına göre ilgili jant için alternatif alaşımın ‘uygun’ olarak kullanılabilceği ve mekanik özelliklerinin arttırılabilmesi için de ısı işlem uygulanabileceği görülmüştür.

Son olarak, alternatif alaşımın uygunluğu ile ilgili döküm parametreleri, kalıp soğutma sistemi ve ısı işlem prosedürüne göre alındığı not edilmelidir. Bunun yanında, farklı döküm parametreleri, kalıp soğutma sistemleri ve ısı işlem prosedürü uygunluk durumunu direkt olarak etkileyebilir. Bu sebeple, alüminyum alaşımlı jant endüstrisi ile ilgili araştırmacılar alternatif alaşımın uygunluk durumunun farklı imalat parametreleri ve tasarımlarına göre değişken olabileceğini not etmelidir.

PRODUCT DEVELOPMENT OF ALTERNATIVE ALLOY WHEEL MATERIAL WITH IMPROVED MECHANICAL PROPERTIES

SUMMARY

AlSi7Mg and AlSi11Mg alloys are common materials for the aluminium alloy wheels production with LPDC (Low Pressure Die Casting) method. The biggest difference between these two main materials is heat treatment process. T6 (Solution – Quenching – Artificial ageing) heat treatment process is applied to all AlSi7Mg alloy wheels. On the other side, there is no any heat treatment process applied to AlSi11Mg alloy wheels.

In this study, alternative aluminium alloy which has different silicon range between AlSi7Mg and AlSi11Mg is studied. In addition to this, the development studies such as grain refinement studies, modification studies and heat treatment studies on this alternative alloy to improve the mechanical properties. All numerical and experimental studies are practiced in ‘Cevher Jant Sanayii A.Ş.’

At the beginning of this study, the applications of relative alternative alloys in the literature are searched. Although some studies which are preferred this alternative aluminium alloy for automotive industry such as casted engine parts in the literature, there is no any specific studies which are preferred the alternative aluminium alloy for the aluminium alloy wheels. Therefore, this study has an originality in the literature of casted aluminium alloy wheels.

When searched the development studies on improve the mechanical properties on related alternative aluminium alloys, a couple development study is come out. These studies are ‘grain refinement studies’, ‘modification studies’ and ‘heat treatment studies’. For this reason, all these development studies are applied to related alternative aluminium alloy wheels to improve mechanical properties such as ultimate tensile strength and yield strength.

Design validation and product validation process are applied to all casted aluminium alloy wheels which are made from alternative aluminium alloy. The design and product for related project are validated with using the alternative aluminium alloy. Numerical method and experimental method are preferred to get validation of project.

In the design validation process with using numerical method, cornering fatigue test simulation and 13° impact test simulation of alternative aluminium alloy wheels with using Ansys Workbench and Ansys LS-Dyna software are run and all simulations are validated. In the product validation process with using numerical method, casting simulation of alternative aluminium alloy wheels with using MagmaSoft - MagmaWheel software is run and the simulation is validated.

After the validation of design and product with numerical method, validation of design and product with experimental method is proceed as a next step. In the design validation with using experimental method, cornering fatigue test and 13° impact test

of alternative aluminium alloy wheels with using special test machines are applied and all tests are validated. In the product validation process with using experimental method, casting process of alternative aluminium alloy wheels with LPDC machine is proceed and the product is validated.

During the experimental methods, the heat treatment process which is called as artificial ageing process is applied to alternative aluminium alloy wheels to improve mechanical properties. In the heat treatment process, various heat treatment temperatures (165 °C – 180 °C) and various heat treatment application times (2 hours – 4 hours – 6 hours) are applied to alternative aluminium alloy wheels.

At 165 °C, yield strength is increased avg. %14, ultimate tensile strength is increased avg. %3 and elongation is decreased avg. %16 on the spoke area from 2 to 6 hours. Yield strength is increased avg. %13, ultimate tensile strength is increased avg. %3 and elongation is decreased avg. %7 on the outer flange area from 2 to 6 hours. Yield strength is increased avg. %11, ultimate tensile strength is increased avg. %4 and elongation is decreased avg. %2 on the inner flange area from 2 to 6 hours.

At 180 °C, yield strength is increased avg. %21, ultimate tensile strength is increased avg. %6 and elongation is decreased avg. %30 on the spoke area from 2 to 6 hours. Yield strength is increased avg. %22, ultimate tensile strength is increased avg. %7 and elongation is decreased avg. %8 on the outer flange area from 2 to 6 hours. Yield strength is increased avg. %18, ultimate tensile strength is increased avg. %5 and elongation is decreased avg. %13 on the inner flange area from 2 to 6 hours.

In the result section, firstly the material properties such as microstructures, macrostructures are investigated and hardness (Hardness Brinell) values are measured and approved according to related standards and specifications. In the following steps, the results of design and product validation process such as cornering fatigue test simulation, 13° impact test simulation and casting simulation of alternative aluminium alloy wheels with numerical method are revealed. After all these simulations, the design and product validation process with numerical method is validated. After the validation with numerical method, the results of design and product validation process such as cornering fatigue test, 13° impact test and trial casting of alternative aluminium alloy wheels with experimental method are found out. After all these tests, the design and product validation process with experimental method is validated.

In the analysis phase, ultimate tensile strength and yield strength are increased with higher heat treatment temperature and longer heat treatment time. Oppositely, elongation is decreased with higher heat treatment temperature and longer heat treatment time. Different heat treatment temperature and heat treatment application time on the alternative aluminium alloy wheels may be arranged to increase the mechanical properties such as ultimate tensile strength and yield strength or elongation.

According to all simulations and results in this study, the alternative aluminium alloy for the aluminium alloy wheels is evaluated as ‘approved’ for related project. Development studies such as ‘grain refinement studies’, ‘modification studies’ and ‘heat treatment studies’ may be applied to alternative aluminum alloy to improve mechanical properties.

Finally, it should be noted that the validation of alternative aluminium alloy is validated for related casting parameters, mold cooling systems, heat treatment procedure in this study. Beside this, various casting parameters, mold cooling systems

and heat treatment procedure can affect the validation status directly. Thus, researches who are interested in aluminium alloy wheel industry should be noted that the validation status of alternative aluminium alloys may be changeable under various production parameters and designs.



1. GİRİŞ

Son yıllarda alüminyum alaşımları kullanımı birçok endüstri ve uygulamada büyük oranda artmaktadır. Alüminyum alaşımları havacılık, denizcilik ve savunma sanayinde de kullanılmasına rağmen otomotiv sanayisi alüminyum döküm parçalar için en büyük pazardır [1,2].

Otomotiv endüstrisindeki düşük yakıt tüketimi talebi gerek müşteri istekleri gerek de çevresel kaygılar sebebiyle giderek artmaktadır. Çevresel kaygılar son dönemde şekil değiştirerek, kural koyucular tarafından sıkı şekilde denetlenen ve limitler altında tutulması zorunlu hale getirilen düşük emisyon değeri kuralları haline getirilmiştir. Yakıt tüketimini ve emisyon değerlerini etkileyen en önemli faktörlerden biri ise ağırlıktır. Bu durum, otomotiv endüstrisinde hafif metallerin diğer malzemeler arasından sıyrılmasını sağlamaktadır. Hafif metallerin otomotiv endüstrisinde kullanılabilmesi için elde edilen ağırlık kazançlarının yanında, üründen beklenen metalürjik ve mekanik özellikleri, yüksek korozyon direnci, yüksek termal iletkenlik, maliyet uygunluğu, görsellik, işlenebilirlik, dökülebilirlik ve darbe dayanımı gibi beklentileri de sağlaması gereklidir.

'Research And Markets'in Haziran 2018'de yayınladığı 'Otomotiv sektöründeki hafif metallerin geleceği' isimli raporunda daha hafif, daha güvenli ve daha düşük emisyon değerine sahip araçlar elde edebilmek için, alüminyum, magnezyum, berilyum, titanyum ve yeni nesil yüksek dayanımlı çeliklerin (AHSS) kullanılabileceği bildirilmiştir [3].

Otomotiv endüstrisinde kullanılan hafif metaller detaylı incelendiğinde; Alüminyum gerek uygun maliyeti, kolay dökülebilirliği ve işlenebilirliği, gerek de üründen beklenen metalürjik ve mekanik özellikleri sağlayabilmesi ile güçlü kullanım alanı bulmaktadır. Otomobil özelinde alüminyum kullanımı tercih edilen dökülmüş parçalara; Jantlar, silindir (motor) blokları, silindir (motor) kapakları, braketler, pistonlar, şanzıman parçaları ve ısı eşanjörler örnek verilebilir. Mevcut bu kullanımların yanında farklı imalat yöntemleri ile elde edilen alüminyumlar, kaporta,

kapılar ve ana gövde (BIW) gibi araç bileşenlerinde de sınırlı olarak kullanılmakta, yakın gelecekte ise bu bileşenlerdeki alüminyum kullanımı artacaktır.

'Aluminium Insider'in Nisan 2018'de yayınladığı G. Djukanovic'in yazdığı otomotiv endüstrisinde talep edilen son trendler incelendiğinde; alüminyumların mevcut içten yanmalı motorlu araçların yanında, gelecekte 2030 yılına kadar pazar payı %30-35 oranlarına yükselmesi beklenen elektrikli araçlarda (EV) artarak tercih edileceği düşünülmektedir. İçten yanmalı motorlu araçlarda karşılaştırıldığında elektrikli araçlarda alüminyum alaşımı kullanımının %15-27 oranında artacağı öngörülmektedir. Elektrikli araç modellerinde kullanılan alüminyum miktarları karşılaştırıldığında; Volkswagen e-Golf modelinde 129 kg, Nissan Leaf modelinde 171 kg ve Tesla Model S modelinde de 661 kg alüminyum kullanıldığı ve yakın gelecekte kullanım oranının giderek artacağı öngörülmüştür [4].

Aralık 2018'de Amerikan Dökümcüler Derneği (AFS) tarafından yayınlanan bilgilere göre döküm sektöründe Türkiye, Almanya ve İtalya'dan sonra Avrupa'da 3. Sırada yer almıştır. Önceki yıl verilerine göre dünyada döküm üretimi %5,3 oranında artarken, Türkiye özelinde ise alüminyum dökümünde 380.000 ton olmak üzere toplamda 2.155.000 ton miktarına ulaşmıştır [1].

Tüm bu bilgiler ışığında, alüminyum alaşımlı döküm parçaların kullanımının özellikle otomotiv endüstrisinde mevcutta ve yakın gelecekte artarak devam edeceği, mekanik özellikleri iyileştirilmiş yeni ürünlerin artan pazarda pay bulabileceği görülmektedir. Artan rekabetçi ortamda pazardan pay alabilmenin en önemli koşulunun da düşük maliyet olduğu göz önünde tutulmalıdır. Sonuçta, mekanik özellikleri arttırılmış ve üretim maliyetleri düşürülmüş ürünler her daim otomotiv ya da farklı sektörlerin pazarında kendine pay bulabilir.

1.1 Tezin Amacı

Otomotiv endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlı jantlarda büyük oranda Al-Si alaşımları tercih edilmektedir. Ana üreticiler alüminyum malzemenin, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarını talep etmektedirler. Bu iki ana malzeme alaşımları arasındaki en büyük fark ise ısıtım işlem uygulamasıdır. AlSi7Mg alaşımına mekanik özellikleri artırılma amaçlı T6 ısıtım işlemi (Çözeltiyeye Alma ‘*Solution*’ – Suverme ‘*Quenching*’ – Yapay Yaşlandırma ‘*Artificial Ageing*’) uygulanırken, AlSi11Mg alaşımına ısıtım işlem uygulanmaz. Bu durum, ısıtım işlemli AlSi7Mg alaşımlı jantların mekanik özelliklerinin AlSi11Mg alaşımlı jantlarından daha iyi mekanik özellikleri olmasını sağlarken, yüksek ısıtım işlem yatırım ve işletme giderleri sebebiyle ürün maliyetlerini arttırmaktadır. Bu çalışmanın amacı, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları arasında yer alan AlSi9Mg alaşımlı alternatif jant malzemesi oluşturulmasıdır. Bu alternatif malzeme ile jant dökümü gerçekleştirilip gerekli metalürjik, mekanik ve validasyon (uygunluk) testler uygulanarak ilgili standart ve şartnamelere uygun jant üretilmesi amaçlanmıştır. Bu alternatif jant malzemesi ve uygulamalarından iki ana beklenti mevcuttur. İlki, ısıtım işlemsiz AlSi9Mg alaşımı mekanik özelliklerinin mevcut ısıtım işlemsiz AlSi11Mg alaşımından daha yüksek değerler elde edilmesi beklentisidir. ısıtım işlemsiz AlSi9Mg ile hem herhangi bir ek ısıtım işlem maliyeti oluşmadan alaşım eldesi sağlanacak hem de daha iyi mekanik özellikler elde edilecektir. İkinci beklenti ise, AlSi9Mg alternatif malzemesine T5 (Yapay yaşlandırma) ısıtım işlemi yapılarak, T6 (Çözeltiyeye Alma – Suverme – Yapay Yaşlandırma) ısıtım işlemi uygulanan AlSi7Mg alaşımı mekanik değerlerine ulaşılmasıdır. Şüphesiz ki, T5 ısıtım işlemi ile T6 ısıtım işlemin vereceği mekanik özelliklerden çok daha iyi mekanik özellikleri elde etmek metalürjik olarak mümkün değildir. Bu durumun yanında T5 ısıtım işlemi maliyetlerinin de T6 ısıtım işlem maliyetlerine göre düşük olduğu aşikardır. Sonuç olarak, T5 ısıtım işlemli AlSi9Mg alaşımının mekanik özelliklerinin T6 ısıtım işlemi uygulanan AlSi7Mg alaşımına ulaştığı, maliyet açısından da çok daha avantajlı bir alternatif malzeme elde edilebilir. Sonuç olarak bu çalışmada, mekanik özellikleri iyileştirilmiş ve ürün maliyetlerinin düşürüldüğü alternatif alaşımlı malzeme ile alçak basınç yöntemiyle jant dökümü amaçlanmıştır. Alternatif malzeme ile dökülen bu jantlara ilgili standart ve şartnamelerdeki tüm testler uygulanarak metalürjik, mekanik ve validasyon testlerinin uygun olarak elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Bu çalışma kapsamında çalışılan alternatif malzeme olan AlSi9Mg alaşımının mevcutta alüminyum alaşımlı jant dökümünde kullanımı bulunmamaktadır. Bu endüstriyel bilgi, literatürde de incelendiğinde AlSi9Mg alaşımıyla binek otomobil jantı dökümü, jant ürününe özgü metalürjik, mekanik ve validasyon testlerinin yapıldığı bir çalışmaya rastlanmadığından doğrulanmıştır. Bu açıdan, çalışma literatüre ve teknik bilgi birikimine bir yenilik sağlayacaktır. Literatüre kazandırılacak yenilik dışında, çalışma tamamen bir sanayi uygulaması olacağından alüminyum alaşımlı jant dökümü sektörüne de bir yenilik getirecektir.

Bu çalışmada, alternatif jant malzemesi olarak çalışılan AlSi9Mg alaşımının jant ürünü dışında farklı ürün uygulamaları ise literatürde mevcuttur.

Padmanaban ve Kurien, Al-Si-Mg alaşımlarının iyi dökülebilirliği ve farklı eklentileri ile otomotiv sektöründe kullanılabilecek örneklerini paylaşmışlardır. AlSi9Mg alaşımlı malzemelerin yüksek spesifik dayanımları, düşük yoğunlukları ve yüksek korozyon dayanımı sebebiyle birçok otomotiv parçasında tercih edildiğini bildirmişlerdir. Bu otomotiv parçalarına örnek olarak da motor braketleri, muffler, içten yanmalı motor pistonları gibi parçaları göstermişlerdir [7].

Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerinin artırılması için iki temel geliştirme çalışması bulunmaktadır. Bu geliştirme çalışmalarının ilki tane inceltme-modifikasyon işlemleri ikinci ise ısıtma işlem uygulamalarıdır.

İlk geliştirme çalışmalarından tane inceltme çalışmalarının temeli; kaba tanelerin farklı eklentilerle ince taneler haline getirilmesi, böylece yapıdaki dislokasyon / hasarın ilerlemesini tane sınırlarının artması sebebiyle ilerlemesinin zorlaştırılması ve mekanik özelliklerin artırılması prensibine dayanır. Modifikasyon çalışmalarının temeli ise alaşımın döküldüğü halde (*as cast*) yapısındaki kaba ve iğnemsiz yapının modifikatörle yuvarlatılması, tane inceltmeye benzer şekilde yapıdaki dislokasyon / hasar ilerlemesinin zorlaştırılması prensibine dayanır. Konu hakkındaki literatür çalışmaları incelendiğinde farklı uygulamalar aşağıda özetlenmiştir.

Jarco ve arkadaşları, AlSi9Mg alaşımıyla dökülen pompa muhafazasının mekanik ve metalürjik özelliklerinin farklı seviyelerdeki Sr modifikasyonu ile artırılması üzerine çalışmışlardır. Çalışma sonunda, %0,06 Sr modifikasyonu ile mekanik özelliklerden çekme dayanımı, birim uzama, sertlik ve darbe dayanımında en yüksek değerleri elde

etmişlerdir. Metalürjik analizde ise farklı seviyelerdeki Sr modifikasyonunun mikro yapıdaki etkilerini detaylı olarak incelemişlerdir [5].

Lipiński, boron, titanyum ve stronsiyum kullanarak AlSi9Mg alaşımlarında modifikasyon ve tane inceltme yapılması üzerine çalışmıştır. Modifikasyon öncesi alaşım yapısındaki büyük birincil α faz dendritleri, ötektik β faz kristalleri ve ötektik α fazları düşük dayanıma sebep olmaktadır. Bu sebeple Sr modifikasyonu ile iğnemi içyapının modifiye edilmesi ve Ti – B tane incelticileriyle de kaba ve büyük tanelerin küçültülmesi daha iyi mekanik özellikler edilmesi gereği kaçınılmaz bir uygulamadır. Bu uygulamanın sıralaması da mekanik özellikleri değiştirebildiği bu çalışmada not edilerek, Ti ve B eklentisi sonrası Sr eklentisi en uygun sonuçları verdiği, Ti ve B'nin kendi arasındaki sıralama farkının ise çok düşük etkiye sahip olduğunu ortaya konulmuştur. Sıralama etkilerinin yanında, AlSi9Mg alaşımına eklenen Ti, Br ve Sr eklentilerinin metalürjik yapıdaki ve mekanik ve metalürjik yapıdaki olumlu etkileri de incelenmiştir [6].

Farklı bir çalışmada Lipiński, AlSi9Mg alaşımlarında tercih edilen Sr modifikatörüne alternatif olarak Na (NaN_3 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, Na_2O_2) bileşiklerinin çekme dayanımı, birim uzama, sertlik (HB) ve aşınmaya olan etkilerini de incelemiştir. Çalışma sonunda, en uygun mekanik özelliklerin NaN_3 ya da $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ bileşiklerinden birinin %0,1 diğer kalan iki bileşenin ise %0,3 seviyesinde olması gereği sonucuna varılmıştır [8].

Na bileşiklerinin tutma sürelerinin (Modifikasyon sonrası sıvı metalin döküme kadar geçen süresi) diğer modifikatörlere göre nispeten düşük olması bu bileşiklerin alüminyum alaşımlı jant sektöründe tercih oranını azaltmakta, nispeten daha kontrol edilebilir olan Sr modifikatörlerinin tercihini arttırmaktadır.

Reif ve Müller, Al-Si döküm alaşımlarından AlSi9Mg alaşımının tane inceltme ve modifikasyon ile mekanik özelliklerinin artırılması üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, literatür ve sanayi uygulamalarında yüksek oranda tercih edildiği gibi tane inceltici olarak titanyum ve boron (Al-Ti, Al-Ti,B, Al-B) master alaşımları kullanılmıştır. Modifikatör olarak da stronsiyum ve sodyum uygulamalarının mevcut olduğu, kolay uygulanması sebebiyle stronsiyum (AlSr10 katkı çubukları) ile modifikasyon tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda, daha düşük miktardaki AlTi5B1 master alaşımları eklentisinin, AlB4 master alaşımından daha efektif tane inceltme yaptığı görülmüştür. Bunun yanında, sanayi uygulamalarında sadece alüminyum-

boron (Al-B) içerikli tane inceltme kullanılan çalışmalar yapıda titanyum olmaması gerektiğinden sınırlıdır. Çünkü, külçe ve fire kullanımı olan sanayi uygulamalarında yapıda titanyum mevcut olabilir. Modifikasyon amaçlı kullanılan stronsiyum miktarının düşük boron seviyelerinde (80 ppm) daha efektif sonuçlar verdiği de bildirilmiştir. Sonuç olarak, en uygun tane inceltici elementin boron olduğu boronun da titanyumla TiB₂ oluşturarak bağlandığı sonucuna varılmış, en uygun modifikatörün de stronsiyum olduğu görülmüştür [11].

İkinci geliştirme çalışması ise ısıtım işlem uygulamasıdır. Al-Si-Mg alaşımlarına uygulanan ısıtım işlemleri; Çözeltiye Alma – Su verme – Yapay yaşlandırma (T6) ya da Yapay yaşlandırma (T5) uygulamalarıdır. Bu uygulamaların amacı mekanik özellikleri iyileştirilmiş ürün elde edilmesidir.

Pezda, ATND (*Analysis Thermal-Voltage-Derivative*) tekniğı kullanarak AlSi9Mg alaşımasının ısıtım işlem şartlarını belirleme üzerine çalışmıştır. Isıtım işlem şartlarının malzemenin dayanımını direkt olarak etkilediğı ortaya konmuştur. En yüksek dayanım değerlerini elde edilebilmesi için; Çözeltiye alma sıcaklığının 530 – 550 °C aralığında, çözeltiye alma zamanının 1,5 – 3 saat aralığında olması gerektiğı not edilmiştir [10].

Farklı bir çalışmada Pezda, AlSi9Mg alaşımasının farklı ısıtım işlem şartlarını numuneler üzerinde denemiştir. Çözeltiye alma sıcaklıkları sırasıyla 530 °C, 545 °C ve 560 °C olarak, çözeltiye alma süreleri ise sırasıyla 0,5, 1,5 ve 3 saat olarak belirlenmiştir. Yapay yaşlandırma sıcaklıkları ise sırasıyla 180 °C, 235 °C ve 310 °C olarak, yapay yaşlandırma süreleri ise sırasıyla 2, 5 ve 8 saat olarak denenmiştir. Sonuçlar, ‘işlenebilirlik’ açısından incelenmiş olup en uygun işlenebilirliğin en ince tane boyutlarında elde edilebildiğı bildirilmiştir. İşlenebilirliğı en uygun olan ısıtım işlem parametrelerinin 545 °C’de 3 saat çözeltiye alma, 235 °C’de 8 saat yapay yaşlandırma parametrelerinde olduğu sonucuna varılmıştır [12]. Bu çalışma değerlendirilirken çalışmanın numuneler üzerinde yapıldığı, farklı yapılarda farklı sonuçlar elde edilebileceğı göz önünde tutulmalıdır.

Dobrzański ve arkadaşları, yapay yaşlandırma uygulamalarının zaman ve sıcaklık parametrelerinin AlSi9Mg alaşımasının mekanik ve sertlik değerlerine olan etkisini incelemiştir. Ayrıca metalürjik analizde, alaşımanın mikro yapıları da incelenmiştir. Diğer değişkenler sabit tutulmak kaydıyla, yapay yaşlandırma süresi 3 ile 15 saat aralığında, yapay yaşlandırma sıcaklığı ise 150 °C ile 180 °C aralığında ısıtım işlem

uygulaması şeklinde yapılmıştır. Bu çalışmada, yapay yaşlandırma sıcaklığı 150 °C'de sabit tutulup yapay yaşlandırma süreleri değişimi incelendiğinde 6. saatte akma dayanımı ve çekme dayanımlarında artış görülürken birim uzama değerlerinde de düşüş gözlenmiştir. Sertlik değerleri de 6. saatte yükselirken 12. saatte ikinci bir yükseliş trendine girmiştir [9]. Fakat alüminyum alaşımlı jant üretimi yapan işletmeler için 12 saate yaklaşan yapay yaşlandırma süreçlerinin ürün çevrim sürelerine uygun olmayacağı da not edilmelidir.

Literatürdeki AlSi9Mg alaşımı üzerinde yapılan mekanik özellikleri arttırma amaçlı geliştirme çalışmaları incelenirken, gerek tane inceltme-modifikasyon şartlarının gerek de ısıtma şartlarının ilgili dökümhane dinamiklerine, döküm şartlarına, kalıp ve soğutma özelliklerine, metal temizleme (gaz giderme) durumuna, metal ve döküm sıcaklıklarına, ürün geometrisi, karmaşıklığı ve boyutlarına göre değişiklik gösterebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebeple, literatür konu hakkında belirli bir teknik ve oran bilgisi vermesine rağmen kesin yargılar verilmesi için yeterli değildir. Bu sebeple, sanayi bazlı tüm çalışmalarda olduğu gibi geliştirme çalışmalarında da sayısal ve deneysel çözümlerin beraber uygulanması, sonuçların birbiri ile karşılaştırılarak tasarım ve ürün uygunluğu kararı verilmesi zorunludur.

1.3 Alüminyum Döküm

Alüminyum, düşük yoğunluğu, işlenebilirliği, dökülebilirliği, korozyon direnci, düşük maliyeti ve yüksek mekanik özellikleri sebebiyle diğer hafif metaller arasından öne çıkmaktadır. Bu değerli metal, dökme, plastik şekil verme (presleme), talaşlı şekil verme (işleme), dövme gibi birçok şekil verme yöntemiyle şekillendirilebilir. Bu çalışma kapsamında alüminyum alaşımlı jantların dökülmesi süreci kullanıldığından alüminyumun dökülmesi detaylı incelenmiştir. Alüminyum dökümü de farklı döküm yöntemleri ile gerçekleştirilebilir.

Alüminyum alaşımlı jantların dökülmesinde gerek yüksek üretim adetleri, gerek belirlenen sıkı boyut tolerans içinde ürün üretilmesi zorunluluğu, gerek de karmaşık yapıların üretilebilmesi için kalıcı (kokil) kalıba döküm tercih edilmelidir. Kalıcı (kokil) kalıba döküm yöntemleri incelendiğinde; gravite döküm yöntemi, alçak basınç döküm yöntemi, yüksek basınçlı döküm yöntemleri yaygın olarak tercih edilir [13]. Jant ürünü özelinde düşünüldüğünde; gravite döküm yönteminde elde edilen ürünün yüksek porozite oranı, oksit hataları ve bifilmlerin (çift katlanmış filmler) tetiklemesi,

metal kalitesine göre mekanik özelliklerinin düşmesi, karmaşık yüzeyli parçalarda dolum problemi gibi sebeplerle [14], yüksek basınçlı döküm yönteminde ise nispeten daha küçük ve karmaşık parçaların dökümü tercih edildiğinden jant dökümü için en uygun döküm yönteminin alçak basınç döküm yöntemi olduğu görülmektedir [13].

1.3.1 Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları ‘*Aluminium Association*’ tarafından uluslararası kabul edilecek şekilde sınıflandırılmış ve kodlanmıştır. Bu sınıflandırma, dövülebilen ve dökülebilen alaşımlar için ayrı ayrı yapılmış olmasına rağmen bu çalışma kapsamında sadece dökülebilen alaşımlar incelenmiştir. Dökülebilen alaşımlar, ‘*Aluminium Association*’ tarafından Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi kimyasal bileşimlerine göre 9 grupta sınıflandırılmıştır. Örneğin ilk gruptaki 1XX.X alaşımında, noktanın solundaki üçüncü sayı (örnekte 1) alaşım sınıfını, noktanın solundaki iki basamak alaşımın saflık oranını, noktanın sağındaki basamak ise döküm (0) ya da külçe (1) olduğunu gösterir [15].

Benzer şekilde ‘*Aluminium Association*’ tarafından, alüminyum alaşımlarına - uygulanabilir durumda olmasına bağlı olarak- uygulanan ısıtma işlem adımları da sınıflandırılıp kodlanmıştır. Alüminyum alaşımları, ısıtma işlem (temperleme) açısından dört temel grupta; imal edildiği şekildeki parçalar (F), sadece dövme parçalar için tavllanmış parçalar (O), soğuk şekillendirilmiş parçalar için pekleşme yapılmış parçalar (H) ve ısıtma işlem yapılabilir parçalar (T) olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada tercih edilen alaşımlar, gerek içeriğinde yer alan alüminyum, silisyum ve magnezyum miktarları gerek de ısıtma işlem yapılabilir malzemeler olduğundan dolayı 3XX.X grubunda sınıflandırılmaktadır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında jant ana malzemelerinin A356 kodu ile sınıflandırıldığı görülmektedir. Bu sınıflandırmanın detayı Çizelge 1.2’de paylaşılmıştır.

Çizelge 2.1: Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması [15].

Alaşım	Ana Alaşım Elementi	Isıl İşlem
1XX.X	Al \geq 99%	-
2XX.X	Al-Cu	+
3XX.X	Al-Si (+Cu ya da Mg)	+
4XX.X	Al-Si	-
5XX.X	Al-Mg	-
6XX.X	Kullanılmayan Seri	-
7XX.X	Al-Zn-(Mg)-(Cu)	+
8XX.X	Al-Sn	-
9XX.X	Al- (Diğer elementler)	-

Çizelge 2.2: Alüminyum döküm alaşımlarının temper sınıflandırılması [15].

Ön Harf	İlk Rakam	Açıklama
F		İmal edildiği şekilde
O		Dövme parçalar için tavlama
H	1	Sadece soğuk şekillendirme
	2	Soğuk şekillendirme ve kısmen tavllanmış
	3	Soğuk şekillendirilmiş ve stabilize edilmiş
T	1	Kısmen çözeltiye alma ve doğal yaşlandırma
	2	Yalnızca tavllanmış döküm parçaları
	3	Çözeltiye alma ve soğuk şekillendirilmiş
	4	Çözeltiye alma ve doğal yaşlandırma
	5	Sadece yapay yaşlandırma
	6	Çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma
	7	Çözeltiye alma ve stabilizasyon (Fazla yaşlandırma)
	8	Çözeltiye alma, soğuk şekillendirme ve yapay yaşlandırma
	9	Çözeltiye alma, yapay yaşlandırma ve soğuk şekillendirme

Üstteki sınıflandırmalara göre, bu çalışmadaki alternatif alaşımlı jant malzemesi Al-Si-Mg içeriğinden dolayı 3XX.X sınıfında, yapılması planlanan ısı işlem de sadece yapay yaşlandırma olduğundan T5 sınıfında yer almaktadır. Mevcut durumda ana üretici tarafından talep edilen alaşımlarından AlSi7Mg alaşımına çözeltiye alma – suverme – yapay yaşlandırma işlemi uygulandığından T6 sınıfında yer almaktadır.

1.3.2 Al-Si alaşımları

3XX.X sınıfındaki Mg eklentili Al-Si alaşımları iyi mekanik özellikleri ve dökülebilirlikleri sayesinde alüminyum alaşımlı jant sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yapıdaki silisyum dökülebilirliğin, akıcılığın, korozyon direncinin ve işlenebilirliğin iyileşmesini sağlarken, magnezyum ise çekme ve akma dayanımları gibi mekanik özelliklerin artırılmasına etki eder. Fakat yapıdaki silisyum ve magnezyum yüksek miktarlara ulaştığında Mg_2Si fazının oluşmasına sebep olarak çekme dayanımına olumsuz etki edebilir. Bu sebeple, yapıdaki magnezyum %0,3 seviyesinde sınırlanmaktadır. Yapılan ısı işlem proseslerinde Mg_2Si fazının alüminyum dendritleri arasında çökmesi sağlanarak bu fazın olumsuz etkisinden kaçınılır. Magnezyum

eklentili alaşımların yapay yaşlandırma ile sertleştirilebilmesi bu alaşımların tercih edilmesinde ek bir faktördür. [16].

Yapıdaki Si içeriği de katılma hızı ile bağlantılı olup, katılma hızının yavaş olduğu kum kalıba döküm yöntemlerinde %5 - %7 aralığında, katılma hızının orta olduğu kokil kalıba döküm yöntemlerinde %7 - %9 aralığında, katılma hızının hızlı olduğu basınçlı döküm yöntemlerinde ise %8 - %12 aralığında tercih edilmektedir [23].

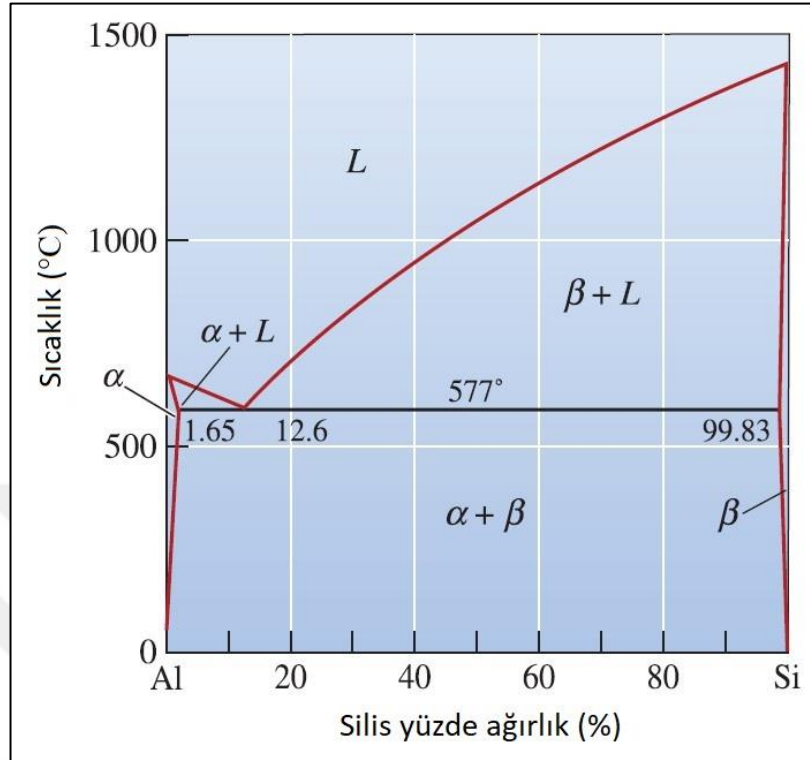
Diğer yandan, Al-Si alaşımlarındaki birincil α faz dendritleri, ötektik β faz kristalleri, ötektik α fazları düşük dayanıma sebep olabilir. Bu fazlar yanında yapıdaki porozite, çekinti (*shrinkage*), safsızlıklar ve intermetalikler dayanımı olumsuz olarak etkileyebilir. Mikro yapıdaki bu olumsuzluklar, modifikasyon, tane inceltme, metal temizliği ya da farklı element eklentileri ile bertaraf edilebilir [6]. Mikro yapıdaki olumsuzlukların giderilmesi için yapılan iyileştirmeler modifikasyon ve ısıl işlem olarak iki ana sınıfa ayrılabilir. Modifikasyon işleminde, Sr eklentileriyle ötektik Si fazı şekilleri kaba yapıdan ince yapıya değiştirilir. Isıl işlemde ise yaygın olarak T6 (Çözeltiyeye alma–Su verme–Yapay yaşlandırma) ya da T5 (Yapay yaşlandırma) uygulamaları yapılır. T6 sürecinde çözeltiyeye alma adımı ötektik sıcaklığın az miktarda altında 540 °C’de uygulanarak yapıdaki Si ve Mg fazları çözülür ve yapıda homojenizasyon sağlanır ve iğnemsiz Si fazları küreselleşir. Homojenizasyonu tamamlanan yapının eski haline dönmesine fırsat vermeden su verme yapılır. Yapay yaşlandırma ile de Al yapının içinde çökmesi sağlanarak mekanik özellikler artırılır [17].

1.3.3 Faz diyagramları

Al-Si alaşımlarının tercih edildiği endüstriyel uygulamalarda genelde %7,5 ile %13 Si oranı aralığında değişir. Si oranı %12’nin altında olduğunda ötektik altı alaşımlar olup, alüminyum alaşımlı jant malzemeleri ötektik altı alaşımlar olarak değerlendirilir. Si değerinin artırılması döküm karakteristiğini, akıcılığı ve beslemeyi artırma gibi faydalarının yanında Si miktarı zengin alaşımlarda yapı, Si sebebiyle sertliğin artmasıyla sünekliğin ve işlenebilirliğin azalması riski oluşur [18].

Bu sebeple, Si oranı alaşımdan beklenen özelliklere göre ayarlanmalıdır. Al-Si faz diyagramı (Şekil 1.1) incelendiğinde, ötektik altı alaşımlarda sıvı metalin soğuması ile α -Al fazı oluşarak (577 °C’de) mikro yapıda Al dendritik yapıları meydana gelir.

Yapıdaki diğer elementler (Mg: Korozyon dayanımı, Sr: Modifikasyon, Ti-B: Tane inceltme) mikro yapıda değişiklik oluşturarak mekanik özellikleri iyileştirir.



Şekil 1.1: Al – Si faz diyagramı [24].

Ötektik altı (Si oranı < %12) alaşımlarda Si oranının artışı mukavemeti düşürürken, ötektik üstü (Si oranı > %12) alaşımlarda mukavemet artar. Bu sebeple ötektik altı alaşımlarda Si oranının azaltılması mukavemet artışına olumlu olarak etki edecektir [19].

1.3.4 Mikroyapı

Al-Si alaşımlarının faz diyagramları incelendiğinde AlSi9Mg alaşımının karşılık geldiği ötektik altı alaşımlarda erime sıcaklığındaki sıvı metalin altına inildiğinde sıvı fazın önce sıvı + alüminyum yapıya sonra da alüminyum + silisyum yapıya dönüştüğü görülmektedir. Bu iki ayrı fazın katılaşması esnasında farklı mikro yapıların oluşması, mikro yapıdaki tane boyutu ve şekli, porozite, çekinti, safsızlıklar ve intermetalikler malzemenin mekanik özelliklerini direkt olarak etkilemektedir. Bu sebeple malzemenin mekanik özelliklerinin artırılması için tane inceltme, modifikasyon, ısıl işlem gibi bir dizi geliştirme çalışması ile ince, küresel ve homojen taneler elde edilebilir.

Modifikasyon öncesi Si fazları kaba, plaka benzeri ve gevrek yapıdadır. Plaka benzeri bu yapılar gerilimlerin yoğunlaşmasına ve mikro çatlakların bu bölgeden başlamasına sebep olmaktadır. Modifikasyon işlemi bu plaka benzeri yapıların yuvarlak ve fiberli hale gelmesini sağlayarak yapının yoğunlaşan üç boyutlu gerilme yığılması ve mikro çatlaklar sebebiyle hasarlanma riskini azaltır [20].

1.3.5 Mekanik özellikleri arttırıcı geliştirme çalışmaları

Malzemenin mekanik özelliklerinin arttırılması temelde mikro yapının değiştirilmesi ile mümkündür. Gerek yapıdaki tanelerin morfolojilerinin değiştirilmesi gerek de yapıdaki düzensizliklerin giderilmesi mekanik özellikleri arttırıcı çalışmalardır. Tane morfolojisini değiştiren tane inceltme, modifikasyon, ısı işlem gibi geliştirme çalışmalarından önce döküm hatalarının minimize edilmesi döküm kalitesi için hayati önem taşımaktadır. Döküm hatalarını en aza indirmek için, sıvı metalin cürufalarının temizlenmesi, gaz giderme yapılması, türbülanssız akış sağlanması gibi temel beklentiler sağlanmalıdır. Bu işlemler, döküm sürecinin sağlıklı işlemesi için temel gereklilikler olması tartışma gerektirmeyen adımlardır. Bu sebeple bu çalışmada tüm bu temel adımların alüminyum alaşımlı jant dökümü başlığında detaylandırıldığı gibi, sorunsuz şekilde yapıldığı varsayımıyla diğer geliştirme çalışmaları üzerine yoğunlaşmıştır. Geliştirme çalışmalarının en önemlileri; Tane inceltme, modifikasyon ve ısı işlem olarak sıralanabilir. Bu işlemler için farklı elementler, işlem sıcaklıkları ve süreleri tercih edilse de temel amaç malzemenin mikro yapısının uygun hale getirilerek mekanik özelliklerinin arttırılmasıdır.

Mekanik özellikler arttırıcı geliştirme çalışmaları esnasında farklı bir mekanik özelliğin iyileştirilmesi farklı başka bir mekanik özelliğin kötüleşmesine de neden olabilmektedir. Örneğin çekme ve akma dayanımları arttırılan malzemenin sertliği artarken birim uzama değeri düşebilir [17].

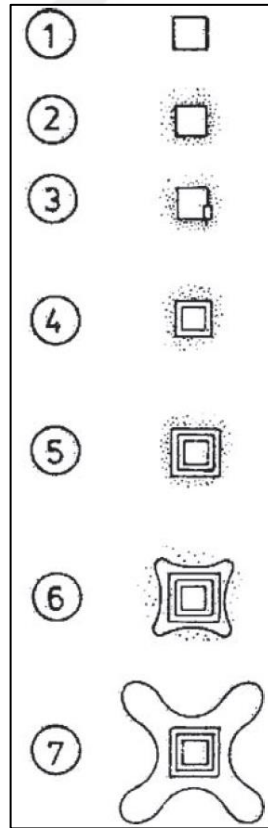
Tüm bu metalürjik gerçekler bir arada düşünüldüğünde bu geliştirme çalışmaları ve yapıya etkileri detaylı incelenerek bu çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

1.3.5.1 Tane inceltme

Kırılgan intermetalik fazları ve poroziteler büyük tanecikler arasında oluşmaya müsaittirler. Bu durum da kaba ve büyük taneli yapıların birim uzamalarının zayıflamasına sebep olmaktadır. Döküm alaşımlarında tane inceltmenin yapılması

porozitenin ve kırılğan fazların azaltılarak mekanik özelliklerin ve yorulma dayanımını arttırılmasını sağlarlar. Şekil 1.2'deki tane inceltme mekanizması incelendiğinde, Al-Ti-B (master alaşımları) sayısız titanyum-aluminide ($TiAl_3$) kristalleri mevcut olup ergime esnasında sıvı metale master alaşımın eklenmesiyle milyonlarca parçacık oluştururlar. $TiAl_3$ kristalleri Al sıvı metali içinde çözülerek titanyumca zengin sıvı metal oluşur. Al-Ti faz diyagramına göre, ergime sıcaklığı $660.1\text{ }^\circ\text{C}$ olan saf alüminyum titanyum eklentisiyle $665\text{ }^\circ\text{C}$ 'de ergir. Bu sıcaklık aralığında ilk çekirdeklenmeler oluşarak yüzeyde aluminide parçacıkları oluşur. İlerleyen adımlarda bu parçacıkların çekirdeklenmeleri büyüyerek dendiritlerin oluşmasına neden olur ve metalin katılaşıma fazına geçmesiyle dendiritler büyüyerek tüm yapıda katılaşıp [21].

Sanayi uygulamalarında da Ti ve B bazlı tane incelticiler AlTi5B1 çubukları halinde yaygın olarak kullanılmaktadır. TiBor olarak da adlandırılan bu ürünün ilgili standart ve şartnamelere göre çalışan işletmelerde belirli seviye altında tutulması zorunluluktur. Bunun yanında, TiBor eklentisinin belirli seviye üstünde tane inceltme özelliklerinin aynı kaldığı ve eklenti miktarı artsa da tane inceltme mekanizmasının daha fazla ilerlemediği bilinmektedir.

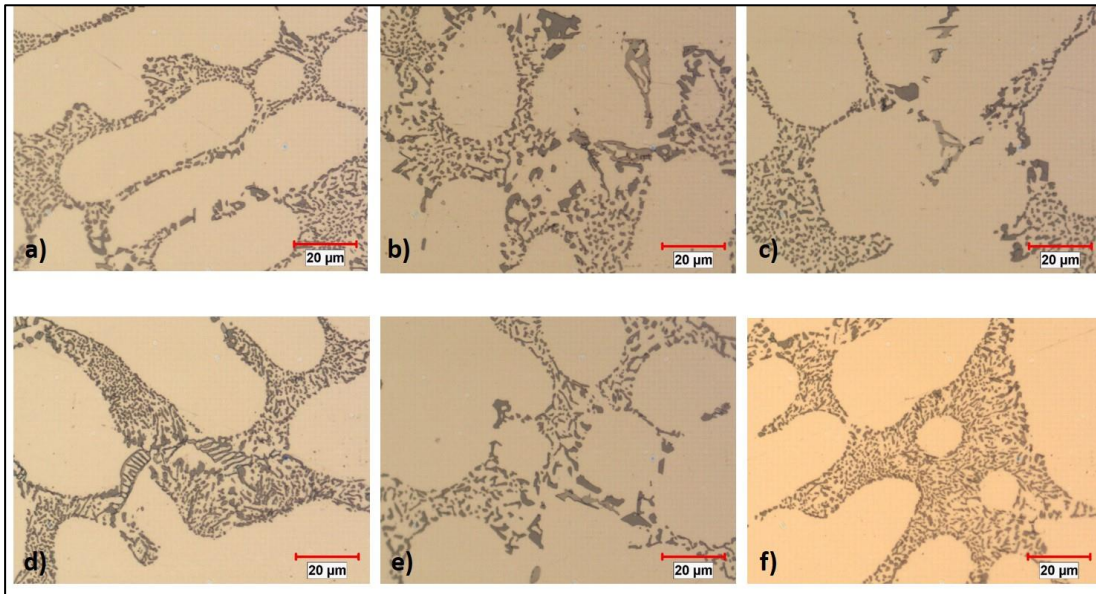


Şekil 1.2: Tane inceltme mekanizması [18].

1.3.5.2 Modifikasyon

Tane inceltmeden sonra en önemli mekanik özellik artırıcı çalışmalardan biri de modifikasyon sağlayan elementlerin kullanımınıdır. Modifikasyon sağlayan elementlerden sanayi uygulamalarında en çok tercih edileni AlSr15 çubukları halinde bulunan Sr bazlı modifikatörlerdir.

Sr, yapıya süneklik ve mekanik özellik artışı sağladığından yaygın olarak tercih edilmektedir. Sr alaşıma 250 ppm – 300 ppm aralığında eklenerek modifikasyon sağlanırken literatürde 50 ppm seviyesinin de yeterli olduğuna dair çalışmalar mevcuttur [19]. Sr seviyesi yanında Sr ile modifiye edilmiş alaşımın döküm öncesi bekleme süresi de modifikasyon özelliğini değiştirir. Bu tez çalışmasının sanayi ayağı ‘Cevher Jant Sanayii’ bünyesinde yürütülen ve yayınlanan başka bir çalışmada, Sr modifikasyonunun alüminyum döküm alaşımlarının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve sırasıyla 450 ppm, 425 ppm, 400 ppm, 375 ppm, 225 ppm ve 140 ppm Sr seviyesindeki AlSi7Mg alaşımı numunelerin mikro yapıları ve mekanik (çekme) özellikleri incelenmiştir. Sr modifikasyonun mikro yapıya etkisi Şekil 1.3 (a: 450 ppm, b: 425 ppm, c: 400 ppm, d: 375 ppm, e: 225 ppm ve f: 140 ppm) görülmektedir. Numunelerin tamamı Sr modifikasyonu yapıldığından iğnemsiz yapı görülmemekte, buna rağmen iğnemsiz yapıların dönüştüğü Çin yazısı morfolojisi (*Chinese script morphology*) mikro yapılarda görülebilmektedir [22].



Şekil 1.3: Sr modifikasyonunun mikroyapıya etkisi [22].

Aynı çalışmada Sr elementinin alaşımında yüksek sıcaklıkta uzun süre bekletilmesinin de oksitlenerek yapıdan kaybolmasına neden olduğu gösterilmiştir. İlgili dökümhane ve bekleme şartlarında 720 °C’de bekletilen AlSi7Mg alaşımının 450 ppm olan Sr seviyesinin 3 vardiya (24 Saat) sonrası 50 ppm civarında düşerek 400 ppm seviyesine gerilediği ve artan zamanla Sr seviyesinin aynı trendde düştüğü gösterilmiştir [22].

Sr yanında Na, Ca ve Sb gibi elementler de modifikasyon sağlayan elementlerdendir. Na elementinin modifikatör olarak kullanıldığı AlSi9Mg alaşımının mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada, Na elementinin kısa süreli modifiye etkisi not edilmiştir [8]. Farklı bir çalışmada ise Ca ve Sb elementlerinin zayıf modifikasyon etkileri not edilmiştir [23]. Na elementi kısa süreli modifikasyon yapabilmesi sebebiyle, Ca ve Sb elementlerinin ise zayıf modifikasyon sağlamaları seri imalatta ağırlıklı olarak Sr elementinin tercih edilmesine neden olmaktadır.

1.3.5.3 Isıl İşlem

Mekanik özellikleri arttırıcı çalışmalardan biri de malzemeyi ısıtma ve soğutma işlemlerinin uygulanarak mikro yapının istenen hale getirilmesi için ısıl işlem uygulamasıdır. Isıl işlem temper sınıfında göre çözeltiye alma, su verme ve yapay yaşlandırma (T6) ya da sadece yapay yaşlandırma (T5) olarak uygulanabilir. Yaşlandırma işlemi doğal olarak da gerçekleşebilir fakat bu süreç imalat kısıtlarından çok daha fazla süre alacağından imalatta yaşlandırma işlemi yapay olarak gerçekleştirir. T6 ısıl işleminin ilk adımı olarak ürün çözeltiye alma işlemine ötektik sıcaklık (577 °C) altında 530 °C – 550 °C aralığında alındıktan sonra 60 °C – 80 °C aralığında su verilir. Su verme sonrası 150 °C – 170 °C aralığında yapay yaşlandırma uygulaması yapılır.

Yapıdaki Si ve Mg elementleri çözeltiye alma işleminde Mg₂Si fazı oluşurken yaşlandırma işleminde ise bu faz alüminyum dendritleri arasında çökerek mekanik özelliklerin ve sertlik değerlerinin artmasını sağlarlar [16].

Çözeltiye alma işleminin temel amacı metalin sıvı hale geçmeden yapıdaki Si (β) fazını Al (α) fazı içinde çözüdürmeye çalışmaktır. Daha sonra bu iç yapı ani olarak soğutarak yapının homojen halde kalması amaçlanır. Çözeltiye alma işleminde metalin sıvı hale geçmemesi için için ötektik sıcaklık (577 °C) altında olması gerekmektedir [24]. Sanayi uygulamalarında bu değer 530 °C – 550 °C aralığında uygulanır. Çözeltiye alma işleminin uygulama süresi parçanın geometri ve kesit durumuna göre

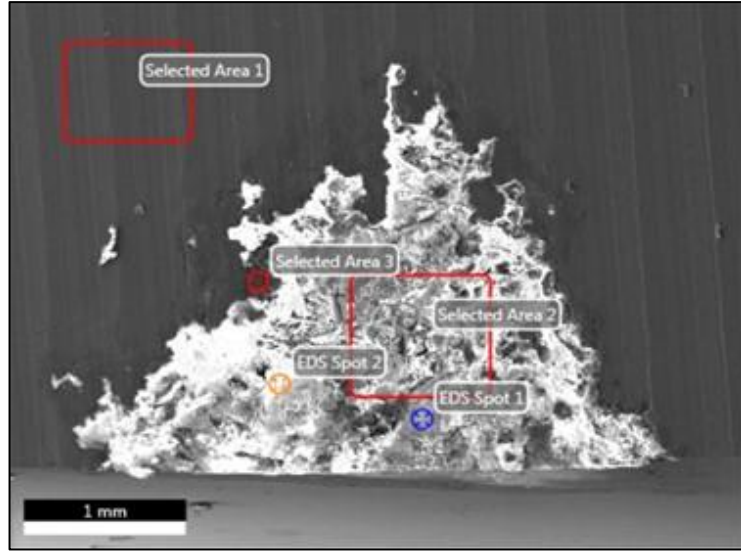
değişkenlik gösterebilir. Ortalama boyutlara sahip bir jantın çözeltiye alma süresi 3 ile 4 saat aralığındadır.

Su verme işlemi, çözeltiye almada elde edilen Al (α) fazı çok hızlı soğutulmuş Si (β) fazının çekirdeklenmesine imkan bırakmadan soğutulmasıdır. Si (β) fazlarının oluşmaması için soğutulma işlemi en hızlı şekilde su verme ile yapılabilir. Soğumanın yavaş yapılması durumunda (havada su verme) yapıda Si (β) fazları tekrar oluşabilir. Suda su vermenin bu avantajı yanında yüksek sıcaklık farkının çarpılma ve yapıda iç gerilme oluşturarak kalıntı gerilmelere neden olabilir. Kalıntı gerilmelerin ürünün yorulma şartları altında yorulma hasarlarına sebep olabileceği riski de not edilmelidir [18,15].

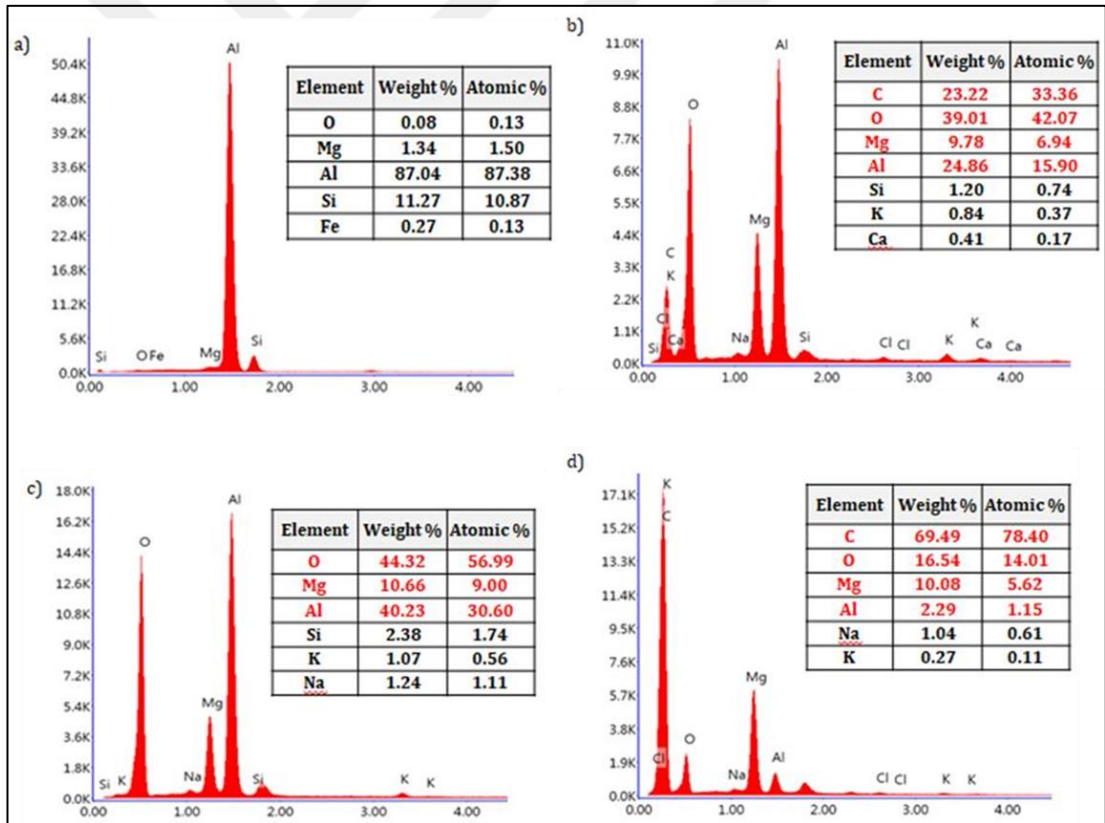
Tüm bu sebeplerden dolayı su verme sıcaklığının uygun seçilmesi çok önemlidir. Yapay yaşlandırma işlemi, su verme sonrası Al (α) fazı içinde çözülmüş Si (β) fazlarının kararlı şekilde çökeltmesini sağlar. Bu çökeltme işlemi, ani soğutma sonrası oda şartlarında (doğal yaşlanma) çok yavaş oluşur ya da oluşmaya fırsat bulamaz. Bu süreyi kısaltıp, Si (β) fazlarının kontrollü oluşmasını sağlamak için oda sıcaklığı yerine daha yüksek bir sıcaklıkta tutulmasıyla yapay yaşlanma şartları oluşturulur [18].

1.3.6 Döküm hataları

Literatürdeki döküm hataları incelendiğinde bu hatalar metal dolmaması (eksik dolum), soğuk birleşme, çekme boşlukları, sıcak yırtılmalar, çatlaklar, çarpılmalar, gaz boşlukları, kalıp yüzeyi kopmaları, çapak, segregasyon, cüruf ve pislikler olarak listelenebilir [13]. Endüstrideki döküm hataları incelendiğinde ise çekme hataları, gaz poroziteleri, oksit inklüzyonları en çok karşılaşılan hataların başında gelirler. Alüminyum alaşımları, katılaşma esnasında alaşım tiplerine göre %3,5 ila %6 çekme gösterebilirler. Ergimiş alüminyum alaşımı içindeki hidrojenler de yapıda porozitelere sebep olabilirler. Alüminyumun oksijene ilgisi sebebiyle de yapıda oksit inklüzyonları oluşabilir [18]. Inklüzyonların analizi ise SEM-EDS cihazlarında yapılan analizlerle ortaya konulabilir. ‘Cevher Jant Sanayii’ bünyesinde yürütülen ve yayınlanan başka bir çalışmada, inklüzyonların analizi ve araştırması yapılmış, SEM EDS görüntüleri alınarak içerikleri detaylı olarak araştırılmıştır (Şekil 1.4 ve Şekil 1.5) [25]. Bu analizde, temel alaşım alüminyum içinde yer alan inklüzyon yapısında ağırlıklı olarak oksit, magnezyum, silisyum ve karbon elementleri tespit edilmiştir. Bu elementlerin yanında, Na, K, Fe ve Ca gibi elementlere çok düşük miktarlarda da olsa rastlanmıştır.



Şekil 1.4: İnküzyon örneği [25].

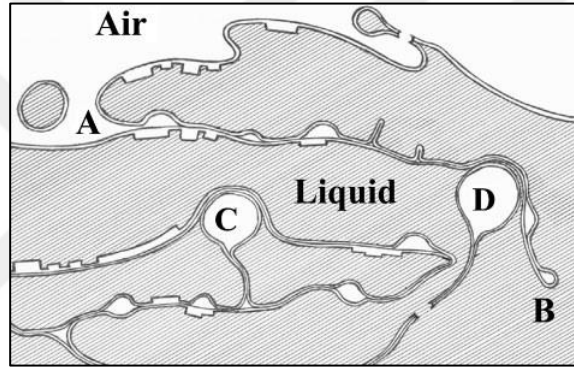


Şekil 1.5: EDS ile inküzyon analizi (a-selected area 1, b-selected area 2, c-EDS Spot 1, d-EDS Spot 2) [25].

Yapıdaki bifilmelerin de mekanik özellikleri olumsuz olarak etkilediği bilinmektedir. Özellikle alüminyumun potansiyel mekanik özelliklerinin altında kalmasının temel nedenlerinden birinin bifilmeler olduğu düşünülmektedir. J. Campbell, bifilmelerin hava

kabarcıkları, gaz mikro poroziteleri, makro ve mikro çekme poroziteleri, sıcak yırtılma ve çatlaklar gibi birçok hatanın kaynağı olduğu, bifilmliğin çatlak gibi davranarak hata başlangıçlarına sebep olduğu sonucuna varmıştır. Alüminyum alaşımlarındaki bifilmliğin yapıdaki tane boyutu, DAS ve ötektik silisyum modifikasyonu ile oluşabileceği ve kontrol edilebileceğini not etmiştir [26].

J. Campbell farklı bir çalışmada birçok metalin dökümü ve transferi esnasında türbülans yaratıldığını ve türbülanslı dökümün de bifilm ve hava kabarcıklarına sebep olduğunu bildirmiştir. Yüzey filmlerinin üst üste gelmesi bifilmliğin nanometre mertebesinde oluşmasına sebep olmaktadır. Çok ince oluşan bifilm tabakaları geleneksel tahribatsız test yöntemleri ile kolaylıkla görülemez [27].



Şekil 1.6: Türbülanslı dökümün şematik görüntüsü [27].

Şekil 1.6'da türbülanslı dökümün bifilm ve hava kabarcıklarına sebep olduğunu şematik olarak gösterilmiştir. Metal çalkalandıkça yüzeyler birbiri üzerinde katlanarak milisaniyeler mertebesinde çok ince -nano ölçekli- yüzey filmleri (Şekil 1.6'da A-B yüzeyi) oluşturur. Katlanma sonrası yeni yüzeyler yeni oksit filmleri oluşturarak yeni yüzey filmleri oluşturmaya devam ederler. Bu yüzey filmleri, katılma sonrası çatlak başlangıcı yaratabilecek risktedir. Bu çift katlanmış filmlere bifilm adı verilir. Diğer yandan, türbülanslı dökümdeki bu çalkantı büyük – küçük hava baloncuklarının oluşmasına neden olur. Katılma sonrası yapıda porozite olarak görülen bu baloncuklar, bifilmliğin de sınırlarında taşıyarak katılma sonrası üründe sızdırmaya sebep olabilecek mikro çatlaklara neden olabilir [27].

Türbülanslı döküm riski sıvı metal akış hızının artmasıyla artmaktadır. Sıvı metal akış hızı alüminyum için yaklaşık 0,5 m/s'dir. Döküm hızı ince ve karmaşık kesitlerde yükseltilebilmesine rağmen serbest düşüşle akışı türbülans riskini arttırabilir. Serbest

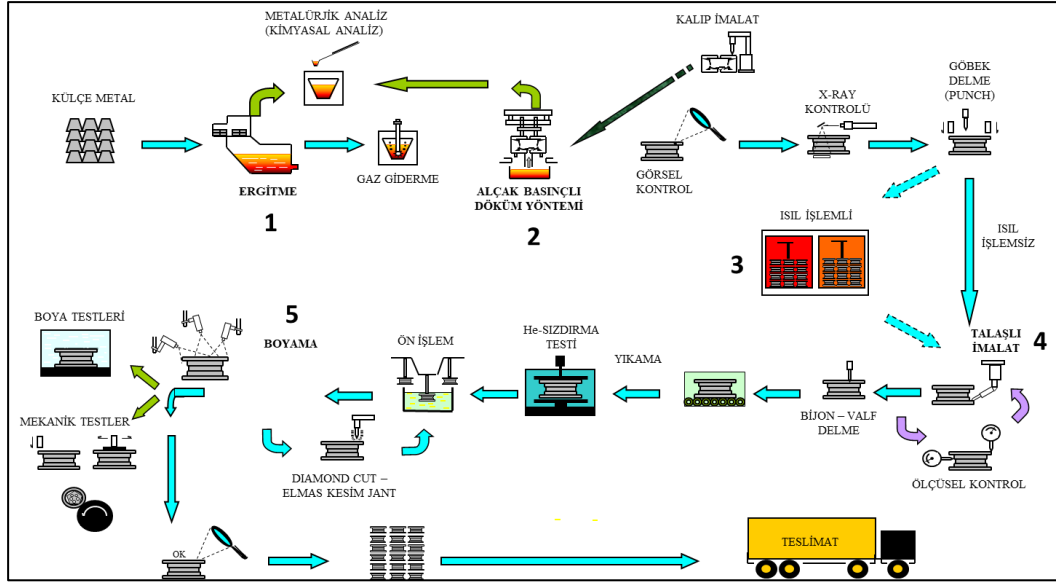
dökme (gravite döküm) oksit tabaka ve bifilm miktarlarını da arttırarak mekanik özelliklerde olumsuzluğa sebep olabilir [28, 29]. Bu durum, jant ürünün alçak basınç döküm yöntemi ile hızı kontrol edilerek dökülmesinin nedenlerinden birkaçıdır.

Sıvı metal kirliliği de endüstride en sık karşılaşılan hatalardan biridir. Sıvı metal döküme geçmeden önce azot gazı verilerek gaz giderme işlemi yapılarak sıvı metal yüzeyinde toplanan cürufklar sürekli olarak temizlenmelidir. Kirli metal, yapıda oksit, empürite ve kalıpta aşınmalara sebep olabilir [28, 29].

Son olarak, artık (kalıntı) gerilmeler sıcaklık farkları, kaynak uygulamaları ya da plastik deformasyonlar ile iç yapıda çekme ya da basma şeklinde oluşan elastik gerilmelerdir. Bu elastik gerilmeler ürünün maruz kaldığı dış gerilmelerle birleşerek parça ömrünü etkileyebilir [28, 29]. Jant ürünü özelinde, uygulanan T6 ısıl işlemi malzemede sıcaklık yükselmesi (çözeltiye alma) ve ani sıcaklık düşmesi (su verme) sebebiyle iç yapıda artık (kalıntı) gerilmeler oluşturabilir. Bu artık (kalıntı) gerilmeler, özellikle çekme ve yorulma test şartları altında, yapının normalde hasar görüleceği dayanım limitlerine daha kısa sürede ulaşarak ürünün ömrünü olumsuz olarak etkileyebilir.

1.4 Alüminyum Alaşımli Jant Dökümü

Alüminyum alaşımli jant imalat süreci tercih edilecek üretim yöntemine göre döküm ya da dövme yöntemleri ile üretilebilir. Bu bölümde jant endüstrisinde yaygın uygulaması olan alçak basınç döküm yöntemi ile alüminyum alaşımli jant dökümü detaylanacaktır. Üretim süreci genel bakışta külçe halindeki metalin jant ürününe dönüşmesidir. Bu dönüşüm süreci beş ana adımdan oluşur. Bu ana adımlar; Ergitme, alçak basınç döküm, ısıl işlem talaşlı imalat ve boyama süreçleridir. Bu ana adımlar yanında alçak basınç döküm içerisindeki kalıp imalat süreci, talaşlı imalat süreci içindeki diamond cut (elmas kesim) işlemi gibi yan süreçler de müşteri taleplerinin karşılanması için önemli süreçlerdendir. Şekil 1.7’de alüminyum alaşımli jant üretim iş akışı ve bu akış içerisinde yer alan ana ve yan süreçler gösterilmektedir. Bu iş akışı, çalışmanın yürütüldüğü ‘Cevher Jant Sanayii’nin iş akışının şematik gösterimi olup farklı imalatçılar için farklılık gösterebilir. İş akış şemasında detayı görüleceği üzere, Özet olarak, 5 ana imalat noktası tanımlanabilir. Bu noktalar; ergitme süreci, alçak basınçlı döküm yöntemi ile döküm süreci, -jant malzemesine bağlı olarak yapılan- ısıl işlem uygulaması, talaşlı imalat süreci ve boyama sürecidir.



Şekil 1.7: Alüminyum alaşımlı jant üretim iş akışı şeması [30].

Alüminyum alaşımlı jant döküm süreci külçe metallerin alınması ve tanımlı giriş kontrol testleri sonrası kabulü ile başlar. Uygun olmayan külçeler reddedilerek üretime dahil edilmez. Külçe metalin malzemesine göre ergitme ocağına (Şekil 1.8) transferi sağlanarak ergitme süreci başlar. Ergitme, iki ana ergitme ocağında iki ana metal (AlSi7Mg ve AlSi11Mg) için yapılır. Bu çalışmadaki literatür araştırması bölümünde detaylandırıldığı gibi alüminyum alaşımlı jant malzemesinin tamamına yakını AlSi7Mg ya da AlSi11Mg olarak talep edilir. Bu iki ana malzeme için iki ayrı ergitme ocağında külçe metaller ergitilir. İki ana ergitme ocağı yanında, talaşlı imalat sürecinden çıkan talaşlar da talaş ergitme ocağında ergitilir. Bu çalışmada yapıldığı gibi, farklı alaşımlar da daha küçük boyutlardaki deneme üretim ergitme ocaklarında hazırlanabilir. Ergitme sürecinde, ocaklardaki kimyasal içerik periyodik olarak analiz edilerek ilgili standart ve şartnamelerde tanımlı limitler içinde olduğu kontrol edilir. Bu limitler, müşteri tarafından farklı standart ve şartnamelerde tanımlanarak tanımlı tüm elementlerin bu aralıkta olması zorunlu tutulur. Bu zorunluluktan ötürü kimyasal analizler hem ergitme ocağında, hem transfer potasında hem de bekletme ocağından periyodik olarak takip edilir. Sıvı metal yanında, alçak basınçlı döküm tezgahı sonrasında elde edilen jantlarda da kimyasal analiz periyodik olarak kontrol edilerek kayıt altında tutulur. Böylece olası limit dışına çıkılma riski en düşük seviyede tutulması çalışılır. Yine de bu düşük riskin oluşmasına karşı ilgili elementler sürekli hazır tutularak olası limit dışına çıkılması durumunda malzeme eklentileri yapılarak limit içinde kalınır.



Şekil 1.8: Ergitme ocağı.

Kimyasal kompozisyonun uygunluğu kontrol edildikten sonra ergitme ocağındaki metal transfer potasına verilerek gerekli malzeme eklentileri yapılır. Tane inceltme, modifikasyon ve alaşımlandırma işlemleri malzeme eklentisiyle yapılır. Tane inceltme imalatında TiBor olarak adlandırılan $AlTi_5B_1$ malzemeli çubuklar eklenerek yapılır. Tane inceltme, tanelerin küçültülerek tane sınırlarının artırılması ve yapıdaki dislokasyon / hasarların ilerlemesini geciktirmesi ve mekanik dayanımın artırılması amacıyla yapılmaktadır. Modifikasyon ise alüminyum – stronsiyum ($AlSr_{15}$) malzemeli çubuklar eklenerek yapılır. Modifikasyon ile kaba ve iğnemsî yapının yuvarlatılması, tane inceltmeye benzer şekilde yapıdaki dislokasyon / hasarın ilerlemesinin zorlaştırılması prensibine dayanır. Alaşımlandırma ise yapıya magnezyum eklenmesiyle gerçekleştirilir. Yapıdaki magnezyum yüksek miktarlara ulaştığında Mg_2Si fazı mekanik özelliklere olumsuz etki edebilir. Bu sebeple, yapıdaki magnezyum %0,3 seviyesinde sınırlanmaktadır. Yapıdaki magnezyumun oluşturduğu Mg_2Si fazı yapının mekanik özellikleri yanında darbe dayanımına da olumsuz etki edebilir.



Şekil 1.9: AlTi₅B₁, AlSr₁₅ ve Mg malzeme eklentileri.

Malzeme eklentileri sonrası sıvı metale gaz giderme işlemi (Şekil 1.10) yapılır. Gaz giderme işleminin amacı sıvı metal içindeki hidrojen partikülleri, oksit, cüruf ve pisliklerin temizlenmesidir. Gaz giderme için farklı seçenekler (Argon gazı) olsa da imalatta maliyet düşüklüğü sebebiyle azot gazı tercih edilmektedir. Gaz giderme, sıvı metal içine azot (N) gazı verilerek yapıdaki hidrojenlerin yapıdan uzaklaştırılarak yapıda porozite, oksit gibi döküm hatalarını minimize etmek için uygulanır.



Şekil 1.10: Azot (N) gazı vererek gaz giderme süreci.

Gaz giderme sonrası temizlenen metal transfer potası aracılığıyla alçak basınç döküm tezgahına transfer edilir (Şekil 1.11). Bekletme ocağına transfer edilen metal 720±10 °C’de döküm için bekletilir. Bu bekletme sürecinin malzeme eklentilerin mekanik özelliklere olumsuz etkisi olduğu önceki çalışmalardan görüldüğünden transfer sonrası zaman kaybetmeden jant dökümüne geçilir.



Şekil 1.11: Transfer potasından bekletme ocağına transfer.

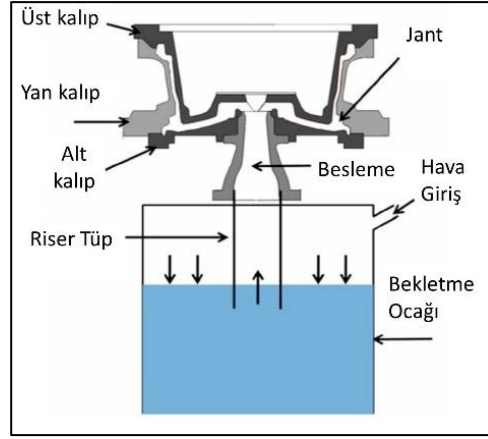
Alçak basınç döküm tezgahı ve kalıp yapısı Şekil 1.12’de görülmektedir.



Şekil 1.12: Alçak basınç döküm tezgahı.

Kalıp yapısı daha yakından incelendiğinde üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler; alt kalıp, üst kalıp ve yan kalıplardır.

Jant dökümü, bekletme ocağına düşük basınç (yaklaşık 1 bar) verilmesiyle riser tüpten yükselerek beslemeden geçerek kalıp boşluğunun doldurulması şeklinde gerçekleştirilir (Şekil 1.13). Kalıbın dolması tamamlandıktan sonra katılaşma süreci başlayarak jant ürünü elde edilir.



Şekil 1.13: Alçak basınç dökümün şematik gösterimi [31].

Katılaşma esnasında yönlendirilmiş katılaşmayı elde edebilmek için kalıba yerleştirilen soğutma borularından hava, su ya da mist (hava – su karışımı) geçirilerek soğutma sağlanabilir. Proses süresi farklı modellerde değişiklik gösterebilmesi yanında 300 s civarındadır. Katılaşma sürecinde sonra yan kalıplar ve üst kalıp ayrılarak jant ürünü elde edilir. Bu adımda elde edilen jant elle tutulamayacak kadar sıcak (300 °C – 400 °C) olduğundan su havuzunda soğutulur. Burada temel amaç herhangi bir iş sağlığı ve güvenliği riski oluşturmamaktır. Soğutulan jantın kaba çapakları alını göz kontrolünden geçirildikten sonra konveyöre verilerek X-Ray istasyonuna doğru ilerletilir. İlgili standart ve şartnamelere göre dökümü tamamlanan jantlar % 100 olarak X-Ray kontrolünden geçirilir (Şekil 1.14).



Şekil 1.14: X-Ray kontrol odası [32].

X-Ray kontrolünden çıkan jantların göbek kısmında bulunan filtrenin alınması için göbek delme işlemi yapılır. Filtreler, sıvı metal içinde kalabilecek oksitleri ve pislikleri tutmaya yarar. Uygun olan jantlar kabul konveyöründen ilerletilirken uygun olmayan jantlar ret konveyöründe toplanarak geri dönüşüm için ana ergitme ocağına gönderilir.

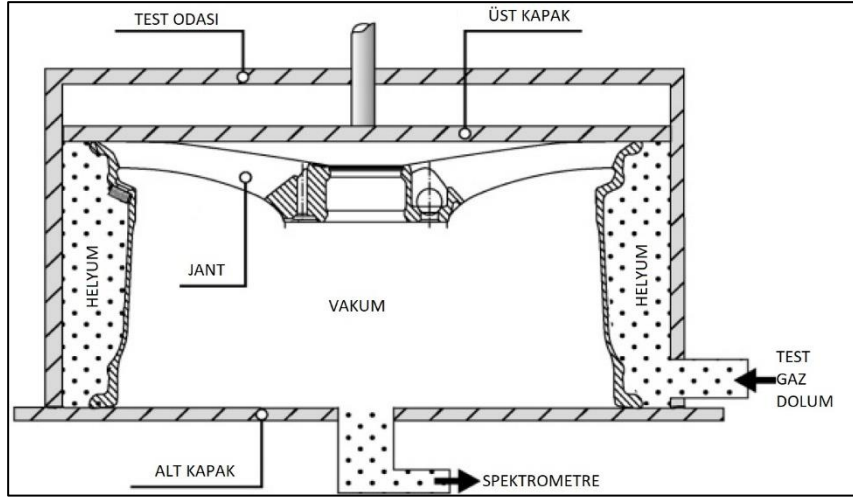
Uygun olan jantlar malzeme özelliklerine göre ısıtma tesisine ya da direkt olarak talaşlı imalat sürecine yönlendirilir. Literatür araştırmasında detaylandırıldığı gibi, AlSi7Mg malzemeli jantlar mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla T6 ısıtma işlemi için ısıtma tesisine gönderilir (Şekil 1.15). AlSi11Mg malzemeli jantlara ise ısıtma işlemi uygulanmayacağı için direkt olarak talaşlı imalata sevk edilir.



Şekil 1.15: Isıtma tesisleri [32].

Isıtma tesisleri döküm sürecinin son adımıdır. Dökümü tamamlanan jantlar ‘brüt jant’ olarak adlandırılır, brüt jantta lastik kesiti, bijon delikleri, çekme ve talaş payları bırakılır. Jantın boyutsal olarak teknik resimde tanımlanan ölçülerine getirilerek ‘net jant’ haline getirilmesi talaşlı imalat sürecinde yapılır. Talaşlı imalat süreci üç ana adımdan oluşur. Bu adımlardan ilkinde (1. Operasyon) jant stil yüzeyinden aynaya bağlanarak lastik yüzeyi işlenir. İkincisinde (2. Operasyon) ise iç flanştan bağlanarak lastik yüzeyinin kalan kısmı işlenir. Üçüncüsünde ise (Bijon delme) brüt jant halinde kapalı olan bijon ve valf delikleri delinir. Son olarak tesviyeleri de yaparak talaşlı imalat kontrol adımlarına geçilir. Kontrol sürecinde, 100% jant balans kontrolü, %100 sızdırmazlık kontrolü (helyum sızdırma testi), ölçüsel kontroller ve fırçalama işleri ile talaşlı imalat süreci tamamlanır.

Şekil 1.16’da dökülen jantlara %100 olarak uygulanan sızdırmazlık testi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.16: Helyum sızdırma testinin şematik gösterimi [33].

Sızdırmazlık testi en ince gazlardan biri olan helyum ile yapılır. Lastik yüzeyi, stil yüzeyi ve valf kapatılarak helyum gazı verilir. Göstergede oluşabilecek farklılıklara göre de lastik yüzeyinden gaz sızdırma olup olmadığı kontrol edilmiş olur. Tüm ölçüsel kontroller ve testler sonrası ürünler son üretim süreci olan boya prosesine ilerletilir. Boya prosesi de üç temel adım olup bunlar; toz boya (Şekil 1.17), yağ boya (Şekil 1.18) ve vernik uygulamasıdır.



Şekil 1.17: Boya sürecindeki toz boya uygulaması [32].



Şekil 1.18: Boya sürecindeki yaş boya uygulaması [32].

Jantlar boya uygulaması öncesi farklı kimyasallarla temizlenerek boya prosesine hazır hale getirilir. Toz boya uygulaması korozif ortamda oksitlenmeye müsait alüminyumun dış etkilerden korunması için yapılır. Toz boya sonrası -boyanması talep edilmeyen montaj bölgesi hariç- tüm jant koruyucu boya katmanı ile kaplanmış olur. Yaş boya uygulaması ise son kullanıcı talebine göre görsel renklendirme için yapılır. Gri, siyah, beyaz ya da müşteri talepli farklı renkler jantlara uygulanabilir. Son olarak da jantın görsel kalitesini arttırabilmek için vernik uygulaması yapılarak jant imalat süreci bitirilir. Son zamanlarda talebi giderek artan elmas kesim ‘*diamond cut*’ modelli jantlar için ek işleme süreci yürütülür. Bu ek işlem için boyanan jantlar tekrar talaşlı imalat sürecine alınarak stil yüzeyi işlenir. Bu işleme sonrası boyanın altından alüminyum görünür hale gelir. Bu alüminyumun doğal rengi de korunması için tekrar vernik uygulaması yapılarak renk korunmuş olur.

Son adımda görsel kontrollerden de geçirilen jantlar ambalajlanıp teslimata verilmesi için ambara sevk edilerek süreç tamamlanır. Böylece külçe metal olarak alınan malzeme jant ürününe dönüştürülmüş olur.



2. MALZEME VE YÖNTEMLER

Giriş bölümünde detaylandırıldığı gibi ana otomotiv üreticileri alüminyum alaşımlı jant ürünü malzemesi AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımları olarak talep edilmektedir. T6 ısıl işlem ise bu malzemelerden sadece AlSi7Mg alaşımlarına uygulanır. Böylece mevcut mekanik özellikleri artırılır. Bu çalışmada ise, alternatif alaşımlı jant malzemesi olarak AlSi9Mg oluşturularak mekanik özellikleri iyileştirme üzerine geliştirme çalışmaları yapılacaktır. Bu durum, çalışmaya kendi alanında özgünlük de getirecektir.

Bu çalışmada hem mevcut alaşımlı malzemeler hem de alternatif malzeme detaylı olarak irdelenecektir. Bu malzemelerin kimyasal içerikleri ve mekanik özellikleri incelendikten sonra bu özelliklerin ölçülmesi için gerekli olan ölçüm ve test sistemleri detaylandırılacaktır. Kimyasal içeriğin ölçülmesi için spektrometre, mekanik özelliklerin ölçülmesi için de çekme testi, sertlik testi mikro yapı ve makro yapı incelemeleri yapılacaktır.

2.1 Malzeme

Jant imalatında kullanılan ana malzemeler AlSi7Mg ve AlSi11Mg yanında alternatif malzeme AlSi9Mg alaşımının kimyasal içerikleri çizelge 2.1'de verilmiştir [34]. Birincil alüminyum döküm alaşımları verilen bu çizelgedeki değerler ile imalatta elde edilen kimyasal içerikler limitler içinde yer aldıkça farklılık gösterebilir. Literatürdeki kimyasal analiz değerleri yanında, ana üreticiler tercih ettikleri malzemenin kimyasal analiz değerleri ilgili standart ve şartnamelerle tanımlanıp takip edilmektedir. İmalat esnasında bu limitlerin içinde üretim yapıldığı kimyasal içerik analiz cihazı spektrometre ile sürekli kontrol edilmeli ve kanıt dokümanlarla kayıt altında tutulmalıdır. Şüphesiz ki, literatürdeki değerler ve uygulamada tanımlanan standart ve şartnamelerde farklılık oluşabilir. Bu farklılık durumunda, firmalar için esas alınması gereken limitler müşterisi tarafından tanımlanan standart ve şartnamelerdir. Bu çalışmada ise, alternatif alaşımlı malzemenin henüz müşteri tarafından tanımlanmamasından dolayı literatürdeki bilgi ve limitlerden yararlanılmıştır.

Çizelge 2.1: İlgili alüminyum alaşımlarının kimyasal analizi [34].

Kimyasal Kompozisyon	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
AlSi7Mg	6,5-7,5	0,15	0,02	0,10	0,30-0,45	0,07	0,10-0,18
AlSi9Mg	9,0-10,0	0,15	0,02	0,05	0,30-0,45	0,07	0,15
AlSi11Mg	10,0-11,8	0,15	0,02	0,05	0,1-0,45	0,07	0,15

Optik emisyon spektrometre (OES) cihazı ile numune parça üzerine gönderilen ark ile yüzeyde yakma meydana getirilir. Yüzeyden yayılan dalga boylarına göre de numune içindeki elementler belirlenir. Hızlı ve doğru sonuçlar vermesi sebebiyle optik emisyon spektrometre sanayide yaygın olarak tercih edilir. Değerlerin okunması için en az 3 olmak üzere yakma işlemi yapılır (Şekil 2.1). Böylece ortalama değer bulunmaya çalışılır. Belli aralıkla, içeriğindeki element oranları bilinen master parçalar kullanılarak ekipman doğrulaması yapılır. Bu çalışmada yapılan kimyasal içerik analizleri ‘Cevher Jant Sanayii’ laboratuvarları bünyesinde bulunan ARL Marka Spektrometre ile TS EN 1706 Standartlarına uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 2.1: Kimyasal içeriği ölçülen numune örneği.

Mevcut ve alternatif alaşımlı (AlSi9Mg) malzemelerin mekanik özellikleri ise Çizelge 2.2’de verilmiştir [34]. Literatürdeki mekanik özellikler belirlenirken numunelerden faydalanılan örnekler incelenmiştir. Literatürde bu çalışmada çalışılan alternatif alaşımlı jant malzemesi ile dökümü gerçekleştirilen jant çalışmasına rastlanmadığından mekanik özelliklerine numune üzerinden ulaşmak zaruri hale gelmiştir. Bu çalışma sonrası, literatürdeki bu boşluk da doldurulmuş olacaktır.

Çizelge 2.2: İlgili alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri [34].

Kimyasal Kompozisyon	Akma Dayanımı [MPa]	Çekme Dayanımı [MPa]	Birim Uzama [%]	Brinell Sertlik [HB]
AlSi7Mg T6	220	290	5	90
AlSi9Mg	90	180	2	60
AlSi11Mg	80	170	7	45

Literatürdeki bu değerlerin birincil alüminyum döküm alaşımları için olduğu; kalıp geometrisi, kalıp soğutmaları, kalıp malzemesi, döküm şartları, alaşım içeriği, ısıtım işlem durumu gibi birçok nedenden dolayı farklılıklar gösterebileceği not edilmelidir. Sanayi uygulaması olan her çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da mekanik özellikler için referans alınacak limitler ana sanayi tarafından tanımlanan ilgili standart ve şartnamelerdir. Referans standart ve şartnameler değerleriyle gerçek döküm sonrası elde edilen değerler bu çalışmanın ‘Bulgular’ kısmında verilecektir. Numune ve ürün mekanik özellikleri ise DIN 50125 standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin EN ISO 6892-1:2016 standardına uygun olarak yapılması ile belirlenir. Bu çalışmada yapılan çekme testleri ‘Cevher Jant Sanayii’ laboratuvarları bünyesinde bulunan Zwick marka Z100 model (100 kN) çekme test cihazı ile ilgili standartlara uygun olarak yapılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Çekme test cihazı.

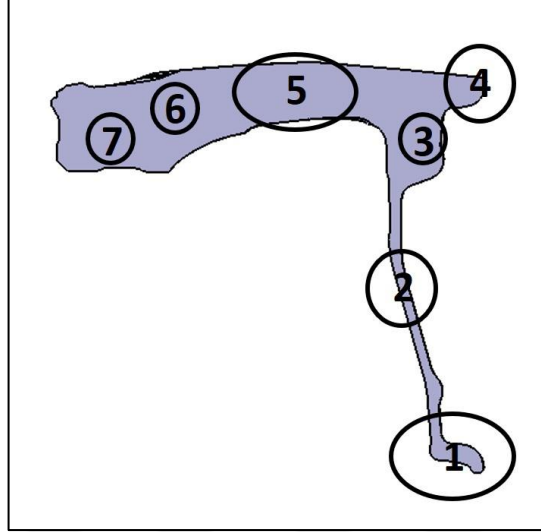
Çekme testleri sonrası numune ve ürünün akma dayanımı (*YS: Yield Strength*), çekme dayanımı (*UTS: Ultimate Tensile Strength*) ve % Birim uzama (*% Elongation*) elde edilmektedir.

Mekanik özellikler içinde yer alan sertlik ölçümünde ise Brinell sertlik değerleri ‘Cevher Jant Sanayii’ laboratuvarları bünyesinde bulunan Qness marka Q250CS model (2,5mm/62,5 Kg) Brinell sertlik ölçüm cihazı (Şekil 2.3) ile TS-139-1 EN ISO 6505-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Brinell sertlik değeri hesaplanırken belirli yükün, çapı bilinen sert bilyeye (ölçümü yapılacak parçadan daha sert) uygulanması ve ölçülecek numune üzerinde bırakılan izin çapı ile bağlantısı kullanılır. Bu hesaplama ölçüm cihazlarında otomatik olarak yapılarak kullanıcıya herhangi bir hesap ihtiyacı oluşturmadan direkt olarak sonucu verir.



Şekil 2.3: Brinell sertlik ölçüm cihazı.

Jant kesiti üzerinde sertlik ölçümü yapılan bölgeler ise şekil 2.4’te tanımlanmıştır. Bu bölgelerden 1 numaralı bölge iç flanş, 3 numaralı bölge dış flanş ve 5 numaralı bölge ise feder bölgesi olarak tanımlanmaktadır.



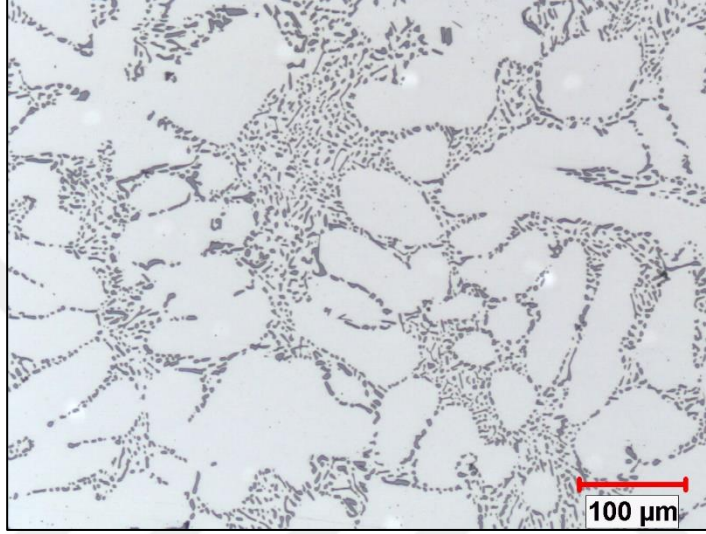
Şekil 2.4: Jant kesitinde sertlik ölçümü alınan bölgeler.

Bu çalışmada yapılan mikro yapı analiz ve görüntüleri ‘Cevher Jant Sanayii’ laboratuvarları bünyesinde bulunan Nikon marka Clemex model optik mikroskopta ile ilgili standartlara uygun olarak farklı büyütme oranları kullanılarak alınmıştır.



Şekil 2.5: Optik mikroskop.

Mikro ve makro yapılar ise *American Foundrymen's Society*'nin (AFS) tanımladığı yapılar ile karşılaştırılarak sınıflandırılır. Mikro yapı analizi için numune standart metalografik tekniklere göre hazırlanır. Numuneler farklı inceliklerdeki SiC zımparalarla zımparalandıktan sonra keçe ve pasta kullanılarak parlatılır. Yüzey alkol ve saf su ile temizlendikten sonra 0,5% oranında hidroflorik (HF) çözeltisi ile yüzey dağlandıktan sonra optik mikroskop altında incelenir (Şekil 2.6). Makro yapı ise jant kesitinin dağlanması sonrası incelenir (Şekil 2.7)



Şekil 2.6: AlSi9Mg mikro yapı örneği.



Şekil 2.7: AlSi9Mg jant kesit mikro yapı örneği.

2.2 Tasarım Doğrulamada Sayısal Yöntem

Jant ürünü bazında doğrulama çalışmaları ‘tasarım doğrulama’ ve ‘ürün doğrulama’ olarak iki ana adımda yürütülür. Doğrulama çalışmaları yürütülürken de sayısal ve deneysel yöntemler kullanılır. Tasarım doğrulama çalışmaları esnasında öncelikli olarak sayısal yöntemler kullanılarak çözüme gidilir. Sayısal yöntemlerin öncelikli olarak tercih edilmesinin sebebi, deneysel yöntemlere göre çok daha hızlı ve ekonomik olmasıdır.

Tasarım doğrulama çalışmaları esnasında tasarımı çizim programları yardımıyla tamamlanan jant üzerinde müşteri tarafından tanımlanan deneysel testler gerçekleştirilmeden önce sayısal yöntemle gerçekleştirilmesi ve çözümler elde edilerek yapılacak değişikliklerin henüz tasarım aşamasında yapılması sağlanarak büyük maliyet kazançları sağlanır. Tasarım doğrulamadaki sayısal yöntemler ve çözümler belirlenirken en önemli nokta sınır şartların deneysel yöntemdekine benzer şekilde belirlenmesi gereğidir. Ancak bu sınır şartların doğru tanımlanması ile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilir.

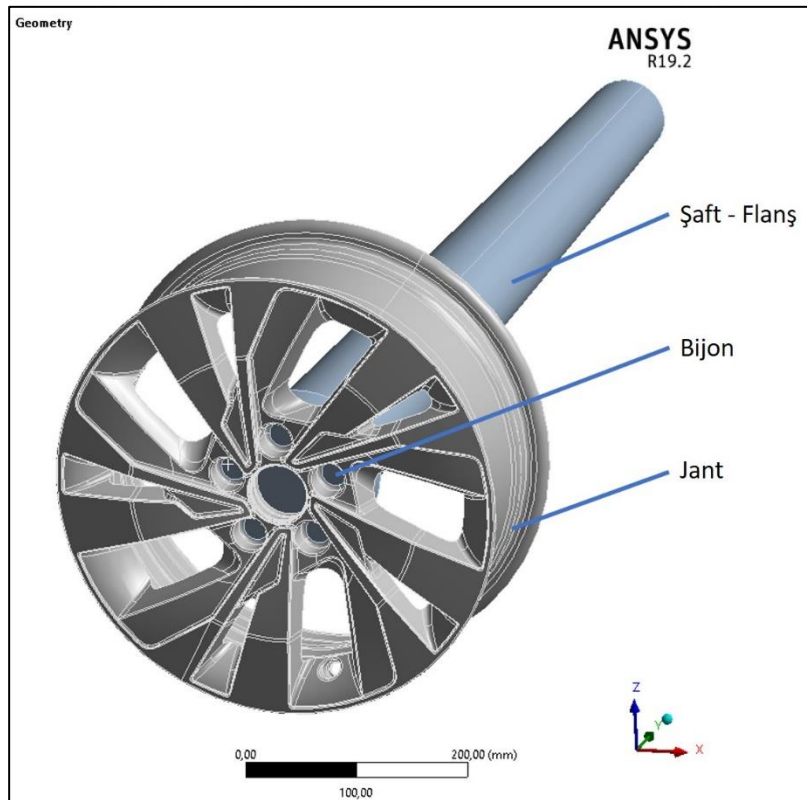
Tercih edilecek olan sayısal yöntem yapılacak olan doğrulama çalışmasına göre farklılık gösterir. Bu çalışmada, tasarım doğrulama aşamasında ISO – 7041 standardına uygun şekilde yapılan 13° Darbe testi (*13° Impact test*) ve yorulma testi (*Cornering fatigue test*) simülasyonu sonlu elemanlar metodu kullanarak sayısal çözüm sunan Ansys yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Her iki simülasyonda da farklı yaklaşımlar kullanıldığından Ansys yazılımının farklı modülleri kullanılmıştır. Yorulma testi için Ansys Workbench yazılımının statik analiz hesap modülü kullanılırken, darbe testi için ise ani yük değişimlerinin (darbe, patlama vb.) hesaplanabildiği explicit hesap modülünün olduğu Ansys LS Dyna yazılımı kullanılmaktadır.

Jant, görsel bir ürün olmasının yanında temel bir emniyet parçası olduğundan üzerine tanımlanmış testlerden uygun olarak geçmesi hayati önem taşımaktadır. Bu testlerin de sayısal olarak gerçekleştirilmesi esnasında gerçek durum koşulları düşünülerek simüle edilmesi olası riskleri en aza indiren önemli bir etmendir. Örneğin, yorulma testi esnasında janta gelebilecek yükün oluşturduğu moment hesaplanarak jantın yol şartlarında nasıl davranacağı simüle edilmektedir. Yol şartları sonrası jantın yorulma hasarına karşı davranışı bu şekilde simüle edilebilir.

2.2.1 Yorulma test simülasyonu

Yorulma test simülasyonu gerçekleştirilirken, Tasarım Doğrulama Deneysel Yöntem' başlığında detaylanan test şartları Ansys Workbench yazılımına tanımlanır. Bu şartlar, malzeme özelliklerinin tanımlanmasıyla başlanır. Alüminyum alaşımları için istenen özelliklere sahip malzemeler yazılımın malzeme kütüphanesi bulunmaması durumunda, kullanılan malzemenin yoğunluk ve Young Modülü değerleri yazılım kütüphanesine tanıtılarak malzeme oluşturulur. Malzeme tanıtımı tamamlandıktan sonra yazılıma göre; Geometri, malzeme, bağlantılar, ağ yapısı (*mesh*), ve sınır şartları girilir. Sonuç kısmında ise hesaplanmak istenen değerler seçilir. Bu değerler müşteri tarafından jant üzerinde oluşan Von-Mises ve maksimum eşdeğer gerilmenin değeri olarak belirlenmiştir. Bu talebin yanında hesaplanmak istenen farklı sonuçlar da seçilebilir.

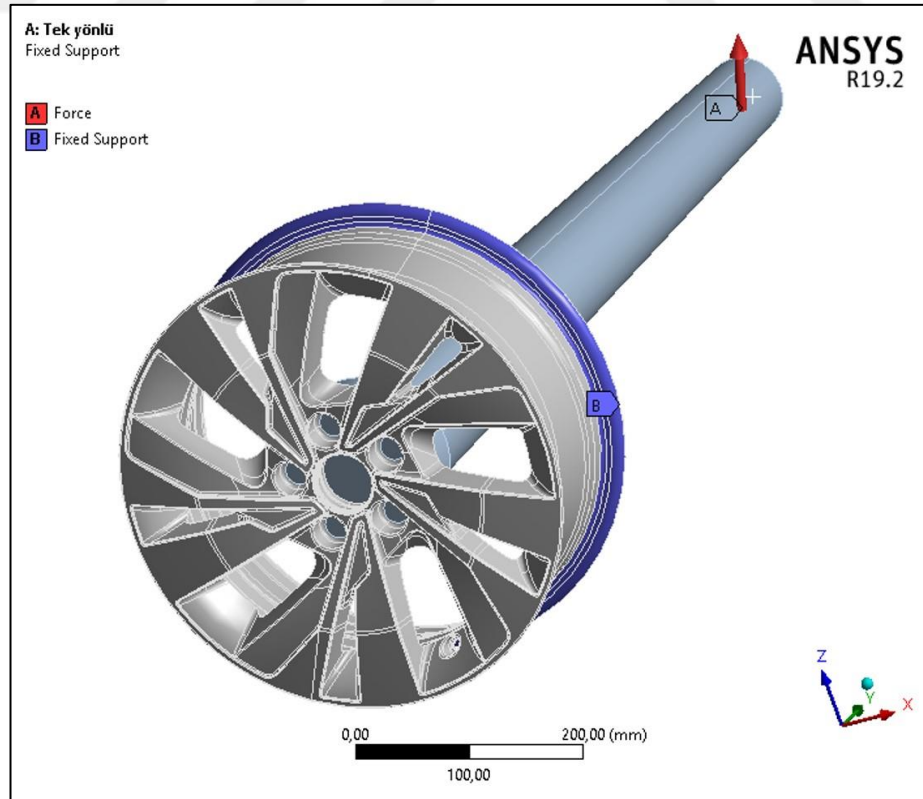
Malzeme girdisi sonrası analiz geometrilerin tanımlanması ile devam eder. Bu geometriler; jant, bijonlar ve şaft - flanş kısmı olarak tanımlanır. Burada önemli noktalardan biri jant malzemesi olarak alüminyum tanımlanırken, bijon ve şaft - flanş için deneysel yorulma testinde kullanılan malzemelerin bilgilerinin tanıtılması gereğidir. Malzeme bilgilerinin doğru olmaması yanlış hesaplama riskini arttırabilir.



Şekil 2.8: Yorulma test simülasyonu için tanımlanan geometri.

Geometri tanımından sonra, daha önce kütüphaneye tanımlanan malzemeler ilgili geometrilere atanır. Bağlantılar ise, farklı parçaların birbirine temas ettiği bölgelerin seçilmesi ile gerçekleştirilir. Bu bağlantılar; bijonların janta, jantın flanşa temas ettiği bölgeler olarak tanımlanır. Şafta uygulanacak kuvvetin janta iletilmesi ve etkilerinin görülmesi için bağlantıların tanımlanması önemlidir. Bağlantıların tanımlanmasından sonra sistemin sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmesi için ağ yapısının (*mesh*) kurulması işlemi yapılır. Ağ yapısının kurulması aşamasındaki en önemli nokta, elemanların hesabı gerçek sonuçlara yaklaştırmak için olabildiğince küçük, hesaplama süresinin ise uzun iş saatlerine mal olmayacak kadar büyük olması gereğidir. Gerçek hesap değerlerine ulaşmanın önemi kadar, seri imalat yapan bir kuruluşun zaman önemi de düşünülerek belirlenen ağ yapısı tüm geometri için tanımlanır.

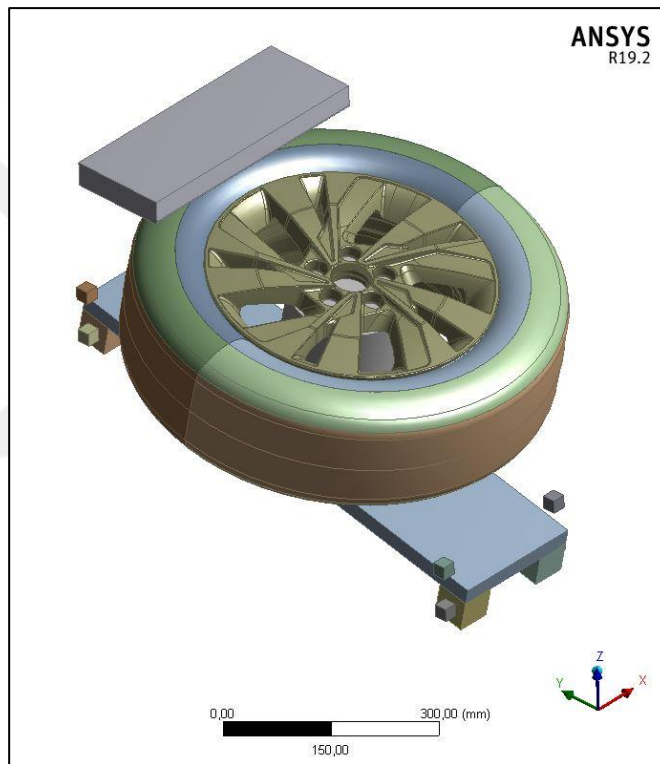
Son olarak da sınır şartları belirlenerek (Şekil 2.9) hesaba geçilir. Sınır şartlarının belirlenmesinde janta tanımlanan kuvvetin hesaplanması büyük önem arz etmektedir. Bu kuvvetin hesaplanması için mevcut proje detayı bilgileri ve emniyet katsayıları kullanılarak detaylı hesaplama yapılmaktadır. Bu detaylı hesaplamalar jant modeline göre değişkenlik gösterebilir. Bu çalışmada, elde edilen sonuçlar ‘Bulgular’ başlığından detaylı olarak verilecektir.



Şekil 2.9: Yorulma test simülasyonu için sınır şartları.

2.2.2 13° Darbe test simülasyonu

13° Darbe testinde jantın tanımlı bölgelerine (sibop üstü ve feder üstü) gelen yanal yüklere karşı vereceği sonuçlar incelenir. Bu test, günlük hayatta jantın kaldırılma vurması sonucu ya da yanal eksende hasarlanması ve lastik havasının belirli süre korunması gereğine karşılık gelmektedir. Testin 13° Darbe testi olarak adlandırılmasının nedeni, jant merkez eksenine ile test düzeneği eksenine arasındaki 13°lik açıdan kaynaklanmaktadır. Deney düzeneği çizimleri ISO 7141 standardında detaylı olarak paylaşılmış [35] ve bu çalışmada da ‘Tasarım Doğrulama Deneysel Yöntem’ başlığında ilgili standart referanslanarak verilmiştir.



Şekil 2.10: 13° Darbe test simülasyonu için tanımlanan geometri.

13° Darbe testi, ISO 7141 standardına uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Test esnasında ani yükleme sebebiyle simülasyonu esnasında explicit çözüm yaklaşımı kullanılan Ansys LS Dyna modülü kullanılmaktadır. 13° Darbe testinin lastik montajı yapılan jant üzerinde yapılmasından dolayı simülasyon öncesi geometri tanımlanması esnasında lastik parçasının da tanımlanması gereklidir. Geometri adımlarında, deneysel tezgahın diğer elemanları (koç başı, jantın bijonlardan montaj edildiği aparat, aparatın zemine temas ettiği kısımdaki bağlantılar) da geometrik olarak yazılıma tanımlanır (Şekil 2.10).

Koç başı ağırlığı jant projesinde tanımlanan ağırlığın hesaplanması sonucu ayarlanarak jant üzerine serbest düşme şeklinde bırakılır. Bu hesaplamalar emniyet katsayılarının da hesaba katıldığı detaylı bir hesaplama olması yanında ilgili araştırmacılara fikir vermesi amaçlı, kabaca araç ağırlığının yarısı olarak öngörülebileceği not edilebilir.

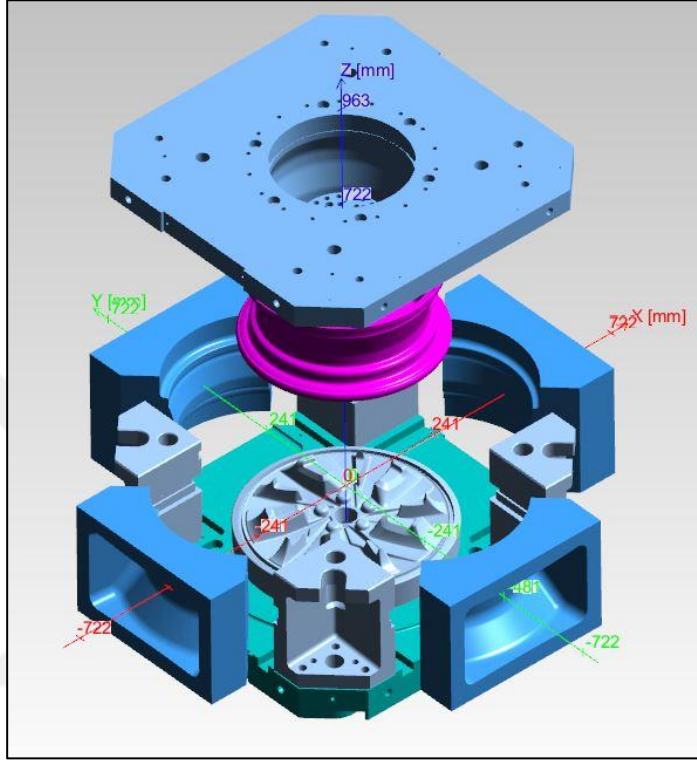
Tüm zamana bağlı dinamik testlerde olduğu gibi, darbe testlerinin de hesaplama süreleri çok yüksektir. Hesaplama süresinin azaltılması için -yorulma test simülasyonuna benzer şekilde- uygun ağ yapısı (mesh) seçilmesi yanında zamana bağlı hareket eden koç başının ilk durumda sahip olduğu potansiyel enerjinin janta vurmasına yakın durumda kinetik enerjiye dönüşümü, ilk hız tanımlanması yapılarak hesaplama sürecini kısaltıcı bir önlem olarak tercih edilebilir.

Deneysel kısımda, jantta çatlak, kırılma, hasar ve lastik basınç düşmesi olarak kontrol edilen hasar kriterleri simülasyon aşamasında ise -yorulma test simülasyonuna benzer şekilde- Von-Mises ve maksimum eşdeğer gerilme değeri hesaplanarak belirli limitlerin altında olması gereği kontrol edilir.

2.3 Ürün Doğrulamada Sayısal Yöntem

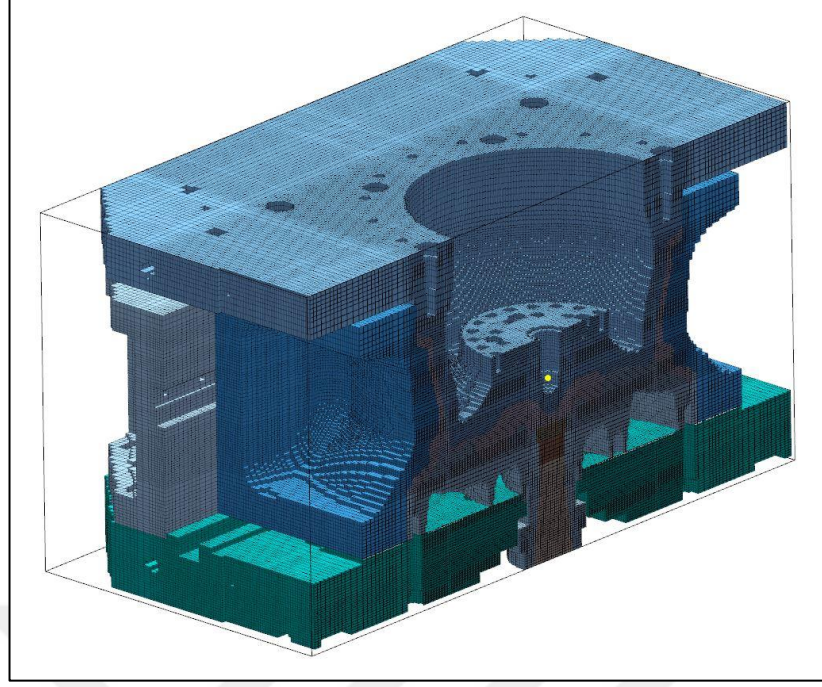
Ürün doğrulama aşaması ise 3 boyutlu çizim programları ile çizimi ve tasarım doğrulaması tamamlanmış jant ürünü için kalıp çıkarılması ile başlanır. Kalıp temel olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler; alt kalıp, üst kalıp ve yan kalıplardır. Bu ana bölümlerin oluşturulması yanında, alt plaka, üst plaka, dikmeler, yolluk, soğutmalar, iticiler gibi yardımcı elemanlar da oluşturulduktan sonra kalıp doğrulama olarak da adlandırılabilir ürün doğrulama sürecine geçilir. Bu süreçte oluşturulan kalıpta dökümün nasıl gerçekleşeceği, metalin akış, dolum, katılma ve soğuma mekanizması detaylı olarak incelenir. Döküm mekanizmasının simülasyonu farklı yaklaşımları kullanan yazılımlar kullanılabilir. Bunlar; sonlu farklar yöntemi (Örnek: MagmaSoft, Flow-3D Cast, SolidCast), sonlu hacim yöntemi (Örnek: CastCAE, Noca-Solid&Flow), sonlu elemanlar yöntemi (Örnek: CapCast, ProCast), vektör eleman yöntemi (Örnek: AutoCast) [36]. Bu çalışmada ise sonlu farklar yöntemini kullanan MagmaSoft yazılımı kullanılmaktadır. MagmaSoft yazılımının da jant imalatçıları için özel modülü olarak sunulan ‘MagmaSoft Wheel’ modülü tercih edilmektedir.

MagmaSoft yazılımıyla yapılan simülasyonu geometrilerin tanımlanması ile başlar. Bu tanımlama esnasında gruplama yaklaşımı simülasyonu kolaylaştırır. Bu gruplar; alt grup, üst grup, yan kalıplar, soğutmalar ve döküm parçaları olarak yapılabilir. Gruptaki kalıp elemanlarının özellikleri hareketli/hareketsiz olarak tanımlanarak hareketli kalıp parçalarının hareket eksen ve yönleri belirlenir (Şekil 2.11).



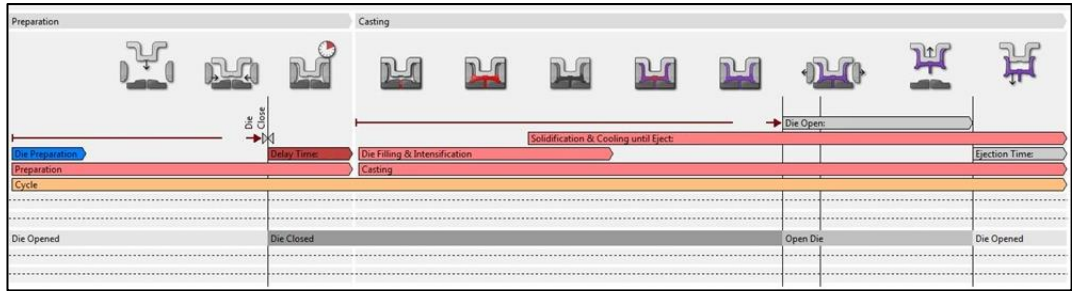
Şekil 2.11: Döküm simülasyonu için geometri tanımlama.

Geometri tanımlandıktan sonra malzeme tanımlama adımına geçilir. Belirlenen gruplar altındaki elemanların malzemeleri tanımlanır. Burada önemli noktalardan biri fiziki kalıp parçalarının malzemeleri tanımlanırken, kalıp için bulunan hava boşlukları da 'hava' olarak tanımlanır ve sanki fiziki bir malzemeymiş gibi hesaba katılır. Kalıp içindeki ısı transferinin gerçeğe yakın olarak hesaplanabilmesi için bu tanımlamalar gereklidir. Sıvı metalin kalıba dolduğu 'inlet' noktası ve 'inlet' bölgesindeki filtre de yazılıma filtre malzemesi ile tanımlanır. Geometri ve malzeme tanımlama sonrası ağ yapısı (*mesh*) kurma adımına geçilir. Ağ yapısı kurulmasında -sonlu elemanlar yöntemine benzer şekilde- ağ yapısı deneysel sonuçlara olabildiğince yaklaşabilmesi için yeteri kadar küçük olması, hesap sürelerinin ise seri imalatta kabul edilebilir hesaplama sürelerini geçmeyecek kadar büyük olması gereklidir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Döküm simülasyonu için ağ yapısı.

MagmaSoft yazılımı, ağ yapısı (*mesh*) konusunda kullanıcılarına ağ yapısı kalitesini gösteren bir ara yüz de sunmaktadır. Böylece kullanıcı tercih ettiği ağ yapısının simülasyona uygun olup olmadığını kontrol ederek, olası bir uygunsuzluk durumunda tekrar ağ yapısı kurma fırsatı vermektedir. Ağ yapısının da kurulmasından sonra tanımlama adımına geçilerek, döküm malzemesi, alt-üst-yan kalıplar, yolluklar, soğutmalar ve hava boşlukları gibi elemanların tanımlaması yazılım ‘*database*’inden yapılarak sıcaklıkları tanımlanır. Isı transfer hesabının yapılması için ısı transfer katsayıları da bu adımda tanımlanır. Bu adımda birbiri ile temas halinde bulunan kalıp elemanlarının ısı transfer katsayıları tüm temas noktaları için tanımlanır. Son olarak da proses parametreleri tanımlanır. Kalıp doldurma, basınçta tutma, katılaşma ve soğuma süreci bu kısımda belirlenerek yazılıma tanımlanır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13: Döküm simülasyonu proses adımları.

Bu kısım, deneme döküm esnasında takip edilecek döküm reçetesini belirlediğinden oldukça önemli ve yüksek tecrübe gerektiren bir kısımdır. Kalıp boşluğu sıvı metalin riser tüpten (yolluk) geçerek doldurulması sonrası malzemedeki meydana gelebilecek çekmelerin beslenmesi amacıyla basınçta tutulması gereklidir. Proses parametreleri tanımlanırken, sistemde kullanılan soğutma borularındaki havanın prosesin hangi saniyesinde açılıp kapanacağı gibi on/off adımları belirlenir. Simülasyon sonrası kontrol edilmek istenen parametreler de seçilerek simülasyon çalıştırılır. Dolum aşamasında metalin hızı ve türbülans oluşumu, katılma ve soğuma aşamasındaki dolum, parça/kalıp sıcaklıkları, porozite gibi çıktılar seçilerek simülasyon sonrası istenen parametreler incelenebilir.

2.4 Tasarım Doğrulamada Deneysel Yöntem

Tasarım doğrulamada sayısal yöntem gerek mekanik ve metalürjik testler gerek de dökümün durumu hakkında öngörü vermesi sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında, döküm sürecinin karmaşıklığı ve öngörülemeyen malzeme hataları sayısal yöntemin deneysel yöntemle desteklenmesi zorunluluğunu doğurmaktadır. Bu zorunluluk sadece döküm süreci ve döküm ürünler için değil, sayısal yöntem ile öngörü elde edilen tüm çalışmalar için gereklidir. Sayısal yöntem kullanılırken yapılan malzeme tanımları esnasında ilgili bilgisayar yazılımı malzemenin homojen metalürjik yapı ve tanımlı mekanik özellikleri parçanın her yerinde aynı özellikte gösterdiği ön kabulüne dayanır. Yazılım tarafından yapılan gerekli tüm mühendislik hesaplamaları bu ön kabule göre yapılır. Fakat döküm proses koşulları düşünüldüğünde, farklı soğutma koşulları, farklı kalıp özellikleri, farklı döküm parametreleri ve şartları malzemedeki sayısal yöntemin kabul ettiği homojen yapıyı sunmayabilir. Diğer yandan, döküm prosesinde talep edilen yönlendirilmiş katılma sebebiyle malzemenin farklı bölgelerinde farklı mekanik özelliklerin olması özellikle istenen bir yaklaşımdır. Örneğin mekanik özelliklerin kontrol edildiği iç flanş, dış flanş ve feder bölgesinin mekanik özelliklerinin belirli limitler üzerinde olması ilgili standart ve şartnamelerde belirtilen bir ürün gerekliliğidir. Bu gereklilik sağlanırken katılmanın iç flanştan göbek bölgesine doğru herhangi bir kesintiye uğramadan yönlendirilerek gerçekleştirilmesiyle dökümün uygun olarak yapılabilmesi de ayrı bir döküm gerekliliğidir. Burada not edilmesi gereken önemli nokta; döküm süreci için hızlı soğutma değil farklı bölgelerde kontrollü soğutma tercih edilmesi gereğidir.

2.4.1 Yorulma testi

Yorulma testi olarak adlandırılan bu test Dünya literatüründe ‘*Cornering fatigue test*’ olarak bilinir. Türkiye’de yapılan çalışmalarda ise ‘Ömür testi’, ‘Köşeleme dayanım testi’, ‘Dinamik köşeleme dayanım testi’, ‘Dinamik yorulma testi’, ‘Dinamik viraj testi’ gibi isimlerle bilinir. Bu çalışmada anlatımı basitleştirmek amacıyla ‘yorulma testi’ başlığında incelenmiş olup Dünya literatüründeki karşılığı ‘*Cornering fatigue test*’tir.

Jant uygulanan yorulma testi, ürüne özel bir test uygulaması olduğundan özel olarak tasarlanmış bir test ekipmanı ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada yapılan yorulma testleri ‘Cevher Jant Sanayii’ laboratuvarları bünyesinde bulunan Alpine Metal - MAKRA Marka yorulma test cihazı (Şekil 2.14) ile ISO - 3894 Standartlarına uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 2.14: Yorulma test cihazı.

Bu test mekanizması Alman ana otomotiv imalatçıları (BMW, AUDI, Daimler, Volkswagen, Porsche) tarafından kabul edilerek sertifikasyonu sağlanmaktadır. Yorulma test cihazı, jantın bağlandığı şaftta sürekli dönen bir kütle sayesinde santrifüj etki sayesinde X ve Y eksenlerinde devamlı yük yükler (Şekil 2.15) [37].



Şekil 2.15: Santrifüj etkisini oluşturan ağırlık [37].

Bu durum jantın yorulma şartlarını janta yüklemiştir. Devam eden çevrim bilgisayar yardımıyla takip edilerek ilgili yükte hasarın olduğu çevrim adeti elde edilir. Böylece Wöhler (S-N) eğrisi oluşturularak jantın ömür grafiği çıkarılmış olur. Alüminyum alaşımlarının yorulma davranışı incelendiğinde, alüminyumun çelik gibi diğer malzemelerde oluşan ‘*endurance limit*’ oluşturmadığı bilinmektedir. ‘*Endurance limit*’ oluşmaması testin düşük yüklemelerde sonsuza gideceğini gösterir. Bu durum seri imalattaki zaman kısıtları düşünüldüğünde hem imkansız hem de gereksizdir. Bu sebeple, 10^6 çevrim süresinde ‘*endurance limit*’ (Yorulma sınırı) olduğu kabul edilebilir. Bu seviye, yorulma sınırı olarak da bilinir ve jant üzerine yapılan yorulma çalışmalarında 10^6 seviyesi kabul edilmektedir [38, 39].

‘Cevher Jant Sanayii’ yorulma test şartnamesine göre eğilme momenti:

$$M = W.Sm.(q . r+e) \quad (2.1)$$

Formülü (2.1) ile hesaplanır. Denklemdaki M (Nm) eğilme momenti değerini, W (N) jant veya araç üreticilerinin belirlediği maksimum statik jant yükü değerini, Sm test faktörünü, q lastik ile yol arasındaki sürtünme katsayısını, r (m) statik yük uygulanmış lastik yarıçapı değeri ve e (m) jantın offset (ET değeri) değerini göstermektedir [37].

Test sonucunda jant projesinde tanımlı moment değerlerine göre oluşturulan Wöhler (S-N) eğrisindeki eğimin ana imalatçının belirlediği değerden yüksek olması beklenir. Bu talebin nedeni elde edilen Wöhler eğrisinin hasar oluşturabilecek değerlerin üzerinde kalması ve grafiği kesmemesi gereğidir. Aksi halde, jantın istenen limitleri sağlayamadan hasarlanabileceği riski ortaya çıkar.

2.4.2 13° darbe testi

13° darbe testi, janta gelebilecek yan kuvvetlere karşı göstereceği tepkiyi ve jant üzerinde oluşabilecek hasarların görülmesi için gerçekleştirilir. Test, lastik montajı yapılan jant üzerinde gerçekleştirilir. Bu çalışmada yapılan 13° darbe testleri ‘Cevher Jant Sanayii’ laboratuvarları bünyesinde bulunan MAKRA Marka 13° darbe test cihazı (Şekil 2.16) ile ISO - 7141 Standartlarına uygun olarak yapılmıştır.



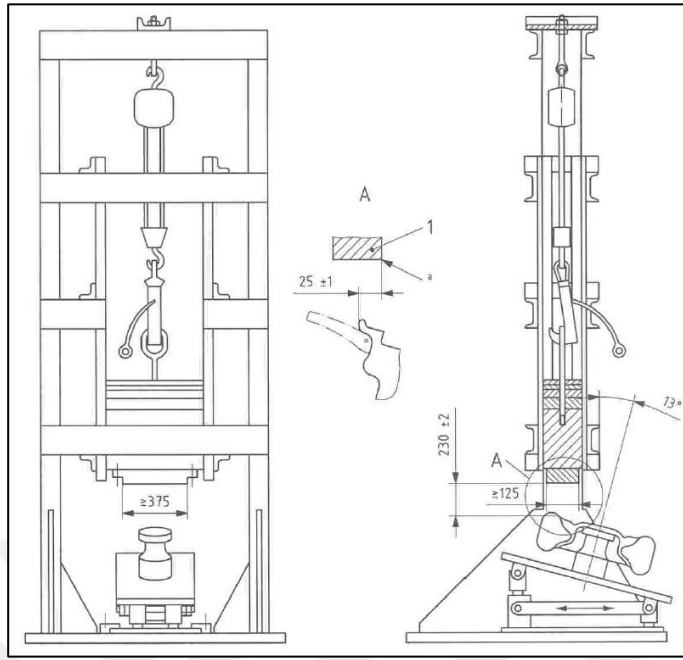
Şekil 2.16: 13° Darbe test cihazı.

Test cihazında serbest bırakılan ağırlık jant projesine göre değişiklik gösterebilir ve test öncesi ayarlanabilir. Jant, bijonlarından belirli tork değerlerinde aparata bağlanır. Test ağırlığı farklı jantların 2 tanımlı bölgesine (sibop bölgesi ve feder bölgesi) serbest bırakılarak oluşturduğu hasara göre test sonuçlarının ‘uygun’ ya da ‘uygun olmadığı’ değerlendirilir.

ISO 7141 Standardına göre hasar kriteri 3 adımda izlenir. Bu kriterler:

- Göbek (Stil) kesiti boyunca penetre olmuş gözle görülür kırılma ve çatlaklar,
- Göbek (Stil) kısmının lastik yüzeyi (*rim*) bölgesinden ayrılması,
- Lastiğin 1 dakika içinde hava basıncını kaybetmesi [35].

ISO 7141 Standardına göre test ekipmanı şekil 2.17’de verilmiştir.

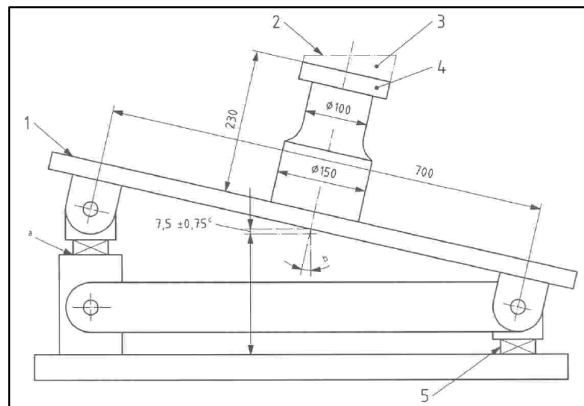


Şekil 2.17: 13° Darbe test düzeneği [35].

Standarta göre en az 125 mm genişliğinde ve en az 375 mm uzunluğunda koç başı ağırlığı Şekil 2.17’ye göre konumlandırılır ve kütlesi (2.2) bağıntısı ile hesaplanır.

$$m = 0,6 W + 180 \quad (2.2)$$

(2.2) bağıntısında m (kg) kütleyi, W (kg) ise maksimum statik jant yükünü gösterir [35]. Cihaz kalibrasyonu ISO 7141 standardında detaylandırılan şekilde gerçekleştirilir. Kalibrasyona benzer şekilde test yürütülmesi prosesi de ilgili standartta tanımlanmış, ‘Cevher Jant Sanayii’ bünyesinde gerçekleştirilen tüm testlerde bu prosedürler, kalibrasyonlar ve konumlandırmalar takip edilir.



Şekil 2.18: 13° Darbe test aparatı detayı [35].

2.5 Ürün Doğrulamada Deneysel Yöntem

Ürün doğrulama sürecinin deneysel olarak yapılması ‘deneme döküm’ olarak adlandırılabilir. Tasarım doğrulamadaki deneysel yöntem gerekliliğine benzer şekilde, döküm simülasyonu dökümün tamamen uygun gerçekleştirildiği, soğutmaların sorunsuz olarak çalıştığı, malzemenin ise hatasız olduğu kabulü ile yapılan sayısal yöntemin deneysel olarak yapılması zorunludur. Deneme döküm esnasında ortaya çıkabilecek döküm süreç hataları, soğutmaların olası tıkanma ya da devreye girme problemleri ve malzemede oluşabilecek hatalar deneme döküm esnasında görülebilir.



Şekil 2.19: Deneme döküm tezgahı.

Bu çalışmadaki tüm deneme dökümler ‘Cevher Jant Sanayii’ bünyesinde bulunan Gima marka AB-12 kodlu Mühendislik ve Ar-Ge döküm tezgahında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.19).



3. BULGULAR

Çalışmanın bu kısmında; malzeme bulguları, sayısal yöntem bulguları ve deneysel yöntem bulguları detaylı olarak verilmiştir. Bir önceki başlıkta detaylandırılan ve ilgili standart ve şartnamelere uygun yöntemlerin AlSi9Mg alaşımını olarak tanımlanan/hazırlanan jantlara uygulanması ile elde edilen sonuçlar ‘bulgular’ başlığında detaylandırılarak alternatif malzeme ile hesaplanan/ölçülen sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, mevcut durumla karşılaştırılarak alternatif malzemenin uygunluğu ve sonuçları irdelenmiştir.

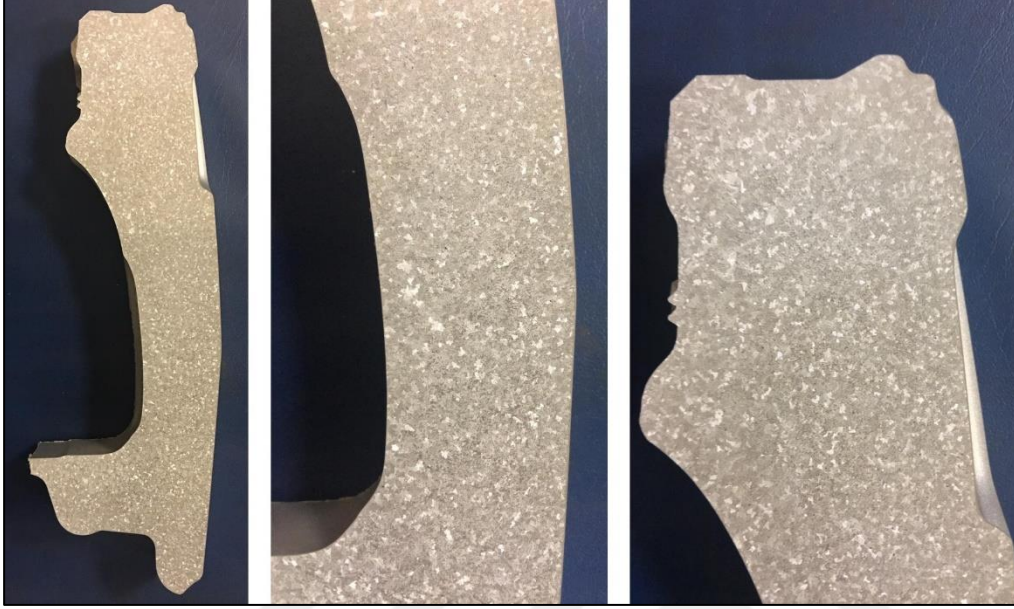
3.1 Malzeme Bulguları

Deneysel çalışma esnasında, belirli oranlarda AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarının karıştırılması ve gerekli eklentilerin yapılmasıyla alternatif alaşım malzeme elde edilmiştir. Elde edilen alternatif alaşım malzeme ana ergitme ocaklarının yanında bulunan daha düşük ergitme kapasitesine sahip deneme ergitme ocağında hazırlanmıştır. Alternatif alaşımın elde edilmesi esnasında eşzamanlı kimyasal analizler yapılarak -gerekli durumlarda- farklı eklenti eklemeleri yapılmıştır. Kimyasal analiz sonrası istenen değerlerin elde edilmesiyle tane inceltme amaçlı TiBor ($AlTi_5B_1$) eklentileri ve modifikasyon amaçlı Stronsiyum ($AlSr_{15}$) eklentileri yapılmıştır. Tüm bu eklentiler yapılırken ana imalatçının standart ve şartnamelerinde tanımlı limitlerin dışında kalınmaması sürekli olarak kontrol edilmiştir. Alternatif malzemenin kimyasal analiz sonucu çizelge 3.1’de verilmiştir. Değerler, literatürde bildirilen ve/veya ana imalatçı tarafından tanımlanan standart ve şartnamelerde tanımlı limitler arasında olduğundan malzeme ‘uygun’ olarak değerlendirilmiştir.

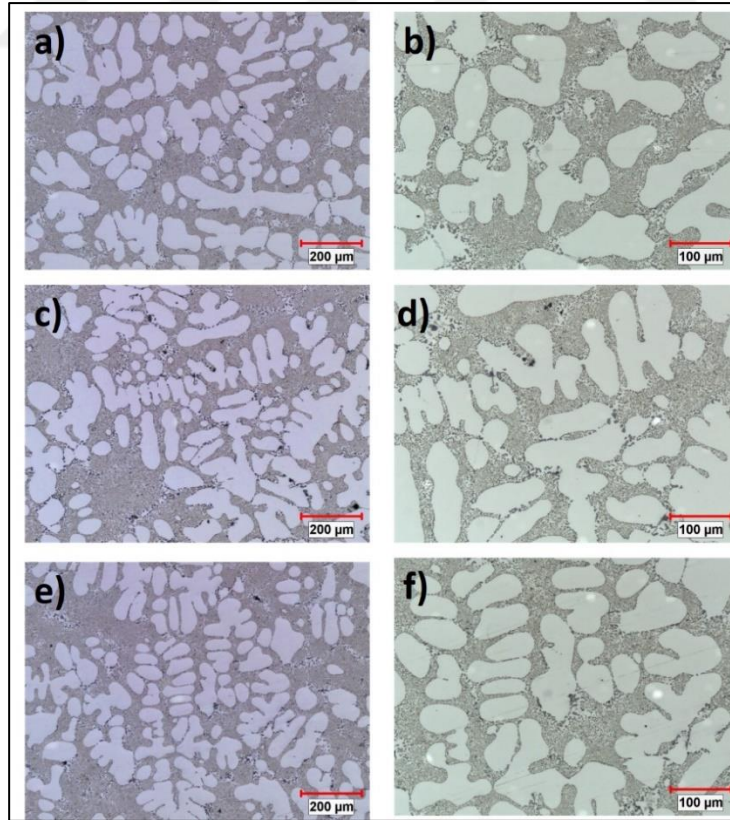
Çizelge 3.1 : Alternatif malzeme (AlSi9Mg) kimyasal analiz sonuçları.

Kimyasal Kompozisyon	Al [%]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Zn [%]	Ti [%]
Alternatif Alaşım	90,4536	9,064	0,1013	0,0007	0,0026	0,210	0,035	0,1184

Malzeme içeriğinin uygun olmasından sonra, kontrol edilecek kısım makro ve mikro yapının uygunluğu kontrolüdür. Makro (Şekil 3.1) ve mikro (Şekil 3.2) yapılar ise *American Foundrymen's Society*'nin (AFS) tanımladığı yapılar ile karşılaştırılarak sınıflandırılır.



Şekil 3.1 : Alternatif alaşımlı (AlSi9Mg) jantın makroyapısı.



Şekil 3.2 : Alternatif alaşımlı (AlSi9Mg) jantın mikroyapısı (a: iç flanş – X50, b: iç flanş – X100, c: dış flanş – X50, d: dış flanş – X100, e: feder X50, f: feder - X100).

Şekil 3.1’de yer alan makro yapılar *American Foundrymen’s Society*’nin (AFS) belirlediği limitlerin üzerinde olduğu karşılaştırma yöntemi ile görülmüştür. Tanımlı seviyelere göre makro yapının ‘4’ seviyesinin üzerinde olması gereklidir ve elde edilen makro yapılar bu seviyenin üzerindedir.

Şekil 3.2’de yer alan mikro yapılar detaylı incelendiğinde yapının uygun şekilde modifiye edildiği ve silis yapıların iğnemsî yapıdan küresel yapıya - zaman zaman Çin harfi (*Chinese Script*) yapısına - geçtiği görülmektedir. Ayrıca, Sr modifikasyonu Fe intermetaliklerinin olumsuz etkisini de azaltmakta, bu durum mekanik özellikleri olumlu yönde arttırmaktadır. Al – Si ötektik yapının ve α - Al dendrit yapının jant kesitinde önemli bölgeler olarak tanımlanan iç flanş, dış flanş ve feder bölgesinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Yapıdaki gaz boşlukları mikro yapıda siyah noktacıklar olarak görülmektedir fakat bu boyutlar yapıda olumsuzluk oluşturacak bir poroziteye neden olabilecek kadar büyük değildir.

Sonuç olarak, makro ve mikroyapılar AFS sınıfına göre ‘uygun’ olarak değerlendirilmiştir.

Alüminyum alaşımlı jant üzerinde tanımlı bölgelerde yapılan Brinell sertlik değerleri ölçümlerinden elde edilen sonuçlar çizelge 3.2’de verilmiştir. Sertlik alınan bölgelerin tanımı bir önceki bölümde yer alan şekil 2.4’te yapılmıştı. Bu bölge numaralarından önemli kısımlar: 1 numaralı iç flanş, 3 numaralı dış flanş ve 5 numaralı feder bölgesidir.

Çizelge 3.2 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantın sertlik sonuçları.

Bölge	Ölçüm #1 [HB]	Ölçüm #2 [HB]
1	64,9	63,2
2	59,3	61,1
3	64,9	63
4	62,6	63,3
5	61,3	63
6	73,7	70,6
7	68,1	69,7

İlgili şartnamelere göre, ısıtılmış işlemsiz jantlarda sertlik değerlerinin minimum 50 HB değerini geçmiş olmaları gerekir. Çizelge 3.2’deki sonuçlara göre alternatif malzemeli jantın sertlik değerleri ‘uygun’ olarak değerlendirilmiştir.

Malzeme bulguları başlığında son olarak deneme dökümden elde edilen jantların mekanik özellikleri sonuçları incelenmiştir. Literatürden alınan limit değerler Çizelge 2.2’de verilmiş, fakat buradaki değerlerin, bu çalışmadaki mevcut ürün, döküm ve proses şartlarında elde edilen sonuçlarla farklılık gösterebileceği not edilmiştir. Bu adımda, literatür bilgileri konu hakkında fikir verme amaçlı faydalı olurken, burada esas alınması gereken limitler ilgili standart ve şartnamelerde belirtilmiştir. Bu adımda, döküldüğü gibi (*as cast*) ve son ürün (boyalı) olarak iki jant incelenmiş ve elde edilen mekanik özellikler çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantların mekanik özellik sonuçları.

	Bölge	Akma Dayanımı [MPa]	Çekme Dayanımı [MPa]	Birim Uzama [%]
Döküldüğü gibi (As Cast)	Feder	92,76	183,10	5,56
	Dış Flanş	91,70	201,45	14,43
	İç Flanş	92,55	205,56	15,54
İşleme Sonrası (Boyalı)	Feder	105,96	184,31	4,12
	Dış Flanş	101,06	196,13	12,25
	İç Flanş	104,22	201,64	12,60

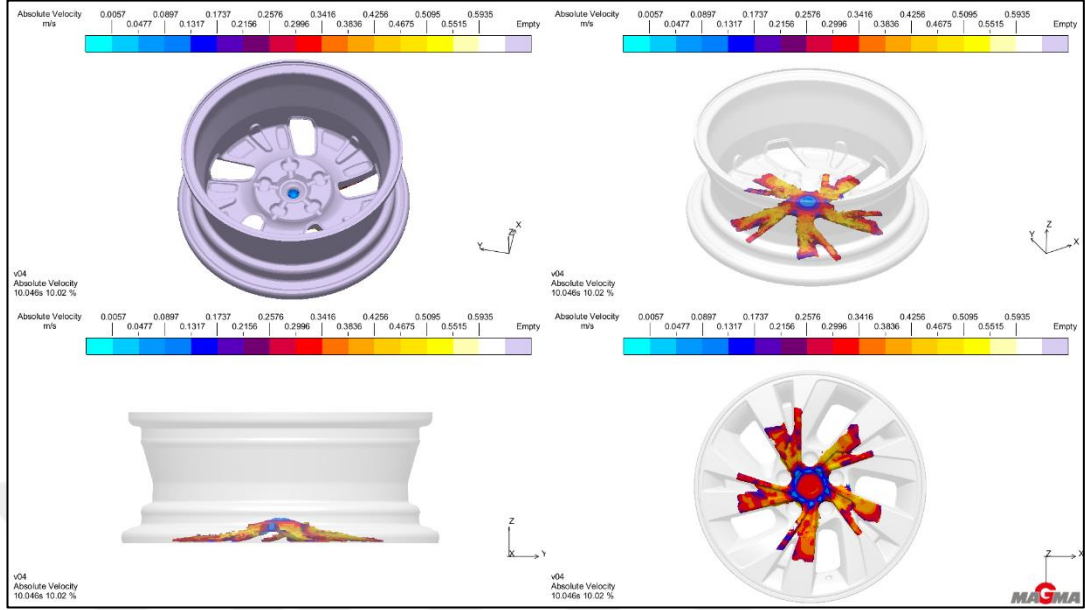
Çizelge 3.3’teki değerlerin eldesi için jantın her bir ilgili bölgesinde en az 3 test gerçekleştirilmiştir. Jant üzerinden elde edilen değerler ilgili standart ve şartnamelerde belirtilen limitlerin üzerinde olduğu görülmüş ve ‘uygun’ olarak değerlendirilmiştir. Ürünler referans alınmış standart ve şartnamelere uygun olması yanında literatürdeki değerlerle (Bkz. Çizelge 2.2) de karşılaştırıldığında ‘uygun’ olarak değerlendirilebilir.

3.2 Sayısal Yöntem Bulguları

Döküm simülasyonu, sonlu farklar metoduyla hesaplama yapılan MagmaSoft 5.3 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Geometri tanımlama, malzeme tanımlama (alternatif jant malzemesi tanımlama), ağ yapısı (*mesh*) kurma, proses şartları tanımlama gibi, bu çalışmada ‘2.3 Ürün Doğrulamada Sayısal Yöntem’ başlığında detaylandırılan, işlemler tamamlandıktan sonra akış, katılma ve porozite sonuçları incelenerek jantın döküme uygunluğu kararı verilir.

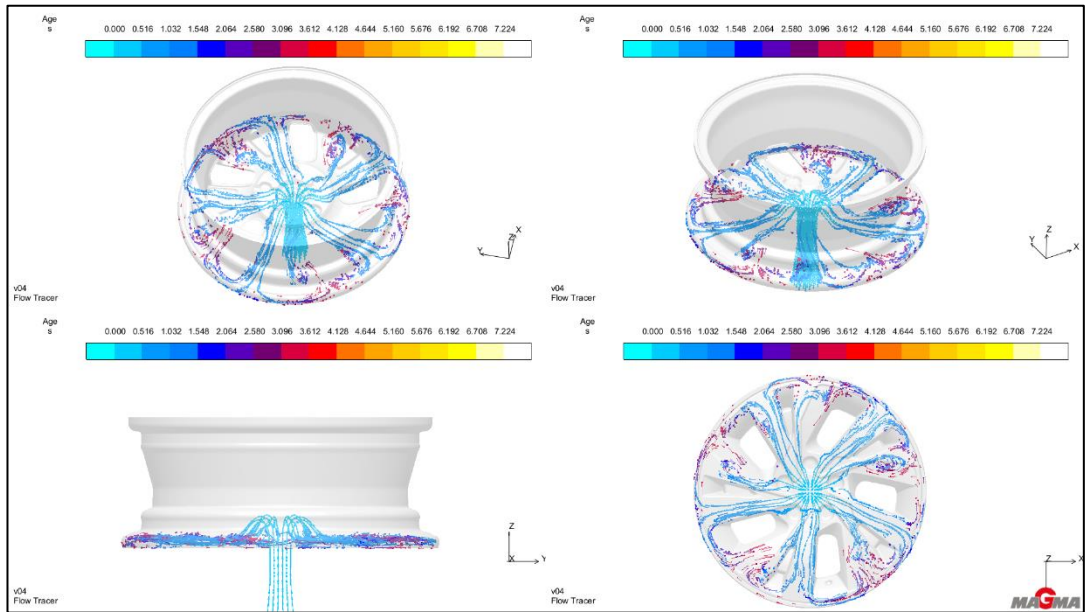
Öncelikle olarak malzemenin akışı incelenerek metalin akış yönü gözlemlenir. Metal göbek bölgesinden dolduğundan öncelikle göbekten dış flanş bölgesine doğru, dış

flanş bölgesinden de iç flanşa göre dolum devam eder. Bu akışın hızı, yazılımda ‘absolute velocity’ sonuçlarının incelenmesi ile gözlemlenebilir.



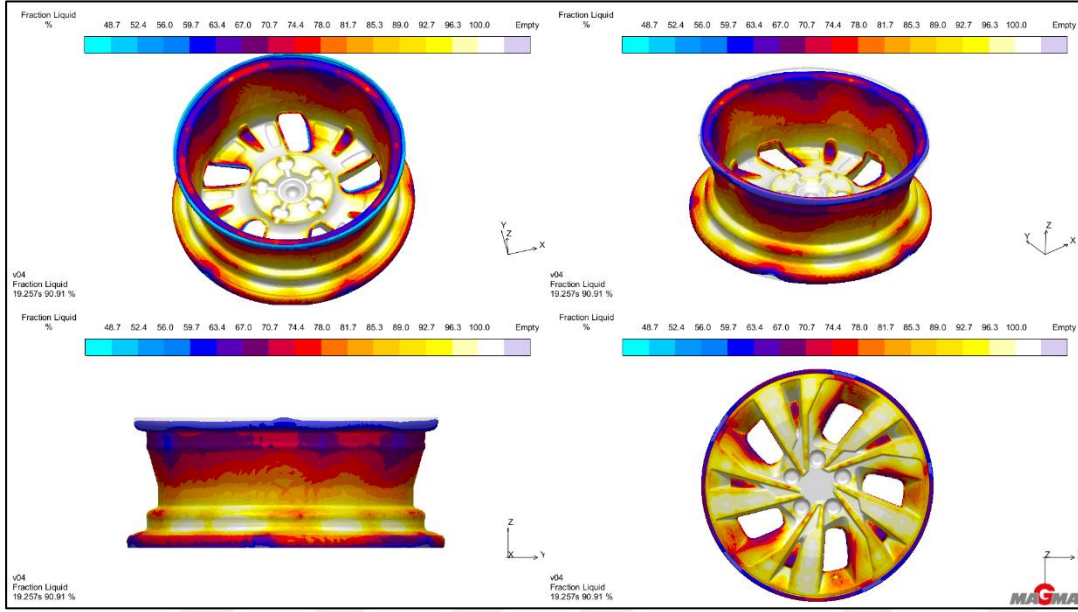
Şekil 3.3 : Alternatif alaşımlı (AlSi9Mg) jantta metal akışı.

Metal dış flanşa ulaştığı anda hem stil kolu doğrultusunda gelen sıvı metal ile, jantın dış flanş bölgesinde çevresel olarak hareketi sebebiyle oluşabilecek türbülans risklerini görebilmek için ‘tracer’ sonuçları incelenir. Türbülans oluşma riski olan bölgelerde metal hızı belirli seviyenin altında tutulmaya çalışılarak olası türbülanslı akış etkileri minimize edilir.

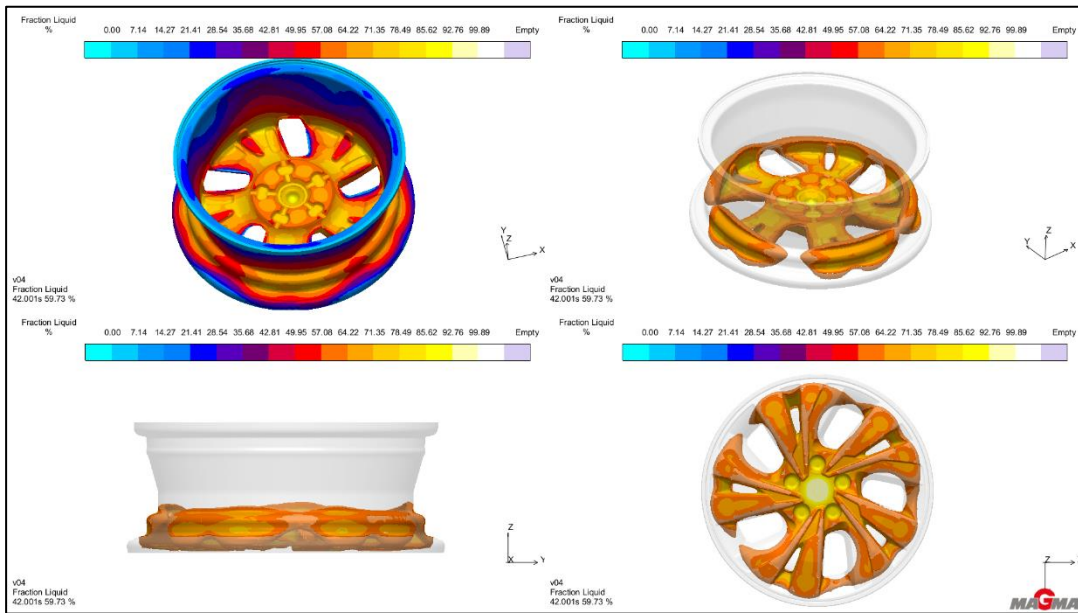


Şekil 3.4 : Alternatif alaşımlı (AlSi9Mg) jantta metal dolum akış yönü.

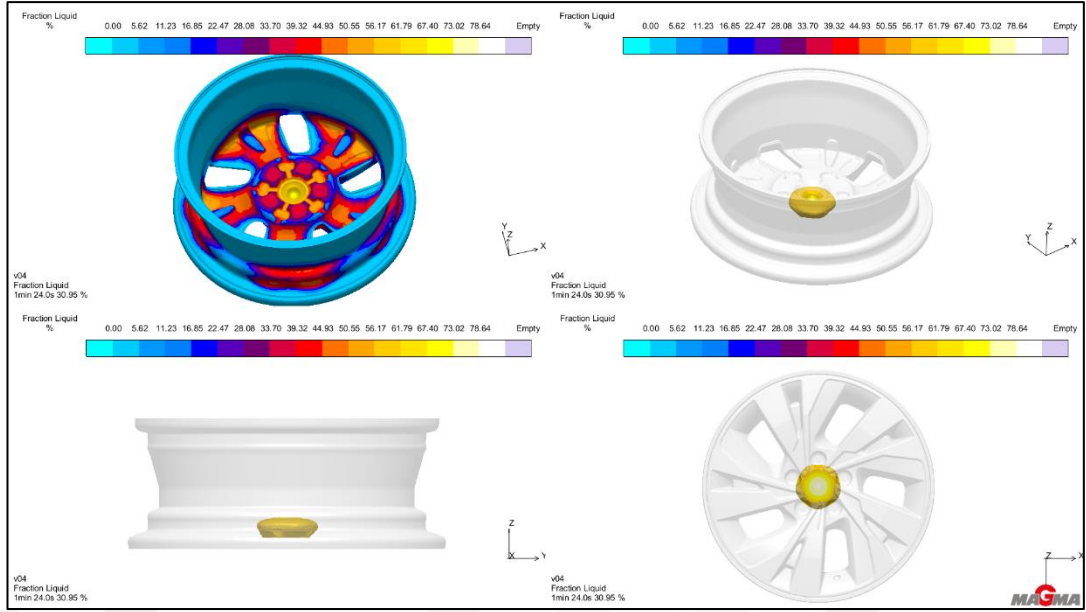
Akış yönü sonrası kontrol edilmesi gereken bir diğer önemli nokta da katılaşma kontrolüdür. Daha önce de belirtildiği gibi, alüminyum alaşımli jant dökümünde önemli olan nokta hızlı katılaştırma değil, kontrollü katılaşmadır. Kontrollü katılaşma esnasında da kalıp içindeki sıvı metal katılırken kolların kopmaması önemli bir gerekliliktir. Böylece iç flanş, dış flanş ve feder kollarında porozite oluşumu riski azaltılır.



Şekil 3.5 : Sıvı metal oranı yaklaşık %90 oranındaki katılaşma durumu.

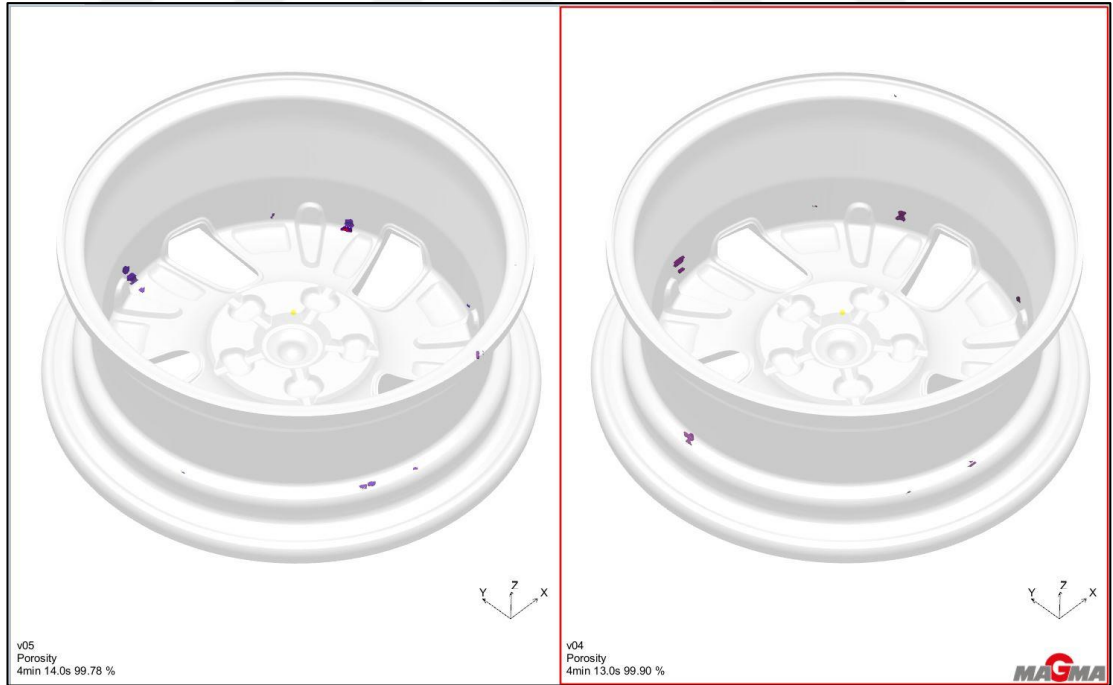


Şekil 3.6 : Sıvı metal oranı yaklaşık %60 oranındaki katılaşma durumu.



Şekil 3.7 : Sıvı metal oranı yaklaşık %30 oranındaki katılaşma durumu.

Şekil 3.8’de verildiği gibi porozite değerlerinin düşürülmesinde proses şartlarının uygun belirlenmesi önemli rol oynamaktadır. Resmin sol tarafında porozite miktarının nispeten yüksek olması proses şartlarında ve soğutma karakteristiğinde yapılan değişikliklerle resmin sağ tarafında görüldüğü gibi daha düşük oranlara indirilebilir.



Şekil 3.8 : Proses şartları değiştirerek porozitenin azaltılması (sağda).

Yorulma test simülasyonu, sonlu elemanlar metoduyla hesaplama yapılan Ansys Workbench 19.2 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon adımları takip edilirken analiz edilecek malzemeye göre yoğunluk ve Young Modülü değerleri tanımlanmıştır. Alternatif malzemenin dataları [41] tanımlandıktan sonra, jant geometrisi 3 boyutlu çizim programından (Örn. Catia) analiz programına çağırılmıştır. Daha sonra modele, bu çalışmadaki '2.2.1 Yorulma test simülasyonu' başlığında detaylandırıldığı şekilde; malzeme tanımlama ve bağlantı tanımlama işlemleri gerçekleştirilerek ağ yapısı oluşturulmuştur. Son olarak da sınır şartları belirlenerek görmek istenen sonuçlara göre hesaplama yapılmıştır.

Simülasyon çalışmasındaki en önemli noktalar; doğru malzeme bilgilerinin tanımlanması, bağlantı tanımlamalarının uygun yapılması, ağ yapısının uygun atılması ve sınır şartlarının doğru belirlenmesidir. Sınır şartları belirlenirken, şafta yüklenecek olan kuvvetin değerinin ve yönünün uygun belirlenmesi olası hasar risklerini sorunsuz olarak görülebilmesini sağlar. Şafta yüklenecek momentin hesabında - şaft uzunluğu bilindiğinden dolayı olarak şafta yüklenecek kuvvetin hesabında - ; ET (Offset bölgesi tabanıyla jantın hayali eksen çizgisi arası mesafesi), jant yükü, lastik boyutları ile hesaplanan dinamik yarıçap kullanılır. Bu çalışmada, ilgili jant ve lastik boyutlarına göre uygulanması gereken moment 3148 Nm olarak hesaplanmıştır. Şaft uzunluğunun da 1 m. olduğu düşünüldüğünde, şafta uygulanması gereken kuvvetin 3148 N olması gerektiği görülmektedir. Şafta uygulan kuvvetin yönü belirlenirken ise belirli açının taranması uygun bir yöntem olarak kabul edilebilir. İlgili jantın stil yüzeyi detaylı incelendiğinde 5 kollu bir jant olduğu görülmektedir. Dairesel parçanın 1/5'inin incelenmesi esasında jantın tamamının incelenmesi anlamına gelmektedir. Bu durum da jantın 72°lik diliminin taranmasının, tüm jantın taranması ile aynı olduğu sonucunu doğurmaktadır. 1/5'lik jant diliminin de hem hesap süresini çok yükseltmeyecek hem de olası hasarların gözden kaçmayacak bir aralıkta seçilmesi önemlidir. Önceki tecrübelerle göre bu aralık 18 eşit adımda 4°lik açılarla taranması ile kuvvetin en fazla gerilme oluşturacağı yön belirlenmiş olur. Bileşke kuvvetin 4°lik açılarla 18 adımda taranması ile bileşke kuvvetin X – Y – Z yönlerindeki bileşenleri temel geometri bilgileri ile basit bir tabloda hesaplanabilir. Bu hesaplama, çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Bu hesaplamanın yapılmaması durumunda, sadece belirli bir yön için elde edilen en yüksek gerilme değeri görülebilir. Bu durum, jantın diğer yük açılarında daha fazla gerilme gösterebileceği riskini göz ardı edeceğinden uygun değildir.

Çizelge 3.4 : Kuvvet adımları ve bileşke kuvvet bileşenleri.

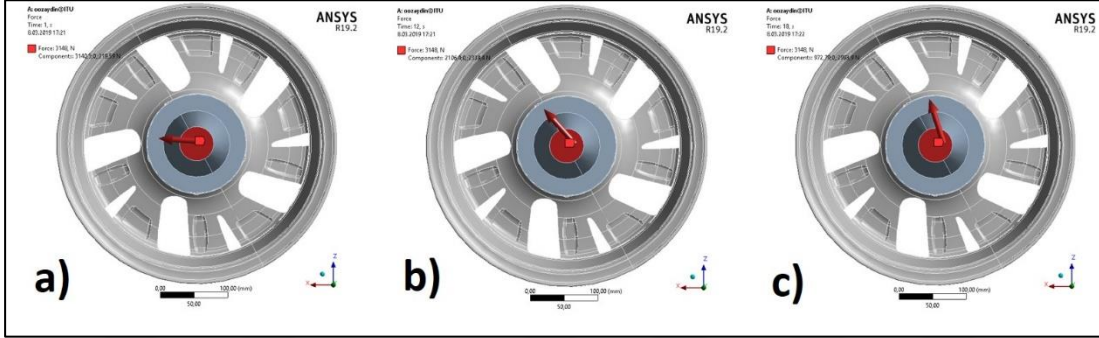
Adım	Açı [°]	Bileşke Kuvvet [N]	X - Bileşeni [N]	Y - Bileşeni [N]	Z - Bileşeni [N]
0	0	3148	3148,00	0	0,00
1	4	3148	3140,33	0	219,59
2	8	3148	3117,36	0	438,12
3	12	3148	3079,21	0	654,51
4	16	3148	3026,05	0	867,71
5	20	3148	2958,15	0	1076,68
6	24	3148	2875,84	0	1280,41
7	28	3148	2779,52	0	1477,90
8	32	3148	2669,66	0	1668,19
9	36	3148	2546,79	0	1850,35
10	40	3148	2411,51	0	2023,50
11	44	3148	2264,48	0	2186,78
12	48	3148	2106,42	0	2339,42
13	52	3148	1938,10	0	2480,66
14	56	3148	1760,34	0	2609,81
15	60	3148	1574,00	0	2726,25
16	64	3148	1379,99	0	2829,40
17	68	3148	1179,26	0	2918,77
18	72	3148	972,79	0	2993,93

Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [MPa]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [MPa]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [MPa]
1	1,	6,7951e-002	86,011	14,238
2	2,	0,10212	86,449	14,242
3	3,	0,13755	86,467	14,243
4	4,	9,8061e-002	86,065	14,243
5	5,	0,26688	85,246	14,242
6	6,	0,1583	84,013	14,239
7	7,	0,1933	83,526	14,234
8	8,	0,18345	85,231	14,23
9	9,	9,9736e-002	86,521	14,23
10	10,	7,3343e-002	87,391	14,236
11	11,	0,23927	87,836	14,244
12	12,	0,12411	87,854	14,25
13	13,	4,5957e-002	87,445	14,255
14	14,	0,22276	86,611	14,257
15	15,	0,1717	85,356	14,257
16	16,	0,21043	83,685	14,255
17	17,	0,17255	84,138	14,253
18	18,	8,4246e-002	85,421	14,254

Şekil 3.9 : Kuvvet adımlarının jant üzerinde oluşturduğu eşdeğer gerilme değerleri.

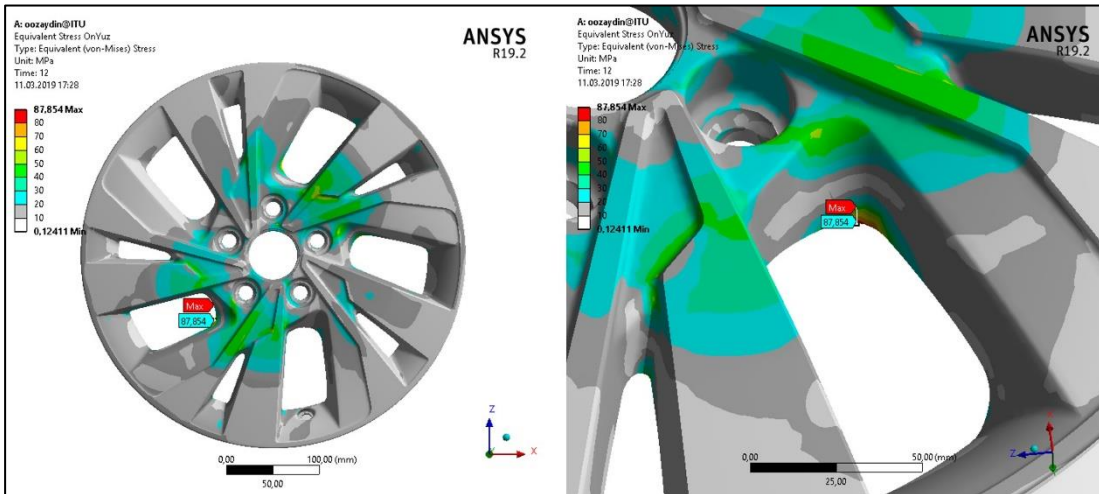
Ansyes Workbench 19.2 yazılımında hesaplanan kuvvet adımlarının eşdeğer gerilme değerleri (Şekil 3.9) incelendiğinde Von Mises eşdeğer gerilmenin en yüksek olduğu

noktanın 12. Adımda oluştuğu görülmektedir. Bu adımda, jantın üzerinde en yüksek 87,854 MPa'lık eşdeğer gerilme (Von Mises) oluştuğu görüldüğünden şafta uygulanacak kuvvetin 12. Adımdaki açıda uygulandığında en kritik durumda olduğu sonucuna varılır ve bu adımdaki (Şekil 3.10.b.) sonuçlar kritik sonuçlar olarak değerlendirilmelidir.

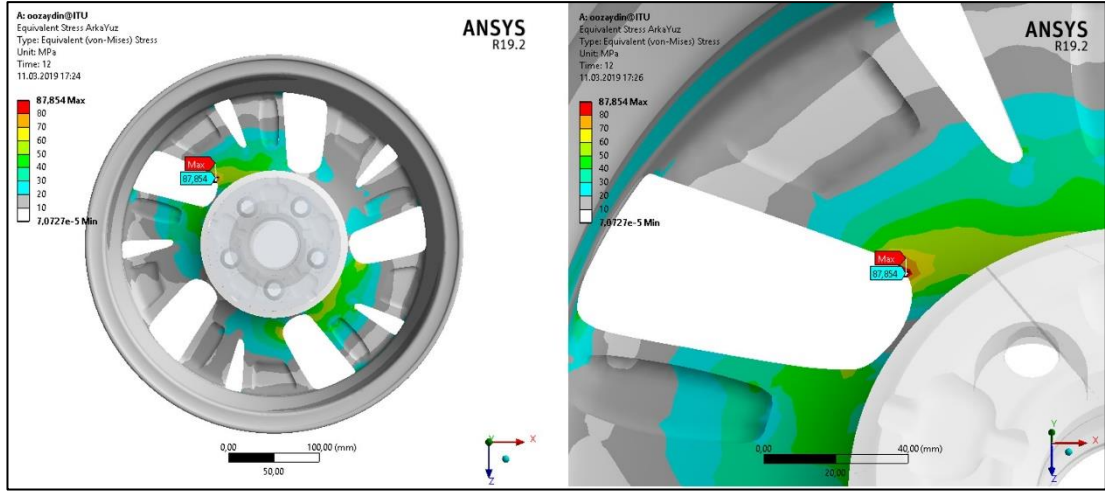


Şekil 3.10 : Şafta tanımlanan kuvvet yönleri (a: 1. Adım 4°, b: 12. Adım 48°, c: 18. Adım 72°).

Jant üzerinde oluşan en yüksek eşdeğer gerilmenin hangi bölgede oluştuğu, deneysel yöntem kullanılarak yapılan yorulma testinde hasarın nereden başlayacağı konusunda fikir vermektedir. Bu sebeple, en yüksek eşdeğer gerilmenin jantın hangi bölgesinde oluştuğu detaylı olarak incelenmelidir. Bu durum ön yüz ve arka yüz için ayrı ayrı yapılabileceği gibi, tüm jant için de yapılabilir. Bu çalışmada, en yüksek eşdeğer gerilme değeri ön yüz ve arka yüz arasında olduğundan detaylı gösterim amacıyla her iki taraf da incelenmiştir (Şekil 3.11 ve 3.12).



Şekil 3.11 : Jant ön yüz max. eşdeğer gerilme (Von Mises).

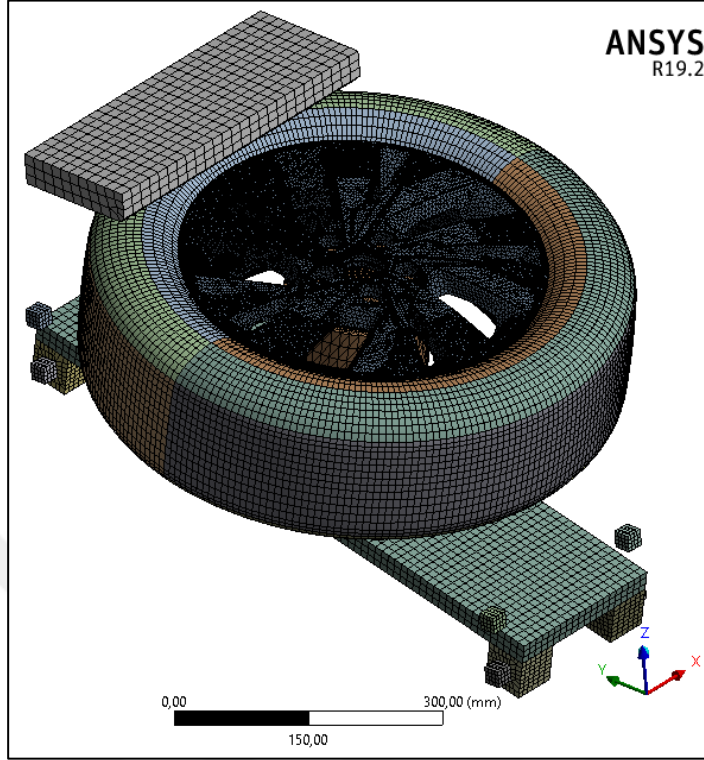


Şekil 3.12 : Jant arka yüz max. eşdeğer gerilme (Von Mises).

Tüm bu hesaplamalar ve değerlendirmeler sonrası oluşan en yüksek Von Mises eşdeğer gerilme değeri, ilgili standart ve kabul şartnamelerine göre değerlendirildiğinde ürün yorulma test simülasyonuna göre ‘uygun’ olarak değerlendirilebilir.

13° Darbe test simülasyonu, sonlu elemanlar metoduyla hesaplama yapılan Ansys LS-DYNA yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Ansys LS-DYNA yazılımında tamamlanacak olan darbe test simülasyonu öncesi 2 adımlı darbe simülasyonuna hazırlık çalışması gerçekleştirilir. İlk hazırlık adımı, 3 boyutlu çizim programına jant ürünün çağırılması ile başlar. Deneysel olarak yapılan 13° Darbe testinde sibop deliğinin sibopla kapatılmasını simüle edebilmek için janttaki sibop deliği kapatılır. Yine deneysel testte jantın deney düzeneğine bijonlarla montaj edilmesini simüle edilebilmesi için de bijonlar çizilerek geometriye eklenir. Son olarak, darbe test düzeneğindeki 13°'lik eğimin de tanımlanması için jant Y ekseninde döndürülerek geometri hazırlanmış olur. İkinci hazırlık adımı ise, Ansys Workbench yazılımı içindeki ‘Design Modeler’ modülü kullanılarak deneysel düzenekte birbirine temas eden ‘contact’ noktalarının tanımlanması, sonlu elemanlar yönteminde yapılacak hesabın uygun şekilde yapılabilmesi için ağ yapısı ‘mesh’ kurulması (Şekil 3.13), darbe ‘impact’ hesabının gerçekleşmesi için koçbaşına hız tanımlaması gerçekleştirilir. Deneysel düzenekte koç başı serbest düşme hareketi yapmasına karşın darbe test simülasyonunda koç başının serbest düşüşünü beklemek çok uzun hesaplama sürelerine neden olacağından koç başına başlangıç bir hız tanımlanması gerçekleştirilir. Tüm bu hazırlık adımları tamamlandıktan sonra, oluşturulan çözüm dosyası Ansys LS-DYNA yazılımına çağırılarak; darbe yükü hesabı ve tanımı, koç başının hareketi, takozlar, lastiğin

şişirilmesi ve simülasyon parametrelerinin tanımlanması yapılarak 13° Darbe test simülasyonu çalıştırılır.

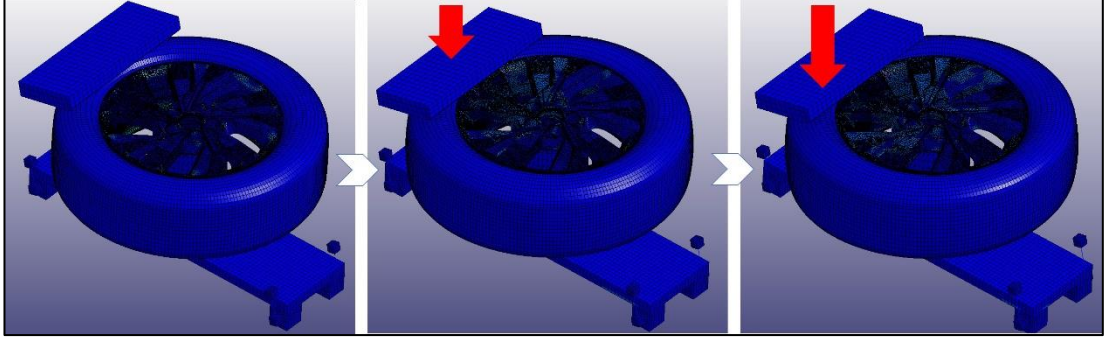


Şekil 3.13 : 13° Darbe test simülasyonu için ağ yapısı (*mesh*) kurulmuş sistem.

Simülasyonun hesaplanması explicit olarak gerçekleştirildiğinden ve detaylı sonuçları daha rahat görme amacıyla ince ağ yapısı (*mesh*) kurulduğundan dolayı uzun sürebilmektedir. Örneğin bu çalışmada, darbe sonuçlarının anlaşılır şekilde değerlendirilebilmesi 90 saat civarında hesaplama gerçekleştirilmiştir. Şüphesiz ki bu hesaplama süresi eldeki bilgisayar özelliklerine göre değişiklik gösterebilir. Bu çalışmadaki 13° Darbe test simülasyonu ‘Cevher Jant Sanayii’ Ar-Ge ve Mühendislik departmanında bulunan yüksek hızlı çözüm bilgisayarı ile gerçekleştirilmiştir.

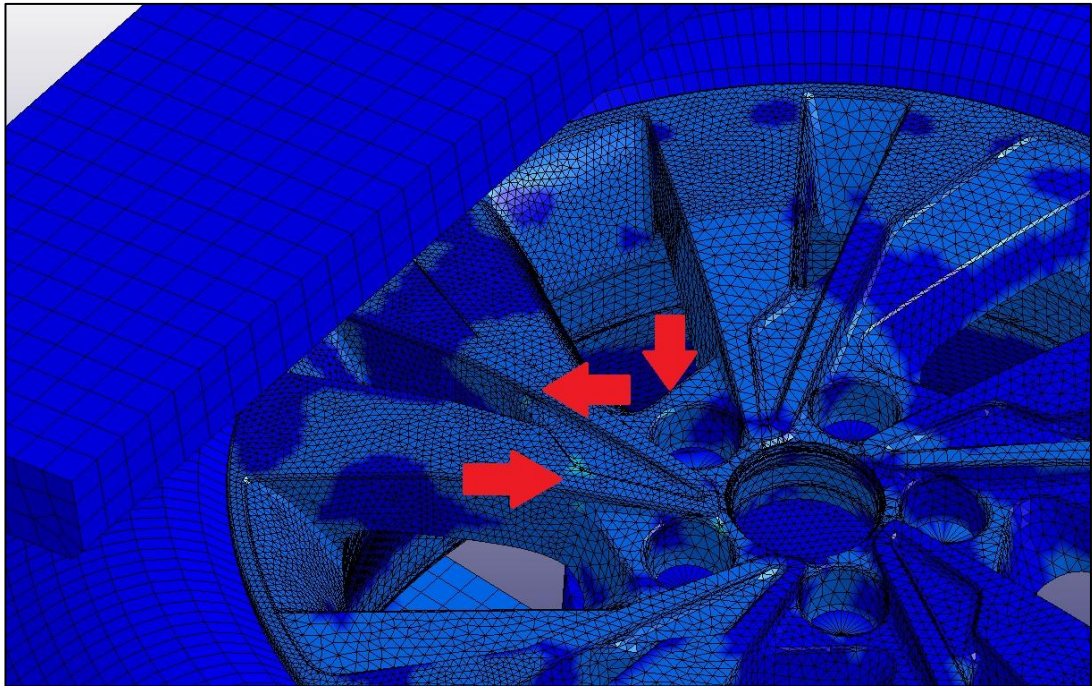
Ansys LS-DYNA yazılımı ile darbe analizi yapılan jantın sonuçları, LS-PrePost isimli sonuç değerlendirme yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç değerlendirilirken, ilgili yazılım içerisinde von Mises gerilme değerleri, malzemenin akma değerleri ile karşılaştırılarak jantın 13° Darbe testi sonuçlarının uygunluğu durumu öngörülebilir. Tüm sayısal yöntem çözümlerinde olduğu gibi 13° Darbe test simülasyonunda da malzemenin hatasız ve kusursuz olduğu varsayımı yapılır fakat gerçekte bu durum mümkün değildir. Bu sebeple bu sayısal yöntemin deneysel yöntemle doğrulanması gereklidir.

LS-PrePost yazılımına LS-DYNA'da hesabı tamamlanan dosya çağrılarak değerlendirme süreci başlar. Darbenin oluşturacağı maksimum von Mises gerilmesinin belirlenmesi için öncelikli olarak maksimum gerilmenin oluşabileceği bölgeler darbe simülasyonu adımları incelenerek görülür (Şekil 3.14).

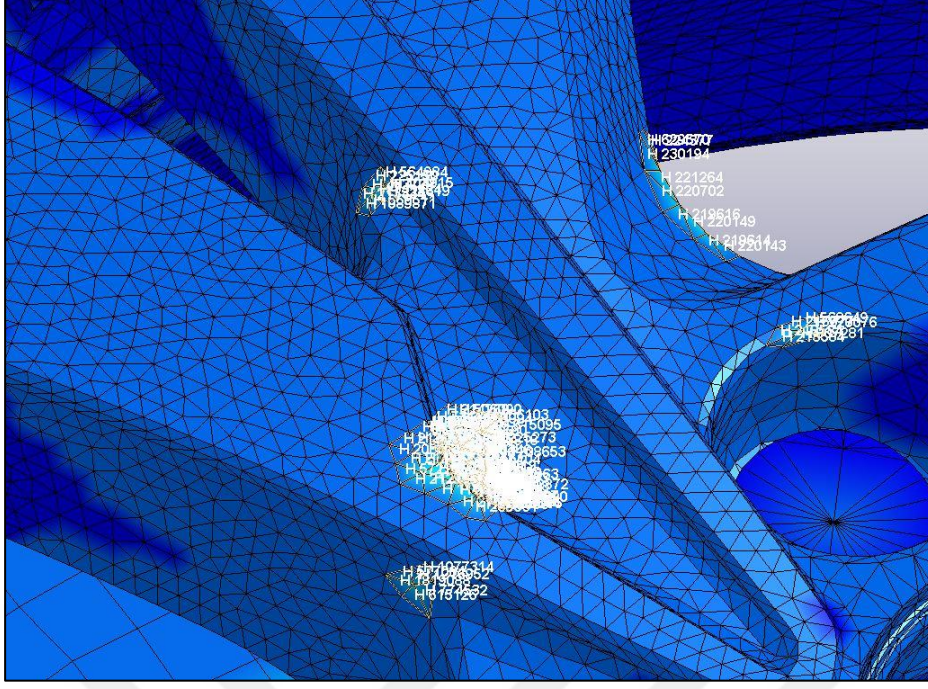


Şekil 3.14 : 13° Darbe test simülasyon adımları.

Maksimum gerilmenin oluşacağı adım belirlendikten sonra bu adımda en yüksek von Mises gerilmenin oluşacağı bölgeler incelenir ve değerlerinin tabloda çizdirilebilmesi için bu riskli bölgedeki elemanlar seçilir (Şekil 3.15). Bu adımda yazılım, tüm darbe sürecini adım adım göstererek riskli bölgelerin detaylı olarak seçilebilmesine imkan tanır. Simülasyonun işaret ettiği riskli bölgelerin yanında, tecrübeli mühendislik ekibinin de değerlendirmesi dikkate alınarak olabilecek tüm riskli bölgeler değerlendirmeye alınır.

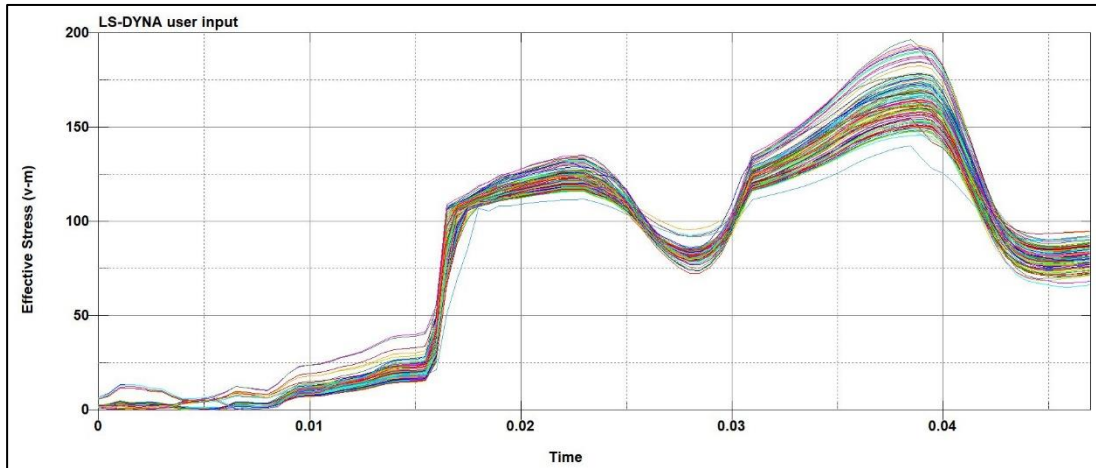


Şekil 3.15 : 13° Darbe test simülasyonuna göre riskli bölgeler.



Şekil 3.16 : 13° Darbe test simülasyonuna göre riskli bölgedeki eleman seçimi.

Riskli bölgelerdeki elemanların seçimi (Şekil 3.16) sonrası bu elemanların von Mises gerilmelerinin zamana bağlı olarak değerleri tüm elemanlar için tek tek çizdirilebilir. Bu çalışmada, darbe hasarı için riskli olabilecek bölgelerin gerilmeleri değerlendirildiğinde, en yüksek von Mises gerilme değerinin 200 MPa değerinin altında kaldığı görülmüş ve ilgili standart ve şartnameye göre ‘uygun’ olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.17 : 13° Darbe test simülasyonuna göre riskli bölge değerlendirilmesi.

3.3 Deneysel Yöntem Bulguları

Deneysel yöntemde yapılacak testler için alternatif alaşımli jant imalatı gerçekleştirilmiştir. Malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de verilmişti. Deneme döküm öncesi kalıp hazırlık, kalıp ısıtma, metal hazırlama, kimyasal kontrolü, gaz giderme işlemi, eklentileri ve temizliği seri imalatta yapıldığı gibi yapılarak proses parametrelerinin etkisinin minimum düzeyde tutulması amaçlanmıştır.



Şekil 3.18 : Kalıp hazırlığı ve deneme döküm başlangıcı.



Şekil 3.19 : Alternatif malzeme (AlSi9Mg) ile dökülen jant örnekleri.

Dökümü tamamlanan jantlardan uygun olanlara talaşlı imalata geçmeden önce ısı işlem çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Burada gerilme giderme tavı olarak da bilinen T5 ısı işlem denemeleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, alternatif malzeme ile dökülen jantların mekanik özelliklerinin artırılması hedeflenmiştir. Alternatif malzemeli jantlara uygulanan ısı işlem özellikleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Isıl işlem şartları.

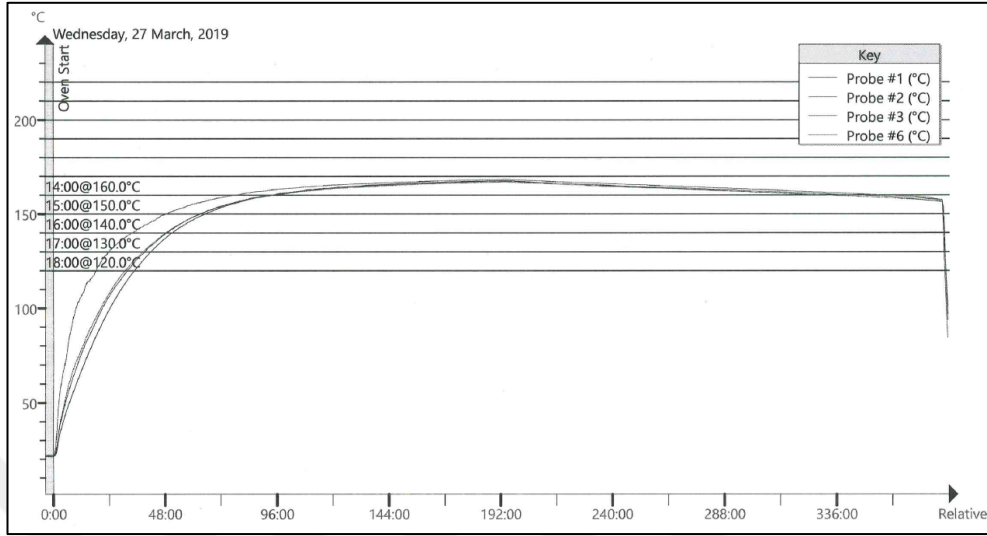
Alternatif Alaşımli (AlSi9Mg) Jant Kod.	Isıl işlem sıcaklığı [°C]	Isıl işlem süresi [Saat]
1 – A/B/C	165	2
2 – A/B/C	165	4
3 – A/B/C	165	6
4 – A/B/C	180	2
5 – A/B/C	180	4
6 – A/B/C	180	6

Jantlara uygulanan ısı işlem esnasında jantın önemli bölgelerinden termokupllar aracılığıyla eş zamanlı sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri zamana bağlı olarak her 30 saniyede bir data alınarak ısı işlem süreci boyunca data toplanmıştır. Önemli bölgeler olarak tanımlanan bölgeler, mekanik ölçümlerin alındığı feder, dış flanş ve iç flanş bölgelerinden alınmıştır. Önemli bölgelerin yanında ortam sıcaklığı da zamana bağlı ölçülerek fırının ayarlama sıcaklığı ile ölçüm değerleri arasında oluşabilecek farklar incelenmiştir.



Şekil 3.20 : Fırın içi sıcaklık ölçümlerinin alındığı önemli jant bölgeleri.

Şekil 3.20’de termokoplların bağlandığı problardan gelen veriler her ısıl işlem şartı için tutulmuş, Şekil 3.21’de de -örnek olması bakımından- 165°C sıcaklığında 6 saat boyunca yapılan ısıl işlemin ölçümleri gösterilmiştir.

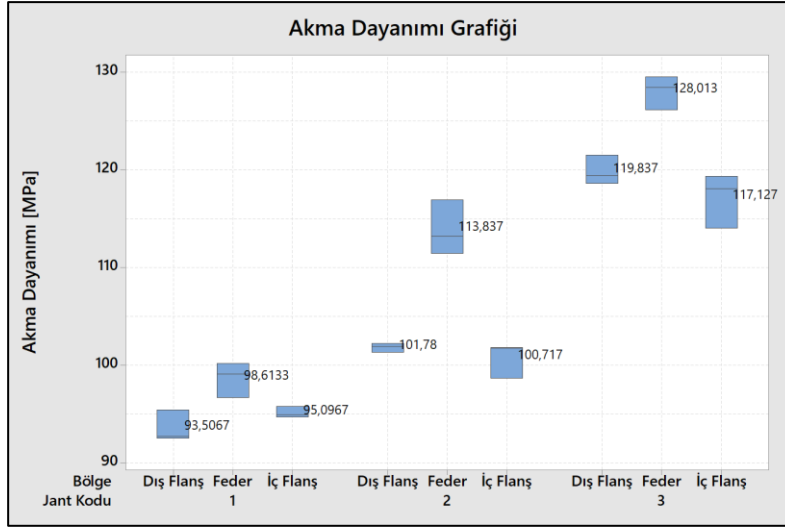


Şekil 3.21 : Isıl işlem şartlarının jant üzerinde tanımlı bölgelerindeki değerleri.

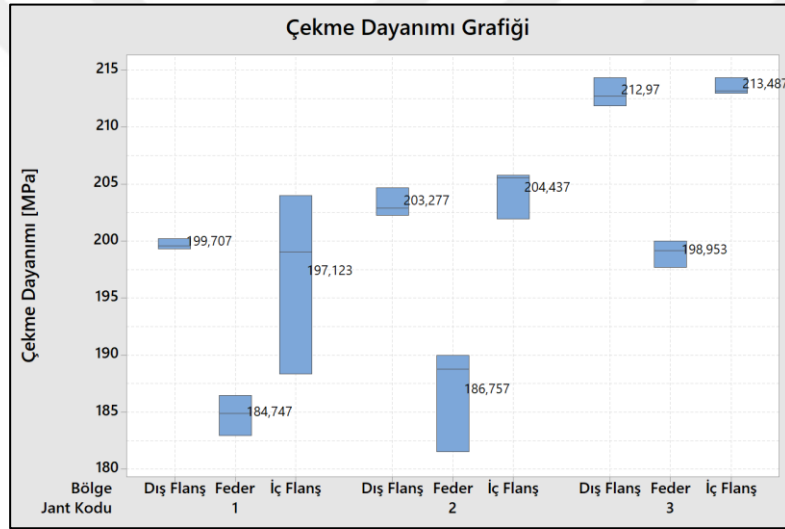
Diğer tüm ısıl işlem şartları için de ölçüm alınmış fakat bu çalışmada her biri ayrı ayrı gösterilmemiş, sadece ısıl işlemin uygunluğunu anlayabilmek için incelenmiştir. Isıl işlem süreci boyunca ilgili bölgelerdeki sıcaklık durumu detaylı olarak takip edilmiş ve uygulanan ısıl işlem şartlarının uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Isıl işlem şartlarının uygulandığı jantların mekanik özelliklerin jantın farklı bölgelerindeki değişimleri 165°C için Şekil 3.22- Şekil 3.23- Şekil 3.24'te, 180°C için Şekil 3.25- Şekil 3.26- Şekil 3.27'de verilmiştir.

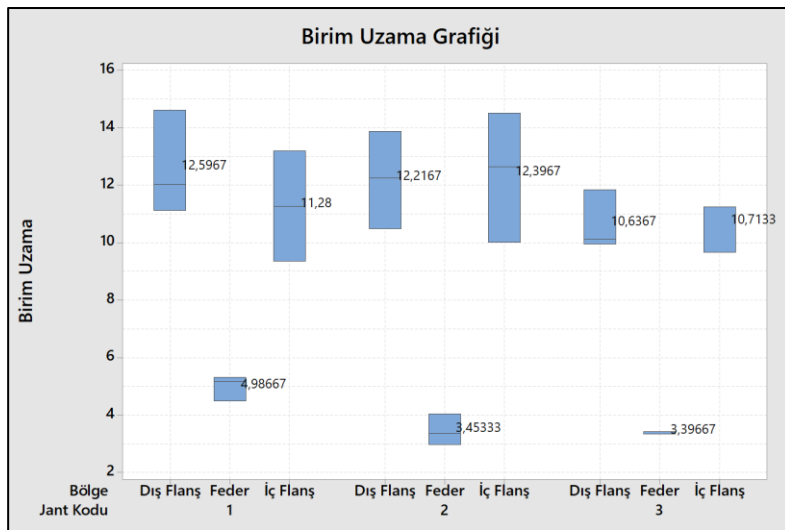
Altındaki şekiller incelendiğinde öncelikle 165°C'de yapılan ısıl işlem için, ısıl işlem süresi arttığında akma dayanımında ve çekme dayanımında artış olduğu, birim uzama değerlerinde ise düşme olduğu görülmektedir. Benzer şekilde 180°C'de yapılan ısıl işlem için benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu durum temelde beklenen bir sonuç olmasının yanında mekanik özelliklerden akma ve çekme değerlerinde yapılacak iyileştirmenin limiti birim uzama değerleridir. Değerlendirme esnasında çekme ve akma değerlerinin belirli limit üzerinde olması ürünün uygun olarak değerlendirilmesi için yeterlidir. Bu değerlerin limitlerin çok üzerine çıkması, birim uzamalarda limitin altında kalma riski oluşturması durumunda uygunsuzluğa sebep olabilir. Bu sebeple değerlendirme aşamasında her üç özelliğin gerekli limitlerde olması önemlidir.



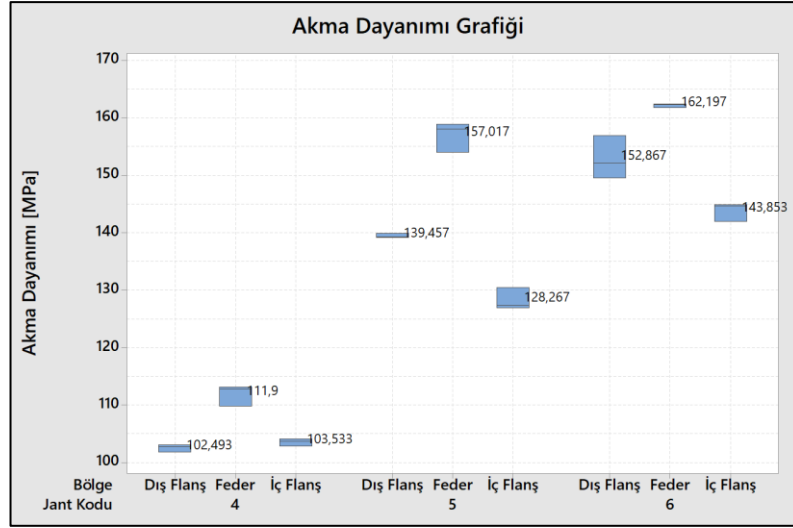
Şekil 3.22 : 165°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin akma dayanımına etkisi.



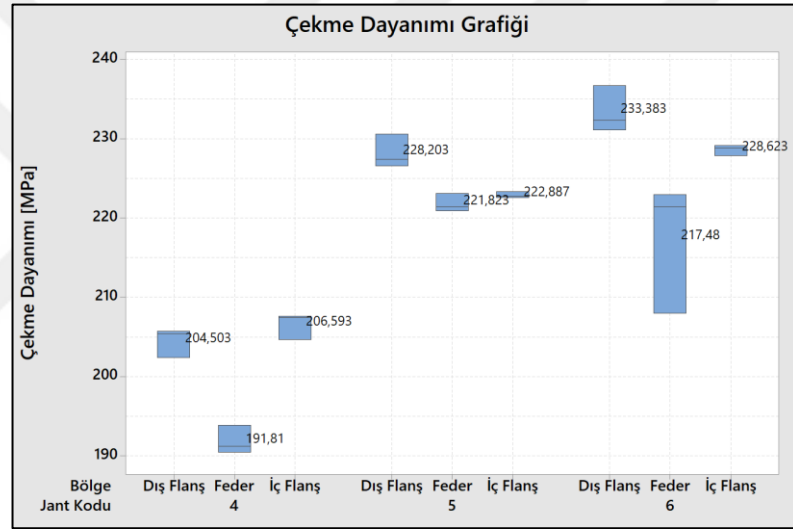
Şekil 3.23 : 165°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin çekme dayanımına etkisi.



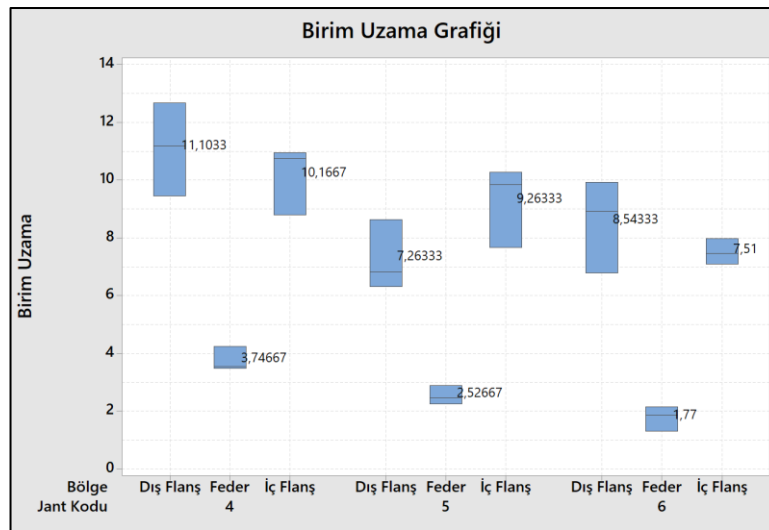
Şekil 3.24 : 165°C’de farklı sürelerde uygulanan ısıl işlemin birim uzamaya etkisi.



Şekil 3.25 : 180°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin akma dayanımına etkisi.



Şekil 3.26 : 180°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin çekme dayanımına etkisi.

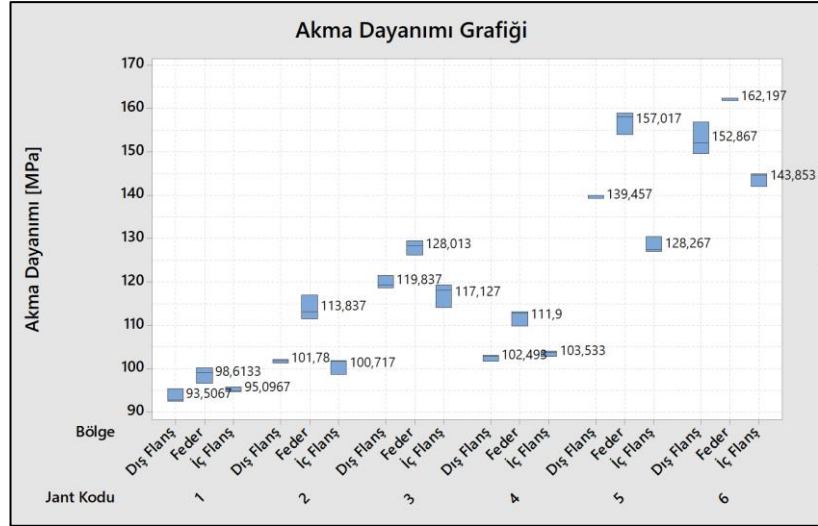


Şekil 3.27 : 180°C’de farklı sürelerdeki ısıl işlemin birim uzamaya etkisi.

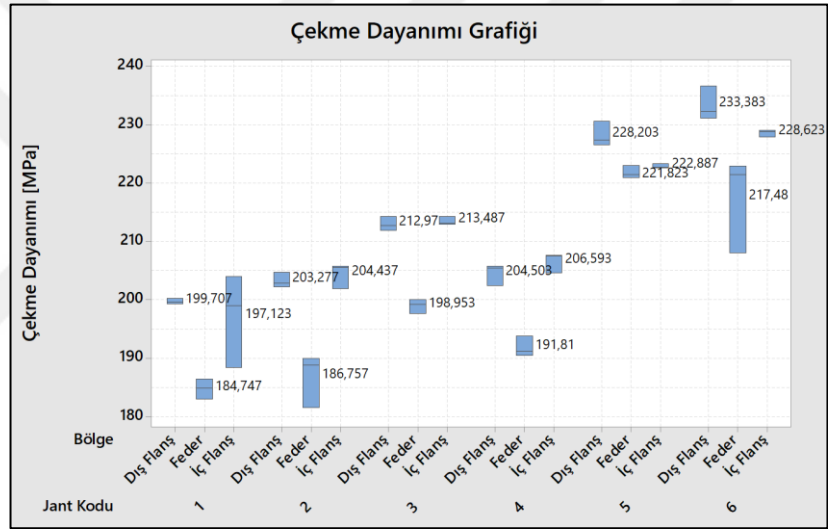
165°C’de yapılan ısıl işlemin 2 – 6 saat uygulama aralığında artarak devam eden her 2 saatlik ısıl işlem süresi jantın; feder bölgesinde akma dayanımını ortalama %14, çekme dayanımını ortalama %3 oranında artırırken, birim uzamayı ise ortalama %16 oranında düşürmektedir. Dış flanş bölgesinde akma dayanımını ortalama %13, çekme dayanımını ortalama %3 oranında artırırken, birim uzamayı ise ortalama %7 oranında düşürmektedir. İç flanş bölgesinde ise akma dayanımını ortalama %11, çekme dayanımını ortalama %4 oranında artırırken, birim uzamayı ise %2 oranında düşürmektedir. 180°C’de yapılan ısıl işlemin 2 – 6 saat uygulama aralığında artarak devam eden her 2 saatlik ısıl işlem süresi jantın; feder bölgesinde akma dayanımını ortalama %21, çekme dayanımını ortalama %6 oranında artırırken, birim uzamayı ise ortalama %30 oranında düşürmektedir. Dış flanş bölgesinde akma dayanımını ortalama %22, çekme dayanımını ortalama %7 oranında artırırken, birim uzamayı ise ortalama %8 oranında düşürmektedir. İç flanş bölgesinde ise akma dayanımını ortalama %18, çekme dayanımını ortalama %5 oranında artırırken, birim uzamayı ise %13 oranında düşürmektedir. İlgili ısıl işlem şartlarına göre alınan jant numunelerinde elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.6’da paylaşılmıştır.

Çizelge 3.6 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantların mekanik özellik sonuçları.

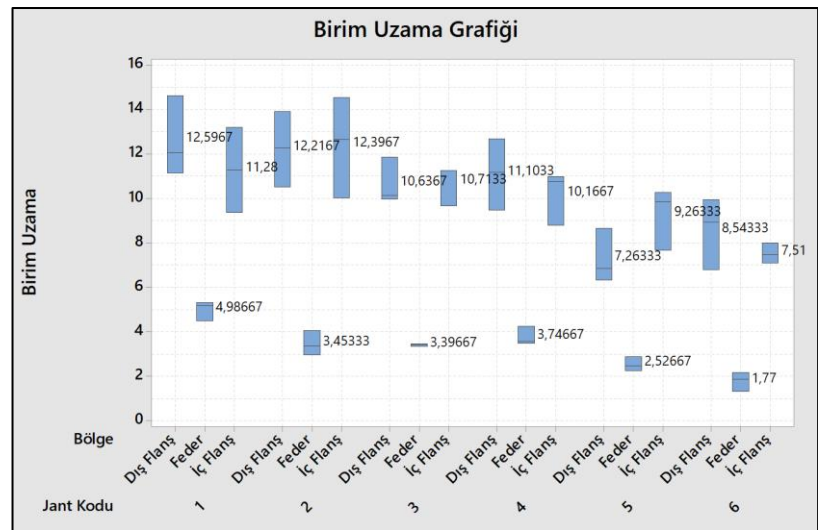
	Isıl işlem sıcaklığı [°C]	Isıl işlem süresi [Saat]	Bölge	Akma Dayanımı [MPa]	Çekme Dayanımı [MPa]	Birim Uzama [%]
1 – A/B/C	165	2	Feder	98,61	184,75	4,99
			Dış Flanş	93,51	199,71	12,59
			İç Flanş	95,10	197,12	11,28
2 – A/B/C	165	4	Feder	113,84	186,76	3,45
			Dış Flanş	101,78	203,28	12,21
			İç Flanş	100,72	204,44	12,40
3 – A/B/C	165	6	Feder	128,02	198,95	3,40
			Dış Flanş	119,84	212,97	10,64
			İç Flanş	117,13	213,49	10,71
4 – A/B/C	180	2	Feder	111,9	191,81	3,75
			Dış Flanş	102,49	204,5	11,1
			İç Flanş	103,53	206,6	10,16
5 – A/B/C	180	4	Feder	157,02	221,82	2,53
			Dış Flanş	139,46	228,21	7,26
			İç Flanş	128,27	222,89	9,26
6 – A/B/C	180	6	Feder	162,2	217,48	1,77
			Dış Flanş	152,87	233,38	8,55
			İç Flanş	143,85	228,63	7,51



Şekil 3.28 : Tüm ısıtım işlem deneme şartlarının akma dayanımına etkisi.



Şekil 3.29 : Tüm ısıtım işlem deneme şartlarının çekme dayanımına etkisi.



Şekil 3.30 : Tüm ısıtım işlem deneme şartlarının birim uzamaya etkisi.

Yorulma testinin deneysel uygulaması, kısa ve uzun test olarak adlandırılan sırasıyla 200.000 tur ve 1.800.000 tur çevrimin alternatif alaşımli janta uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Bu test, bu çalışmada 2.4.1 başlığında detaylandırılan test cihazı ve prosedürü ilgili standart ve şartnamelerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. yorulma testinin takip edildiği forma göre jantın ET, PCD gibi geometrik özelliklerinin yanında yorulma momentini oluşturacak yüklemenin kısa test ve uzun test için uygulanacak momentler de hesaplanıp uygulanarak yorulma testi takip edilmiştir.

Çizelge 3.7 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantların yorulma sonuçları.

Jant	Bölge	Çevrim Sayısı	Test Moment Oranı	ET [mm]	PCD	Sonuç
Alternatif Alaşımli Jant	Kısa Test	200.000	%83	40	5X100	OK
	Uzun Test	1.800.000	%55	40	5X100	OK

Bu sonuçlara göre alternatif alaşımli jantın, ilgili jant modeline göre hesaplanan yorulma momenti altında dayanımı ‘uygun’dur.

13° darbe testinin deneysel uygulaması, ilgili janta tanımlı darbe yükünün alternatif alaşımli janta uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu test, bu çalışmada 2.4.2 başlığında detaylandırılan test cihazı ve prosedürü ilgili standart ve şartnamelerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Darbe testinin takip edildiği forma göre jantın ET, PCD gibi geometrik özelliklerinin yanında darbe yükü de talep edilen değerde uygulanarak darbe testi takip edilmiştir.

Çizelge 3.8 : Alternatif malzemeli (AlSi9Mg) jantların darbe sonuçları.

Jant	Bölge	Darbe Yüğü [kg]	ET [mm]	PCD	Sonuç
Alternatif Alaşımli Jant	Sibop Üstü	489	40	5X100	OK
	Feder Üstü	489	40	5X100	OK

Bu sonuçlara göre alternatif alaşımli jantın, ilgili jant modeline göre hesaplanan darbe yükü altında dayanımı ‘uygun’dur.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, alüminyum alaşımlı jant malzemesi olarak tercih edilen AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlı malzemelere alternatif bir alaşım (AlSi9Mg) üzerinde çalışılmıştır. Alternatif alaşım olarak belirlenen AlSi9Mg malzemesinin diğer sektörlerde kullanımı incelenmiş ve janta uygulanması üzerine çalışılmıştır. Alternatif alaşımlı jantın mekanik özelliklerin artırılması için uygulanan yöntemler detaylı olarak incelenmiş ve bu işlemlerden ısıl işlem uygulamaları tercih edilerek alternatif alaşımlı jantlara farklı yapay yaşlandırma şartları ve süreleri uygulanarak mekanik özelliklerin arttırılabileceği öngörülmüştür. Bu öngörünün uygulanması öncesi, tasarım doğrulama ve ürün doğrulama farklı analiz programları kullanılarak sayısal yöntemlerle gerçekleştirilmiş ve uygunluğu görülmüştür. Daha sonra, bu sayısal yöntemler deneme üretim sonrası elde edilen alternatif alaşımlı jantlara deneysel olarak uygulanarak elde edilen sayısal çözüm uygunluğunun deneysel olarak da doğrulanması ile alternatif alaşımlı jantın uygunluğu bilgisi elde edilmiştir. Alternatif alaşımlı jantlara uygulanan ısıl işlem sonrası mekanik özellikleri çekme testleri ile ölçülerek akma dayanımı ve çekme dayanımlarında artış görülmüştür. Bu artışa bağlı olarak birim uzamada ise azalmalar görülmüş, tüm bu değerler de ilgili standart ve şartnamelere göre değerlendirilmiştir. Tüm bu değerlendirmeler sonucu, ilgili jantın bu çalışmadaki döküm parametreleri, soğutma uygulamaları, malzeme kalitesi, tane inceltme ve modifikasyon uygulamaları ile alternatif alaşımlı olarak dökülebileceği ‘uygun’ olarak değerlendirilmiştir. Isıl işlem sonuçları değerlendirildiğinde ise, esasen ısıl işlem beklenen iyileştirmenin hangi mekanik özelliklerin (akma dayanımı, çekme dayanımı ve birim uzama) iyileştirilmesi talep edilmesi durumuna göre ısıl işlem sıcaklığın arttırılması/azaltılması ya da ısıl işlem uygulama zamanının arttırılması/azaltılması yöntemleri uygulanabilir. Bu çalışmaya göre sıcaklık ve süre arttırıldıkça akma dayanımı ve çekme dayanımları artarken, birim uzama değerleri düşüş gösterir. Konu ile ilgili araştırmacılara fikir vermesi amacıyla uygulanan parametreler ve sonuçlar olabildiğince detaylı paylaşılmış olmasına rağmen döküm parametreleri, kalıp soğutma sistemi ve uygulaması, ısıl işlem uygulama şartları ve ortamı vb. birtakım

bilgiler ‘know-how’ bilgi birikimi ve gizliliği kapsamında detaylandırılmamıştır. Bu durum, bu çalışmadaki alternatif alaşımın tüm jant modellerinde kullanılmasının model bazlı farklı çalışmalar gerektireceği ve uygunluğunun ancak bu şekilde elde edilebileceği not edilmelidir.



KAYNAKLAR

- [1] **Modern Casting.** (2018). *A Publication of the American Foundry Society.* (pp.24-26). December 2018.
- [2] **Dispinar, D.** (2005). Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys (*PhD Thesis*). (pp.1-4). School of Metallurgy and Materials – The University of Birmingham. January 2005.
- [3] **Url-1** <https://www.researchandmarkets.com/research/fldbnv/future_of?w=5>, erişim tarihi 09.01.2019.
- [4] **Url-2** <<https://aluminiuminsider.com/aluminium-vs-steel-in-electric-vehicles-the-battle-goes-on/>>, erişim tarihi 10.01.2019.
- [5] **Jarco, A., Dudyk, M., & Plonka, S.** (2015). Improving Quality of the EN AC-43300 (AlSi9Mg) Alloy Destined for Casting of a Pump Casings. (pp.31-34) *Archives of Foundry Engineering.* ISSN (1897-3310) Volume 15 Special Issue 2/2015.
- [6] **Lipinski, T.** (2015). Double Modification of AlSi9Mg Alloy with Boron, Titanium and Strontium. (pp.2415-2419) *Archives of Metallurgy and Materials.* Volume 60 Issue 3. DOI: 10.1515/amm-2015-0394.
- [7] **Padmanaban, D.A., & Kurien, G.** (2012). Silumins: The Automotive Alloys. (pp.28-30) *Advanced Materials & Processes.* March 2012.
- [8] **Lipinski, T., & Szabracki, P.** (2015). Mechanical Properties of AlSi9Mg Alloy with a Sodium Modifier. (pp.78-86) *Solid State Phenomena Vol. 223 Trans Tech Publications, Switzerland* doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.223.78. January 2015.
- [9] **Dobrzański, L.A., Reimann, L., & Krawczyk, G.** (2008). Influence of the ageing on mechanical properties of the aluminium alloy AlSi9Mg. (pp.37-40) *Archives of Materials Science and Engineering Vol. 31, Issue 1.* May 2008.
- [10] **Pezda, J.** (2008). Heat treatment of AlSi9Mg alloy. (pp.169-172) *Archives of Foundry Engineering Vol. 8, Issue 1/2008.* ISSN (1897-3310) 2008.
- [11] **Reif, W., & Müller, K.** (1998). Improvement of mechanical properties of Al-Si-Cast alloys by grain refinement and modification. (pp.263-275) *Advanced Light Alloys and Composites.* 2008.
- [12] **Pezda, J.** (2009). Effect of dispersion hardening process on machinability of EN AB-AlSi9Mg silumin. (pp.183-186) *Archives of Foundry Engineering Vol. 9, Issue 4/2009.* ISSN (1897-3310) 2009.
- [13] **Aran, A.** (2007). Döküm teknolojisi – İmal usülleri ders notları. (pp.68-103) İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi. 2007.

- [14] **Dispinar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Syvertsen, F., Sabatino, M.D., & Arnberg, L.** (2012). Tensile properties, porosity and melt quality relation of A356. (pp.201-208) *Materials Properties, Characterization, and Modeling TMS (The Minerals, Metal & Materials Society) Volume 2. 2012.*
- [15] **Lumley, R.** (2011). Fundamentals of aluminium metallurgy – Production, processing and application. (pp.1-19) *Woodhead Publishing in Materials. Woodhead Publishing Limited, 2011.*
- [16] **Güven, O.** (2005). Alüminyum Silisyum Magnezyum Döküm Alaşımlarının Yapı İncelemesi. (pp.1-18) (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
- [17] **Görel, G.** (2017). Al-Si alaşımlarında Beslenebilirliğin Karakterizasyonu. (pp.9-33) (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [18] **Brown, J. R.** (1999). Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook. (pp.1-45) Butterworth-Heinemann Eleventh edition. 1999.
- [19] **Duygun, İ.K.** (2017). Al-Si alaşımlarında Stronsiyum Modifikasyonu ile Döküm Kalitesi Arasında İlişkinin Karakterizasyonu. (pp.1-26) (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [20] **Srirangam, P., Chattopadhyay, S., Bhattacharya, A., Mag, S., Kaduk, J., Shankar, S., Banerjee, R., & Shibata, T.** (2014). Probing the local atomic structure of Sr-modified Al-Si alloys. (pp.185-193) *Acta Materialia, Elsevier.*
- [21] **Sigworth, G.K., & Kuhn, T.A.** (2007). Grain Refinement of Aluminum Casting Alloys. (pp.31-40) *International Journal of Metalcasting/Fall 07.*
- [22] **Ozaydin, O., Armakan, E., & Kaya, A.** (2018). The Mechanical Properties of Sr Modification on Aluminium Casting Alloys. (pp.289-295) *II. International Conference on Engineering Technology and Innovation, Budapest, 2018.*
- [23] **Kaufman, J.G. & Rooy, E.L.** (2004). Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications – Chapter 1: Introduction. (pp.1-6) *ASM International, 2004.*
- [24] **Askeland, D.R., Fulay, P.P., & Wright, W.J.** (2006). The Science and Engineering of Materials. (pp.413-451) *Cengage Learning, Sixth Edition, 2010.*
- [25] **Ozaydin, O., Yagci, T., Kaya, A., Culha, O., & Armakan, E.** (2018). Investigation and Characterization of Inclusions in Aluminium Cast Alloys for Automotive Industry. *73rd World Foundry Congress, 23-27 September 2018 Krakow, Poland.*
- [26] **Campbell, J.** (2006). An Overview of the Effects of Bifilms on the Structure and Properties of Cast Alloys. (pp.1-6) *ASM International, 2004.*
- [27] **Campbell, J.** (2006). Entrainment defects (pp.127-145) *Materials Science and Technology, Volume:22, No:2, 2006.*

- [28] **Campbell, J.** (2004). *Castings Practice: The Ten Rules of Castings* (pp.1-224) *ElsevierButterworth – Heinemann*.
- [29] **Jolly, M.R.** (2005). Prof. John Campbell's Ten Rules for Making Reliable Castings (pp.19-28) *JOM: The journal of the Minerals, Metals & Materials Society · May 2005*.
- [30] **Ozaydin, O., Armakan, E., & Catal, Y.** (2018). Soğutma Kanallarındaki Hava Tüketimi Azaltılması. (pp.189-195) *10. Uluslararası Döküm Kongresi – Tüdöksad (Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği) Akademi 25-27 Ekim 2018 İstanbul*.
- [31] **Moayedinia, S.,** (2014). Quantification of Cooling Channel Heat Transfer in Low Pressure Die Casting (*M.Sc. Thesis*). (pp.1-11) *The University of British Columbia (Vancouver) July 2014*
- [32] **Url-2** <<https://www.cevher.com/tr/gelistirme-ve-uretim/uretim>>, erişim tarihi 14.02.2019.
- [33] **Grubisic, V.,** (2017). Air Tightness Control of Passenger Car Wheels). (pp.171-180) *Engineering - Science Research Publishing February, 2017*.
- [34] **Rheinfelden,** Primary Aluminium Casting Alloys, Datasheet L 2.06/3-KH. (pp.1-10) *Aluminium Rheinfelden GmbH - Rheinfelden ALLOYS*.
- [35] **ISO 7141,** (2005). Road vehicles – Light alloy wheels – Impact test. (pp.1-4) *International Standard ISO 7141:2005(E)*.
- [36] **Khan, M.A.A., & Sheikh, A.K.,** (2018). A Comparative study of Simulation software for modelling Metal Casting Processes (pp.197-209) *IJSIMM: International Journal of Simulation Modelling, ISSN 1726-4529*
- [37] **Makra Alpine Metal Tech,** BUP Cornering Fatigue Test Machine Datasheet. (pp.1-8) *Makra Manfred Kratzmeier GMBH*.
- [38] **Bosi, C., Garagnani, G.L., & Tovo, R.,** (2002) Fatigue Properties of a cast aluminium alloy for rims of car wheels. (pp.3-8) *Metallurgical Science and Technology*
- [39] **Satyanarayana, N., & Sambaiah, Ch.,** (2012) Fatigue Analysis of Aluminum Alloy Wheel Under Radial Load. (pp.1-6) *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE), ISSN No. 2231 –6477, Vol-2, Issue-1, 2012*.
- [40] **Cevher Jant Sanayii A.Ş,** (2007) Dinamik yorulma test şartnamesi. (pp.1-4) *İzmir*.
- [41] **Hussey, B., & Wilson, L.,** (1998) Light alloys. (pp.233-294) *Springer Science+Business Media Dordrecht 1998*.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Onur ÖZAYDIN
Doğum Tarihi ve Yeri : 01/03/1987 - Uşak
E-posta : ozaydinonur@gmail.com



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakülte, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2015, Türk – Alman Üniversitesi & Dortmund Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Teknolojisi

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2011 - 2012 yılları arasında Doğuş Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği (Türkçe – İngilizce) bölümünde araştırma görevlisi olarak çalıştı.
- 2014 – 2015 yılları arasında Cevher Döküm’de çalıştı.
- 2015 – 2017 yılları arasında Ford Otosan’da üretim mühendisi olarak çalıştı.
- 2017 yılından itibaren Cevher Jant’ta Ar-Ge mühendisi olarak çalışmaktadır.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Özaydın, O., Armakan E., Kaya, A.,** 2018. The Mechanical Properties of Sr Modification on Aluminium Casting Alloys. *II. International Conference on Engineering Technology and Innovations, Book of Proceedings 2018*, Budapest, Hungary. 289 - 295.
- **Özaydın, O., Kaya, A.,** 2018. Influence of Different Si Levels on Mechanical Properties of Aluminium Casting Alloys. *II. International Conference on Engineering Technology and Innovations, Book of Proceedings 2018*, Budapest, Hungary. 86 - 93.
- **Özaydın, O., Armakan E., Özdemir, K.,** 2018. Jant Kolu Arkası Boşluğunun Parametrik Tasarımı ve Optimizasyonu. *10. Uluslararası Döküm Kongresi, Bildiriler Kitabı*, İstanbul, Türkiye. 181 - 188.

- **Özaydın, O., Armakan E., Çatal, Y.,** 2018. Soğutma Kanallarındaki Hava Tüketimi Azaltılması. *10. Uluslararası Döküm Kongresi, Bildiriler Kitabı*, İstanbul, Türkiye. 189 - 195.
- **Özaydın, O., Yagci, T., Kaya, A, Culha, O., Armakan, E.** 2018. Investigation and Characterization of Inclusions in Aluminium Cast Alloys for Automotive Industry. *73rd World Foundry Congress*, September 23-27, 2018 Krakow, Poland.
- **Özaydın, O., Akis, A., Armakan, E.** 2018. Static Analysis of Revised Top Plate in LPDC Machine. *II. International University Industry Cooperation, R&D and Innovation Congress*, November 14-15, 2018 Manisa, Türkiye.
- **Kırmızıgöl, S.F., Özaydın, O., Acarer, S., Armakan, E.** 2018. Parametric Analysis of the Cooling Channels in LPDC. *II. International University Industry Cooperation, R&D and Innovation Congress*, November 14-15, 2018 Manisa, Türkiye.
- **Korkut, T.B, Gören, A. Özaydın, O., Armakan, E.** 2019. Aerodynamic Effects of Composite Wheel Cover on Electric Vehicle (Part 1). pp.20 – 24. *E.Ş. PUTech&Composite January – February 2019*