

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**3 BOYUTLU YAZICILAR İLE ÜRETİLEN MAÇALARA MOTOR
BLOKLARININ DÖKÜMÜNDE OPTİMUM PROSES VE TASARIM
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cem AYDIN

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**3 BOYUTLU YAZICILAR İLE ÜRETİLEN MAÇALARA MOTOR
BLOKLARININ DÖKÜMÜNDE OPTİMUM PROSES VE TASARIM
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Cem AYDIN
(181212874016)**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Muhammet ULUDAĞ

TEMMUZ 2021

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 181212874016 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi Cem AYDIN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “3 BOYUTLU YAZICILAR İLE ÜRETİLEN MAÇALARA MOTOR BLOKLARININ DÖKÜMÜNDE OPTİMUM PROSES VE TASARIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ”başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Muhammet ULUDAĞ**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Cem KAHRUMAN**
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCABAŞ
Konya Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 23 Ağustos 2021
Savunma Tarihi : 26 Temmuz 2021



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 190Y020 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Cem AYDIN

İmzası:

[Handwritten signature of Cem AYDIN]



Eşime ve oğluma,

Bu süreçte bana en başından beri destek olan hayatımın en değerlilerine...

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi ile 3B (3 boyutlu) yazıcıların döküm sektöründeki rolü ile birlikte, geleneksel yöntem ile üretilen ve 3B yazıcılardan faydalanılarak üretilen motor bloklarının özellikleri incelenmiştir. Bilgi birikiminden fazlasıyla faydalandığım ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve becerisi ile yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi sayın Muhammet ULUDAĞ'a şükranlarımı sunarım. Üniversite imkanlarının kullanımında kolaylık sağlayan ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Deniz UZUNSOY'a teşekkürlerimi sunarım. Cihazların kullanımı açısından desteğini esirgemeyen ve bünyesinde çalışmaktan onur duyduğum DÖKTAŞ A.Ş' ye, değerli yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2021

Cem AYDIN
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	2
2.1 Dökme Demirlerin Genel Özellikleri	2
2.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	4
2.2.1 Grafit yapısına göre dökme demirler	4
2.2.1.1 Lamel grafitli dökme demirler	4
2.2.1.2 Küresel grafitli dökme demirler	5
2.2.1.3 Vermiküler grafitli dökme demirler	6
2.2.2 Kimyasal kompozisyonuna göre dökme demirler	7
2.2.3 Karbonun yapıdaki şekline göre dökme demirler	8
2.2.3.1 Beyaz dökme demirler	8
2.2.3.2 Gri dökme demirler	8
2.2.3.3 Benekli dökme demirler	8
2.2.3.4 Temper dökme demirler	9
2.3 Gri Dökme Demirlerin Genel Özellikleri	9
2.4 EN GJL 300 Alaşımının Genel Özellikleri	10
2.5 Eklemeli İmalat	11
2.5.1 SLS (Seçmeli lazer sinterleme) yöntemi	13
2.5.2 SLA (Stereolitografi) yöntemi	14
2.5.3 FDM (Eriyik yığma modelleme) yöntemi	14
2.5.4 Bağlayıcı ile katmanlı imalat yöntemi	15
2.5.5 Döküm sektöründe eklemeli imalat	16
2.6 Döküm Simülasyonu	17
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
3.1 Deneysel Çalışmaların Planlanması	21
3.2 Döküm Simülasyon Çalışmaları	21
3.2.1 Simülasyonda kullanılan bilgisayar ve programlar	21
3.2.2 Simülasyonların yapılması	22
3.3 Dökümlerin Gerçekleştirilmesi	23
3.3.1 Maçaların 3b yazıcıda yazdırılması ve kalıp oluşturulması	23
3.3.2 Sıvı metalin ergitilmesi ve döküm	25
3.4 Mikroyapı İncelemeleri	27

3.5 Mekanik Testler.....	28
3.5.1 Mekanik testlerde kullanılan cihazlar	28
3.5.2 Mekanik testlerin gerçekleştirilmesi	31
3.6 X-Ray İncelemelerinin Yapılması.....	34
3.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemelerinin Yapılması.....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4.1 Simülasyon Sonuçları.....	37
4.2 Mikroyapı Analizleri	43
4.3 Çekme Testi ve Çentik Darbe Testi Sonuçları	44
4.4 Aşınma Testi Sonuçları	47
4.5 Sertlik Testi Sonuçları	49
4.6 X-Ray Sonuçları	50
4.7 SEM Analiz Sonuçları.....	51
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	54
5.1 Sonuçlar.....	54
5.2 Öneriler.....	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

3B	: 3 Boyutlu
CE	: Karbon Eşdeğeri
HB	: Brinell Sertliği
HRC	: Rockwell Sertliği
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SLS	: Seçmeli Lazer Sinterleme
SLA	: Stereolitografi
FDM	: Eriyik Yığılma Metodu
X-RAY	: X ışını

SEMBOLLER

°C	: Derece, santigrat
C	: Karbon
Cr	: Krom
Fe	: Demir
J	: Joule
Kg	: Kilogram
KVA	: Kilovolt Amper
Mn	: Mangan
Mg	: Magnezyum
MPa	: Megapaskal
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
µm	: Mikrometre

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : DIN-EN 1561 standartına göre dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları (%) [2, 3].	2
Çizelge 2.2 : DIN-EN 1561 standartına göre gri dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları (%) [2].	10
Çizelge 2.3 : DIN-EN 1561 standartına göre EN GJL 300 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%) [2].	11
Çizelge 2.4 : Eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması [31].	12
Çizelge 3.1 : Simülasyon parametrelerindeki değişkenler.	23

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Demir-Sementit (Fe-Fe ₃ C)denge diyagramı [4].	3
Şekil 2.2 : Lamel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı [5].	5
Şekil 2.3 : Küresel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı [8].	5
Şekil 2.4 : Vermiküler grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı [11].	6
Şekil 2.5 : Dökme demirler için karbon eşdeğeri-sıcaklık diyagramı [15].	7
Şekil 2.6 : Benekli dökme demir mikroyapısı [22].	9
Şekil 2.7 : Benekli dökme demir mikroyapısı [24].	9
Şekil 2.8 : Gri dökme demir mikroyapısı [26].	10
Şekil 2.9 : EN GJL 300 alaşımı temsili mikroyapısı [6].	11
Şekil 2.10 : Eklemeli imalat veri akışı [30].	12
Şekil 2.11 : SLS sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar [35].	13
Şekil 2.12 : SLA sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar [31].	14
Şekil 2.13 : FDM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar [35].	15
Şekil 2.14 : Bağlayıcı ile katmanlı imalat sisteminin çalışma prensibi [43].	16
Şekil 2.15 : Bağlayıcı ile katmanlı üretim yöntemi [44].	16
Şekil 2.16 : 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş kum kalıp [45].	17
Şekil 2.17 : Fren diski için tasarlanmış yolluk sisteminin dolum anındaki görüntüsü [53].	18
Şekil 2.18 : Simülasyon sonucu öngörülen çekinti riski ile döküm parçada gerçekleşen çekinti hatası gösterilmiştir [53].	19
Şekil 2.19 : Simülasyon sonucu ile öngörülen soğuk çatlak riskleri ile döküm parçada gerçekleşen soğuk çatlak problemi gösterilmiştir [53].	19
Şekil 2.20 : Simülasyon sonucuna göre hava kapması riski olan bölgeler gösterilmiştir [53].	20
Şekil 2.21 : Bölgesel perlit yüzdesi analizi [53].	20
Şekil 3.1 : 3 boyutlu yazıcılarda üretilecek olan motor bloğu ve yolluk sistemi.	22
Şekil 3.2 : Tasarımı yapılan maçalar.	24
Şekil 3.3 : Maçaların yazdırılmasında kullanılan 3B kum yazıcı.	24
Şekil 3.4 : Maçaların montajında kullanılan bağlama demirleri ve bağlantı elemanları.	25
Şekil 3.5 : Maçaların montaj edilmiş hali.	25
Şekil 3.6 : Ergitilmiş metalin indüksiyon ocağından döküm potasına alınması.	26
Şekil 3.7 : Sıvı metalin sıcaklığının ölçülmesi	26
Şekil 3.8 : Sıvı metalin kalıba dökülmesi.	27
Şekil 3.9 : Mikroyapı incelemesi yapılan optik mikroskop.	28
Şekil 3.10 : Çekme testi yapılan Shimadzu markalı cihaz.	28
Şekil 3.11 : Çentik darbe testi yapılan ALŞA ZBC 300J markalı cihaz.	29

Şekil 3.12 : Aşınma testi yapılan Bruker UMT 2 markalı cihaz.	30
Şekil 3.13 : Sertlik ölçümlerinin yapıldığı cihaz.	30
Şekil 3.14 : Çekme testi ve çentik darbe testi numunelerinin alındığı bölgeler.	31
Şekil 3.15 : Çekme testi için numune ölçüleri.	32
Şekil 3.16 : Çentik darbe testi için hazırlanan örnek numune ölçüleri.	32
Şekil 3.17 : Aşınma testi numunesi alınan bölge.	33
Şekil 3.18 : Aşınma testi numuneleri.	33
Şekil 3.19 : Sertlik ölçümü yapılan bölgeler.	34
Şekil 3.20 : X-ray kontrol ünitesi.	35
Şekil 3.21 : Taramalı elektron mikroskobu.	36
Şekil 4.1 : 1. versiyon simülasyon çalışması yolluk sistemi.	37
Şekil 4.2 : 1. versiyondaki hava sıkışma riski olan bölge.	38
Şekil 4.3 : 2. Versiyonda ilave edilen gaz çıkıcıları.	38
Şekil 4.4 : (a) 1. Versiyon ve (b) 2. Versiyon hava sıkışması olan bölgeler.	39
Şekil 4.5 : 2. versiyon dolum sonu parça üzerindeki sıcaklık dağılımı.	39
Şekil 4.6 : Sıvı metalin girişlerdeki hızı.	40
Şekil 4.7 : Çekme boşluğu sonuçları.	41
Şekil 4.8 : (a) 3. versiyon, (b) 4. versiyonun sıcaklık dağılımı sonuçları.	42
Şekil 4.9 : 4. versiyonun kum yanması sonuçları.	42
Şekil 4.10 : (a) Yaş kum kalıp, (b) reçineli kum kalıpta üretilen parçaların mikroyapıları.	44
Şekil 4.11 : (a) Yaş kum kalıpta üretilen parçanın dağlanmış mikroyapısı (100X büyütme) (b) reçineli kum kalıpta üretilen parçanın dağlanmış mikroyapısı (100X büyütme).	44
Şekil 4.12 : Çekme testi sonuçları.	45
Şekil 4.13 : Çentik darbe testi sonuçları.	46
Şekil 4.14 : Ortalama sürtünme katsayıları.	47
Şekil 4.15 : (a) Yağlı ortamda sürtünme katsayısı-zaman grafiği (b) kuru ortamda sürtünme katsayısı-zaman grafiği.	48
Şekil 4.16 : Hacim kayıpları.	48
Şekil 4.17 : Sertlik sonuçları.	49
Şekil 4.18 : X-ray kontrolü için dilimlenmiş motor bloğu.	50
Şekil 4.19 : X-ray görüntüleri.	50
Şekil 4.20 : (a) Reçineli kalıptan elde edilen numunenin 24X büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) reçineli kalıptan elde edilen numunenin 100x büyütmedeki SEM görüntüsü, (c) reçineli kalıptan elde edilen numunenin 500x büyütmedeki SEM görüntüsü, (d) reçineli kalıptan elde edilen numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüsü.	51
Şekil 4.21 : (a) Yaş kum kalıptan elde edilen numunenin 24X büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) yaş kum kalıptan elde edilen numunenin 100x büyütmedeki SEM görüntüsü, (c) yaş kum kalıptan elde edilen numunenin 500x büyütmedeki SEM görüntüsü, (d) yaş kum kalıptan elde edilen numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüsü.	52
Şekil 4.22 : Yaş kum kalıptan elde edilen numunenin kırık yüzeyinde bulunan döküm boşluğu SEM görüntüsü.	53

3 BOYUTLU YAZICILAR İLE ÜRETİLEN MAÇALARA MOTOR BLOKLARININ DÖKÜMÜNDE OPTİMUM PROSES VE TASARIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

3B (3 boyutlu) yazıcılar günümüzde birçok sektörde olduğu gibi döküm sektöründe de kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknoloji döküm sektöründe özellikle maçaların üretilmesinde kullanılmaktadır. 3B yazıcılar çok karmaşık geometriye sahip olan maçaların, maça sandığı olmadan üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında ilk olarak 3 boyutlu yazıcıda üretilen maçalar ile motor blok dökümünde optimum proses ve tasarım parametrelerinin belirlenmesi için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar destekli 3B tasarım programlarında maçaların tasarım çalışmaları yapılmıştır. 3B yazıcılarda üretilen maçaların montajları yapılarak, simülasyon çalışmalarında belirlenen optimum proses parametreleri ile motor blokları dökülmüştür. Eş zamanlı olarak geleneksel döküm yöntemi olan yaş kum kalıba da motor bloğu dökümü gerçekleştirilmiştir. Maçalara dökülen bu motor blokları ile geleneksel yöntem ile dökülen motor blokları bu çalışmada detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Motor bloklarının farklı bölgelerinden mikroyapı, çekme testi, çentik darbe testi, sertlik ve aşınma numuneleri alınmıştır. Mikroyapı incelemelerinde garfit yapıları ve perlit oranları incelenmiştir. Mekanik testlerde kopma mukavemeti, çentik darbe enerjisi ve sertlik sonuçları değerlendirilmiştir. Her iki yöntem için de aşınma testi sonuçları incelenmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, her iki kalıpta üretilen motor blokları da %99 perlitik yapıya sahiptir. Reçineli kum kalıba dökülen motor bloklarından alınan numunelerin kopma mukavemetleri ve sertlik değerleri yaş kum kalıpta üretilen motor bloklarından alınan numunelere göre daha yüksektir. Yaş kum kalıpta üretilen motor bloklarından alınan numunelerin darbe enerjisi reçineli kum kalıpta üretilen motor bloklarından alınan numunelerin darbe enerjisine göre daha yüksektir. X-ray incelemelerinde her iki farklı kalıp türünde üretilen motor bloklarının iç sağlamlığı değerlendirilmiş ve her ikisinin de döküm hatasına rastlanmamıştır.

Anahtar kelimeler: 3B yazıcı, dökme demir, EN GJL 300, motor blok, simülasyon

DETERMINATION OF OPTIMUM PROCESS AND DESIGN PARAMETERS FOR CYLINDER BLOCKS CASTINGS PRODUCED WITH 3D PRINTED CORES

SUMMARY

3D (3 dimensional) printers have started to be used in the casting industry, as in many other sectors. This technology is especially used in the production of cores in the foundry industry. 3D printers enable cores with very complex geometry to be produced without a core box. In this thesis, simulation studies were carried out to determine the optimum process and design parameters in engine block casting with cores produced on a 3D printer. Design studies of cores have been done in computer-aided 3D design programs. The cores produced in 3D printers were assembled and the engine blocks were cast with the optimum process parameters determined in the simulation studies. Simultaneously, the engine block was cast into the green sand mold, which is the traditional casting method. These engine blocks poured into the cores and the engine blocks poured with the traditional method were compared in detail in this study. Microstructure, tensile test, notch impact test, hardness samples were taken from different parts of the engine blocks. In microstructure investigations, graphite structures and perlite ratios were investigated. Breaking strength, notch impact energy and hardness results were evaluated in mechanical tests. In the light of the findings, the engine blocks produced in both molds have a 99% pearlitic structure. The breaking strength and hardness values of the samples taken from the engine blocks poured into the resin sand mold are higher than the samples taken from the engine blocks produced in the green sand mold. The impact energy of the samples taken from the engine blocks produced in the green sand mold is higher than the impact energy of the samples taken from the engine blocks produced in the resin sand mold. In the X-ray examinations, the internal strength of the engine blocks produced in both different mold types was evaluated and no casting defect was found in either of them.

Keywords: 3D printing, cast iron, EN GJL 300, cylinder blocks, simulation

1. GİRİŞ

Kum kalıba döküm yöntemi çok eski zamanlardan beri kullanılan metal şekillendirme metodlarından biridir. Kum kalıba döküm ile çok basit geometriye sahip parçalar üretilebildiği gibi çok karmaşık geometriye sahip parçalar da üretilebilmektedir. Bu döküm parçalarının üretiminde model ve maça sandıkları kullanılmaktadır. Model ve maça sandıklarının üretilmesi zaman almakta ve bu döküm takımlarında modifikasyonların yapılması kolay olmamaktadır. Karmaşık geometriye sahip parçaların üretilmesi için çoğu zaman bir adet maça yeterli olmadığından birden fazla maça için birden fazla maça sandığı üretilmesi gerekmektedir.

Günümüzde havacılık, savunma, medikal, otomotiv gibi birçok alanda kullanılmaya başlayan 3 boyutlu yazıcılar döküm sektöründe de kullanılmaya başlanmıştır. 3B (3 boyutlu) yazıcılar döküm sektöründe direk parça üretiminde kullanılmamakta olup özellikle maçaların üretilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Maça sandığında üretilmesi oldukça zor olan, geometrisinde ters açılar bulunduran maçalar bu yöntem ile kolayca üretilebilmektedir. Maçaların 3B yazıcılarda üretilebilmesi ile birlikte maça sandığı ve model ihtiyacı ortadan kalkmıştır. Maça sandığı ihtiyacı ve model ihtiyacının ortadan kalkması ile ilk numunenin üretilip müşteriye sevk edilme süresi azalmıştır.

Bu çalışmada bilgisayar destekli yazılımlar ile yapılan incelemeler ve tasarımlar sonrasında 3B yazıcılarda üretilen maçalara motor bloğu dökümü yapılmıştır. Hem konvesiyonel yöntem ile dökülen parçalar hem de 3B yazıcı ile elde edilen maçalara dökülen parçalar üzerinde detaylı incelemeler yapılmıştır. İncelemelerde döküm parçalarının mikroyapısı, sertlik değerleri, çekme dayanımı, aşınma direnci, darbe direnci gibi özellikleri analiz edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında her iki kalıplama yöntemi arasındaki farklar tartışılmış ve 3B yazıcılar ile elde edilen maçalara motor bloğu döküm için optimum tasarım ve proses parametreleri için öneriler getirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

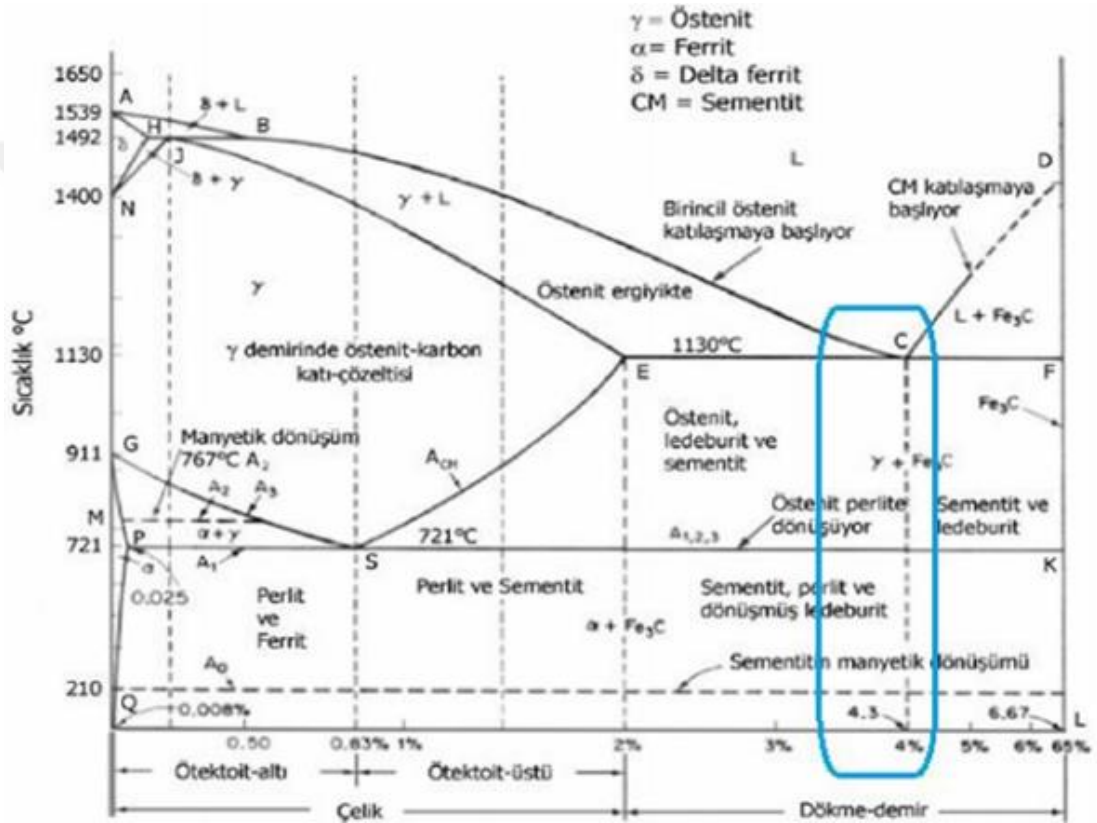
2.1 Dökme Demirlerin Genel Özellikleri

%2.1 ile %6.67 arası karbon içeren demir-karbon alaşımlarına dökme demir denir. Dökme demirler her ne kadar demir ve karbonun alaşımlanması ile elde ediliyor olsa da %1 ile %3 arası Si içerirler. Karbon ve silisyuma ilaveten, dökme demirlerde sıkça gördüğümüz diğer elementler arasında mangany ve az miktarda da olsa fosfor ve kükürt de söylenebilmektedir [1]. Çizelge 2.1’de DIN-EN 1561 standartına göre dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları gösterilmiştir [2, 3].

Çizelge 2.1 : DIN-EN 1561 standartına göre dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları (%) [2, 3].

Alaşım	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mg	% S	% P
EN GJS 400	3,60	2,10	0,20	0,07	0,035	0,008	0,07
	3,70	2,40	0,25	0,08	0,045	0,025	0,08
EN GJS 500	3,60	2,10	0,30	0,07	0,035	0,008	0,07
	3,70	2,40	0,35	0,08	0,045	0,025	0,08
EN GJS 600	3,60	2,10	0,35	0,07	0,035	0,008	0,07
	3,70	2,40	0,45	0,08	0,045	0,025	0,08
EN GJS 700	3,55	2,30	0,35	0,07	0,035	0,008	0,07
	3,65	2,50	0,45	0,08	0,045	0,025	0,08
EN GJL 200	3,35	1,90	0,50	0,10	-	0,09	0,12
	3,40	2,00	0,60	0,12		0,10	0,15
EN GJL 250	3,25	1,90	0,90	0,25	-	0,07	0,08
	3,45	2,20	1,00	0,30		0,10	0,10
EN GJL 300	3,05	1,90	0,90	0,25	-	0,07	0,08
	3,15	2,30	1,00	0,30		0,10	0,10

Dökme demirlerin kimyasal kompozisyonuna bakıldığında çeliklere göre yapısında daha yüksek oranda karbon bulunduğunu görünür. Çeliklerde C oranı %2'nin altındadır. Dökme demirler de ise bu oran daha yüksektir. Bu da dökme demirlerin çeliklere göre daha düşük sıcaklıklarda ergimesini anlamına gelmektedir. Bu sebepten dolayı dökme demirlerin üretim maliyetleri daha düşüktür [4]. Şekil 2.1'de Demir-Sementit (Fe-Fe₃C) denge diyagramında dökme demirlerin bulunduğu aralık ve ötektik katılaşma bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Demir-Sementit (Fe-Fe₃C) denge diyagramı [4].

Dökme demirlerden üretilen parçalar otomotiv endüstrisinde, makine sanayisinde, tarım aletlerinde, inşaat ve madencilik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 5]. Literatürdeki mevcut çalışmalar [1, 4, 5, 6, 7] incelendiğinde dökme demirlerin genel özellikleri özetle aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

- Basma mukavemetleri yüksektir.
- İşlenebilirlikleri iyidir.

- Titreşim söndürme kapasiteleri iyidir. Bu sebeple motor blok üretiminde özellikle gri dökme demirler tercih edilir.
- Aşınma ve korozyon dayanımları yüksektir.
- Çeliklere göre daha düşük yoğunluğa sahiptirler ve termal iletkenlikleri çeliğe göre daha yüksektir.
- Çeliklere göre ergime sıcaklıkları düşüktür.

2.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Dökme demirler bir malzemenin değil bir malzeme sınıfının adıdır [5]. Dökme demirler;

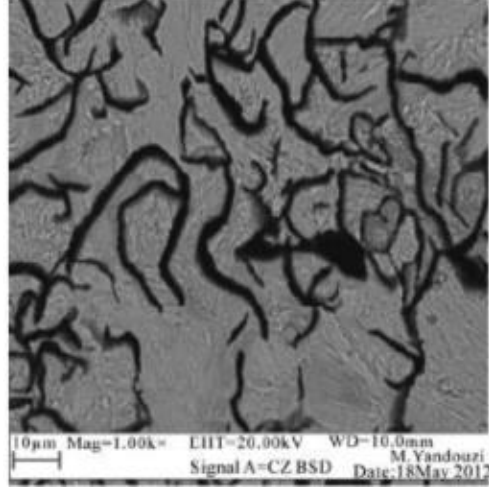
- Grafit yapısına göre
- Kimyasal kompozisyona göre
- Karbonun yapıdaki şekline göre sınıflandırılırlar.

2.2.1 Grafit yapısına göre dökme demirler

Dökme demirler katılaşma sonucunda karbonun yapıdan ayrışması sonucu oluşan grafitlerin biçimsel özelliklerine göre 3 gruba ayrılırlar [5].

2.2.1.1 Lamel grafitli dökme demirler

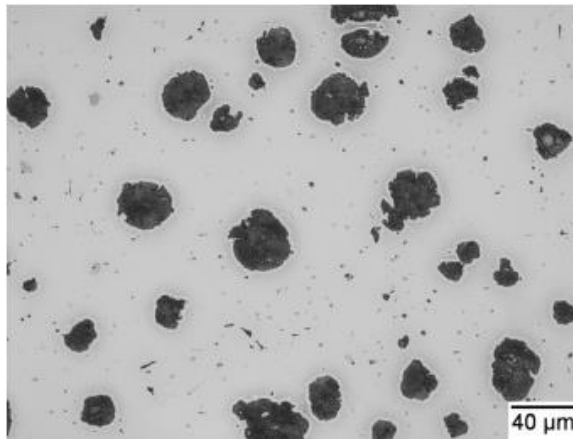
Alaşım içerisinde bulunan karbonların, katmanlı bir grafit yapısı oluşturacak şekilde katılaştığı dökme demir türüne lamel grafitli dökme demir denir [5]. Lamel grafitli dökme demirlerde grafit yaprakları şeklinde ortaya çıkan grafitlerin hem yük taşıyan kesitlerin küçülmesi hem de çentik etkisi yaratmasından dolayı dayanımları düşüktür. Lamel grafitli dökme demirin mikroyapısı mikroskop altında incelendiğinde grafit yaprakları çok net şekilde görülmektedir. Lamel grafitli dökme demirlerin termal iletkenlik kat sayıları yüksektir. Bu sebepten dolayı motor blokların ve fren disklerin dökümünde tercih edilmektedirler [5, 8]. Şekil 2.2' de lamel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Lamel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı [5].

2.2.1.2 Küresel grafitli dökme demirler

Katılaşma esnasında karbonun küresel şekle sahip grafitler halinde meydana geldiği dökme demir türüdür. Grafitlerin küresel şekli alabilmeleri için sıvı metal magnezyum ile tretman işleminden geçirilmektedir. Bu işlem, grafitin yapraksı biçimde büyümesine neden olan oksijen ve kükürt miktarlarını düşürmek için uygulanmaktadır [9]. Magnezyum, sadece oksijen ve kükürtle tepkimeye girebilen bir element olduğundan dolayı değil, aynı zamanda demirle herhangi bir bileşik oluşturmaması ve yüksek denge buhar basıncı sayesinde karıştırmaya gerek kalmadan sıvı içine kolaylıkla yayılabilmesi nedeniyle dökümhaneler tarafından tercih edilmektedir [8]. Şekil 2.3’ te küresel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı gösterilmiştir.



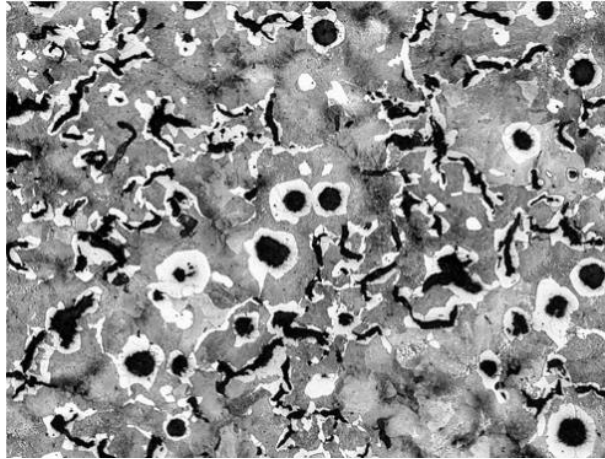
Şekil 2.3 : Küresel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı [8].

Küresel grafitli dökme demirlerin çekme dayanımları ve akma dayanımları lamel grafitli dökme demirlere göre daha yüksektir [9]. Gri dökme demirlerde bulunan lamel grafitler çentik etkisine neden olduğu için, küresel grafitli dökme demirlerin darbe dirençleri lamel grafitli dökme demirlere göre daha yüksektir. Dökme demirlerde ısı iletimini sağlayan grafit fazıdır. Küresel grafitler lamel grafitlere göre daha az yüzey alanına sahip olduğu için, küresel grafitli dökme demirlerin ısı iletim katsayıları lamel grafitli dökme demirlere göre daha düşüktür [5, 8, 9].

2.2.1.3 Vermiküler grafitli dökme demirler

Küresel grafitli dökme demir üretimi esnasında yetersiz magnezyum aşılması ile ortaya çıkan dökme demir türüdür. Mikroyapıya baktığımızda grafit yapısı lamel grafit ve küresel grafit arasındadır. Mikroyapıda ortalama %20 küresel grafit %80 vermiküler grafit bulunur. Ceschini ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [10] 120 mm et kalınlığına sahip parçanın vermiküler grafitli dökme demir ile üretilmesi sonucu mikroyapıda %20 küresellik olacağı, küresel grafitli dökme demir ile üretilmesi sonucu ise %80 küresellik olacağını ileri sürmüşlerdir.

Vermiküler dökme demirlerin lamel grafitli dökme demirlere göre mekanik özellikleri, küresel grafitli dökme demirlere göre de termal iletkenlikleri daha iyidir [11]. Şekil 2.4' te vermiküler grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Vermiküler grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı [11].

Vermiküler dökme demirler otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle motor bloklarının ve motor kafalarının dökümünde tercih edilmektedir. Mukavemetlerinin lamel grafitli dökme demirlere göre daha yüksek olmasından

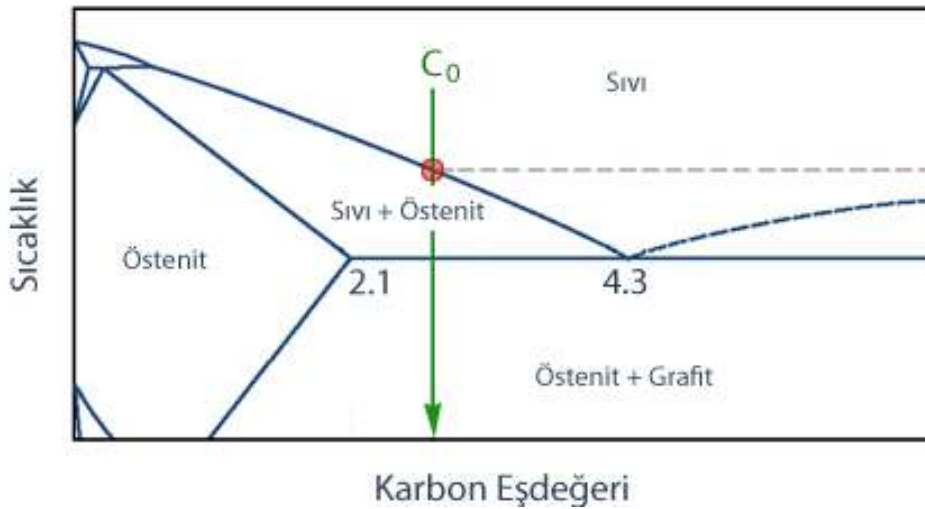
dolayı, yüksek basınçlı yanma odalarının imalatına daha elverişlidirler ve daha düşük emisyon değerlerinin elde edilmesine yardımcı olmaktadır [12]. Ayrıca mukavemet değerleri yüksek olduğundan dolayı daha ince kesitli parçalar tasarlanıp, daha hafif motor bloklarının üretilmesine imkan sağlamaktadırlar [13].

2.2.2 Kimyasal kompozisyonuna göre dökme demirler

Kimyasal kompozisyonlara göre dökme demirler karbon eşdeğerine göre sınıflandırılmaktadır. Dökme demir kompozisyonunun ötektik noktaya göre nerede bulunduğunu değerlendirmek için karbon eşdeğeri kullanılmaktadır [14].

$$CE \text{ (Karbon eşdeğeri)} = (\% C + (\% Si + \% P) / 3)$$

Kimyasal kompozisyonda bulunan elementlerin yüzdeleri dökme demirin likidüs sıcaklığını etkilemektedir [15]. Bu elementler içinde en etkili olanları Si ve P olduğundan dolayı CE hesaplanırken C ve bu iki element üzerinden hesaplama yapılmaktadır. Şekil 2.5'te dökme demirler için karbon eşdeğeri-sıcaklık diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Dökme demirler için karbon eşdeğeri-sıcaklık diyagramı [15]

Dökme demirin karbon eşdeğeri ötektik noktanın (% 4.3) ün altında ise bu tip dökme demirlere ötektik altı dökme demirler denir. Dökme demirin karbon eşdeğeri ötektik noktanın (% 4.3) ün üstünde ise bu tip dökme demirlere ötektik üstü dökme demirler denir. Dökme demirin karbon eşdeğeri 4.3 ise bu tip dökme demirlere ötektik dökme demirler denir [16].

2.2.3 Karbonun yapıdaki şekline göre dökme demirler

2.2.3.1 Beyaz dökme demirler

Dökme demir içinde bulunan karbonların, katılaşma esnasında ayrışmadan tamamen çözünerek yapının içinde kaldığı dökme demir türüne beyaz dökme demir denir. Beyaz dökme demirler kırılgan bir yapıya sahiptirler. Kırıldıklarında, kırılan yüzey parlak ve beyaza yakın bir renktedir [17, 18]. Liu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [19] yüksek bor içeren beyaz dökme demirlerin su verme ısıtma işlemi öncesi 54.5 HRC sertlik değerine, su verme ısıtma işlemi sonrası ise 59,5 HRC sertlik değerine sahip olduklarını ileri sürmüşlerdir.

2.2.3.2 Gri dökme demirler

Sıvı metal içinde çözünmüş olarak bulunan karbon katılaşma esnasında ayrı bir faz olarak ortaya çıkar. Bu durumda karbon grafit halinde lamelli yapıya sahiptir. Bu tür dökme demirlere gri dökme demir denir. Kırıldıklarında, kırılan yüzeyde mat ve gri renk ortaya çıktığı için gri dökme demir ismini almaktadır [5, 20]. Wei ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [21] gri dökme demirlerin çekme dayanımlarının 117 MPa ile 249 MPa arası değişkenlik gösterdiğini, uzama değerlerinin ise 0 ile % 5,2 arası değişkenlik gösterdiğini ileri sürmüşlerdir.

2.2.3.3 Benekli dökme demirler

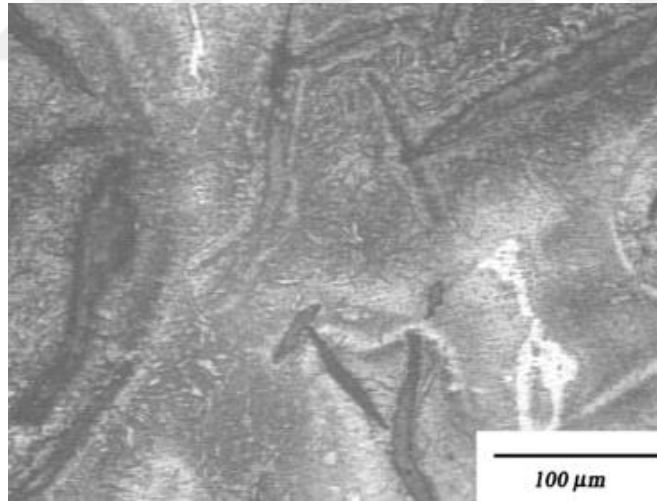
Beyaz dökme demirler hızlı soğuma ile gri dökme demirler ise yavaş soğuma ile oluşurlar. Dökülen parçanın soğuma hızı beyaz dökme demirden gri dökme demire geçişin meydana geldiği bir ana denk gelirse oluşan yapı benekli dökme demir yapısıdır. Bu parça kırıldığında, beyaz zemin üzerinde bulunan gri benekli bir yapı görülmektedir [22]. Şekil 2.6'da benekli dökme demir mikroyapısına örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Benekli dökme demir mikroyapısı [22].

2.2.3.4 Temper dökme demirler

Bu dökme demir türü beyaz dökme demirin ısıtılma tabi tutulmuş halidir. Isıl işlem ile, yapıda tamamen çözünmüş bulunan karbon yapıdan ayrıştırılarak, karbonun bozuk halde ve kümelenmiş şekilde ortaya çıkması sağlanmaktadır [23, 24]. Şekil 2.7’de suverilmiş ve 400 °C’ de temperlenmiş dökme demirin temsili mikroyapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Benekli dökme demir mikroyapısı [24].

2.3 Gri Dökme Demirlerin Genel Özellikleri

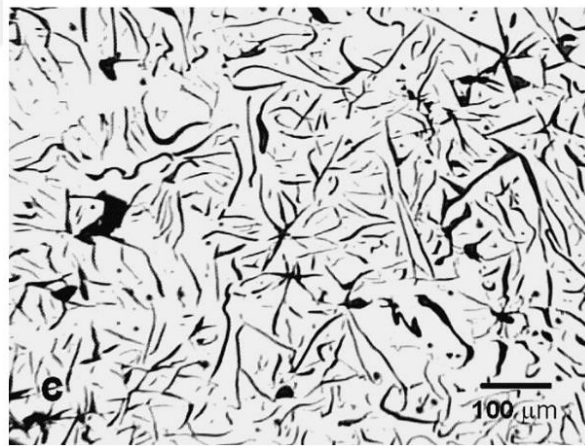
Karbon atomlarının katmanlı olarak, lamel şeklindeki grafitler halinde bulunduğu dökme demir çeşidi olduğu daha önce açıklanmıştı. Bu dökme demirlere kırılma yüzeyleri gri renkte görüldüğü için gri dökme demir denir [25]. Çizelge 2.2’de DIN-

EN 1561 standartına göre gri dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : DIN-EN 1561 standartına göre gri dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları (%) [2].

Alaşım	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mg	% S	% P
EN GJL 200	3,35	1,90	0,50	0,10	-	0,09	0,12
	3,40	2,00	0,60	0,12		0,10	0,15
EN GJL 250	3,25	1,90	0,90	0,25	-	0,07	0,08
	3,45	2,20	1,00	0,30		0,10	0,10
EN GJL 300	3,05	1,90	0,90	0,25	-	0,07	0,08
	3,15	2,30	1,00	0,30		0,10	0,10

Gri dökme demirlerin dökülebilirlikleri iyidir. Kabul edilebilir mukavemet ve iyi işlenebilirlik özelliklerine sahiptirler [5, 20, 25]. Gri dökme demirlerin mikroyapısına baktığımız zaman yapıda çözünmüş olan grafitlerin katmanlar halinde lamelli bir yapıda çözünmüş olduğunu görürüz [26]. Şekil 2.8’ de gri dökme demirlerin mikroyapısına örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : Gri dökme demir mikroyapısı [26].

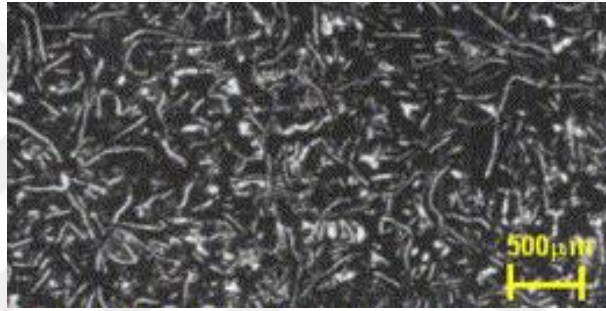
2.4 EN GJL 300 Alaşımının Genel Özellikleri

EN GJL 300 alaşımı, minimum 300 MPa çekme dayanımına sahip, tamamen perlitik yapıdaki lamel grafitli dökme demir alaşımıdır. Baicchi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [6] EN GJL 300 alaşımının mikroyapısını incelemişler ve tamamen perlitik yapıya sahip olduğunu göstermişlerdir. EN GJL 300 alaşımı yüksek mukavemet ve

yüksek sertlik değerlerine sahiptir [7]. EN GJL 300 alaşımının mukavemeti diğer gri dökme demirlere göre daha yüksek olduğundan dolayı,transmisyon kutusu ve dişli kutusu, en önemlisi de motor blokları gibiyüksek mukavemet istenen parçaların dökümünde tercih edilmektedir [6, 7].

EN GJL 300 alaşımının likidüs sıcaklığı yaklaşık 1197 °C, solidüs sıcaklığı ise yaklaşık 1152 °C dir [4].Guesser ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [27] EN GJL 300 alaşımının 100 °C’ deki termal iletkenliği 47,4 W/K.m, 200 °C’ deki termal iletkenliği ise 46,4 W/K.m olduğunu ve gri dökme demirlerin termal iletkenliklerinin vermiküler grafitli dökme demirlere göre daha yüksek olduğunu ileri sürmüşlerdir.

EN GJL 300 alaşımları % 98 ile % 100 arası perlitik yapıya sahiptirler. Şekil 2.9’ da EN GJL 300 alaşımının temsili mikroyapısı gösterilmiştir [6].



Şekil 2.9 : EN GJL 300 alaşımı temsili mikroyapısı [6].

EN GJL 300 alaşımının kimyasal kompozisyonuna baktığımızda, içeriğinde karbon ve silisyuma ek olarak Mn, Cr, S ve P elementlerini de bulundurduğunu görülmektedir [2]. Çizelge 2.3’ te DIN-EN 1561 standartına göre EN GJL 300 alaşımının kimyasal kompozisyonu gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 : DIN-EN 1561 standartına göre EN GJL 300 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%) [2].

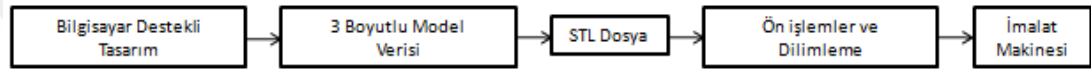
Alaşım	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mg	% S	% P
EN GJL 300	3,05	1,90	0,90	0,25	-	0,07	0,08
	3,15	2,30	1,00	0,30		0,10	0,10

2.5 Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat yönteminin temelleri 1980’li yıllara dayanmaktadır. 3D System firması tarafından üretilen SLA-1 cihazının ilk 3 boyutlu yazıcı sistemi olduğu bilinmektedir [28]. Eklemeli imalat son yıllarda önem kazanmış modern imalat

yöntemlerinden biridir. Ekelemeli imalat 3 boyutlu modelin, geometrik verileri kullanarak inşa edilecek tozların katman katman eklenmesiyle elde edildiği imalat şeklidir. Eklemeli imalat yöntemleri ile karmaşık geometriye sahip parçalar hızlı bir şekilde elde edilmektedir [29].

Eklemeli imalat yönteminde üretilmesi düşünülen model stl uzantılı dosyaya dönüştürülmektedir. Stl dosyada modelin varsa hataları düzeltilir, üretilecek olan parçanın tablaya yerleşimi ve inşa yönü belirlenmektedir. Daha sonra bu tür işlemlerden geçen model katmanlara ayrılmaktadır. Katmanlara ayrı hazır hale getirilerek, üretim yapılacak olan makineye gönderilmektedir. Eklemeli imalat yönteminde işlem veri akışı Şekil 2.10’ da gösterilmiştir [30].



Şekil 2.10 : Eklemeli imalat veri akışı [30].

Eklemeli imalat yöntemlerinde plastik malzemler, seramikler, kompozitler, alüminyum ve alaşımları, titanyum ve alaşımları ile çelikler kullanılabilir. Çizelge 2.4’ te eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 : Eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması [31].

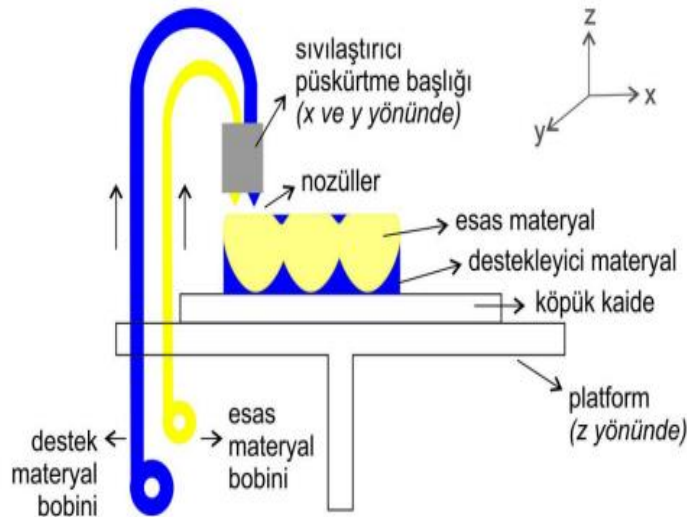
Yöntem	Çalışma Esası	Kullandığı Malzeme	Çözünürlük	Mukavemet	Pürüzlülük
SLS	Tozun lazer ile sinterlenmesi	Poliamid, polistren, karbon fiber, paslanmaz çelik, nikel	Zayıf	İyi	Zayıf
SLA	Fotopolimer malzemenin UV ışını ile katılaştırılması	Reçine bazlı malzemeler, akrilik, epoksi	İyi	Orta	İyi
FDM	Ekstrüzyon ile yığma tekniği	Poliamid, polikarbonat, polietilen,	Orta	İyi	Orta
3DP	Bağlayıcı ile toz bağlama ve kurutma	Yüksek permormanslı kompozit	Zayıf	Zayıf	Zayıf

Eklemeli imalat yönteminin tasarımında esneklikler bulunmaktadır [31]. Çok karmaşık şekilli ve hacim kalıpcılığı ile üretilmeyecek olan, ters açılarının bulunduğu parçalar üretilmektedir. Eklemeli imalat yöntemleri otomotiv, havacılık ve

savunma sanayi, medikal sektörü gibi çok farklı sektörlerdeki parçaların üretiminde kullanılabilmektedir [32]. Eklemeli imalat yöntemlerinden bazılarına ve bu yöntemlerde kullanılan cihazlara aşağıda değinilmiştir.

2.5.1 SLS (Seçmeli lazer sinterleme) yöntemi

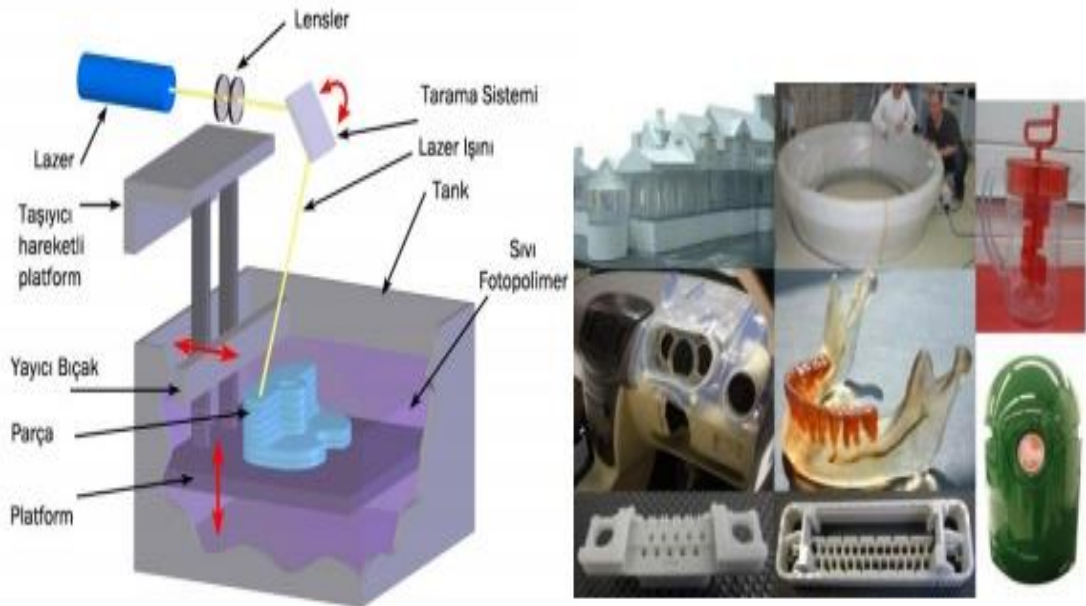
Endüstride yaygın olarak kullanılan 3B baskı yöntemidir. SLS yönteminde toz malzemeler kullanılarak lazer ısı kaynağı yardımıyla sinterleşme sonucu 3 boyutlu parçalar üretilmektedir. Sinterleşme özelliğine sahip inşa malzemesi olan tozlar düz yüzeye sahip plaka üzerine yayılmaktadır. Daha sonra lazer ısı kaynağı, tozlar üzerinde gezerek seçili olan alanları taramakta ve bunun sonucunda ilk katman inşa edilmiş olmaktadır. İlk katman oluşturulduktan sonra platform katman kalınlığı kadar aşağıya inmekte ve ikinci katman için tekrardan toz serilmektedir. Lazer ısı kaynağı bu tozların üzerinde gezmekte ve seçili olan alanları taramaktadır. Bu işlem 3 boyutlu parça şekilleninceye kadar devam etmektedir. 3 boyutlu parça oluştuktan sonra platform üzerinden alınmaktadır. Platform üzerinden alınan parça fırçalar ve vakumlu süpürge yardımı ile temizlenmektedir. SLS yönteminde poliamid, karbon fiber, titanyum alaşımları, paslanmaz çelik ve karbon fiber gibi malzemeler kullanılabilmektedir [31, 33, 34]. Şekil 2.11’ de SLS sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : SLS sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar [35].

2.5.2 SLA (Stereolitografi) yöntemi

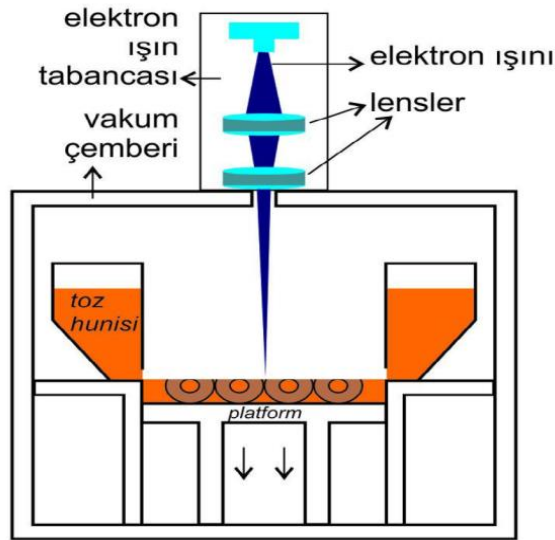
SLA, Charles Hull tarafından 1988 yılında piyasaya çıkarılmış ilk hızlı prototipleme proseslerinden biridir [31]. Bu proseste fotopolimer sıvı reçine bir tankın içine doldurulmaktadır. Hareketli bir platform sıvı reçinenin hemen altında kalacak şekilde konumlandırılmaktadır. Tarama sistemi reçine üzerinde gezdirilemekte ve bilgisayar ortamında belirlenmiş alanları UV lazer ile katılaştırmaktadır. Katman tamamlandığı zaman, hareketli platform katman kalınlığı kadar aşağıya doğru inmektedir. Her katmanda aynı işlemler uygulanmakta ve katmanlar birbiri üzerine inşa edilmektedir. Sonucunda 3 boyutlu parça elde edilmiş olmaktadır [31, 36, 37]. Şekil 2.12’ de SLA sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : SLA sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar [31].

2.5.3 FDM (Eriyik yığma modelleme) yöntemi

Bu yöntemde termoplastik malzeme bir başlık içerisinden ergitilerek plakanın üzerine akıtılmaktadır. Böylece bir katman elde edilmiş olmaktadır [31]. Şekil 2.13’te FDM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar gösterilmiştir.

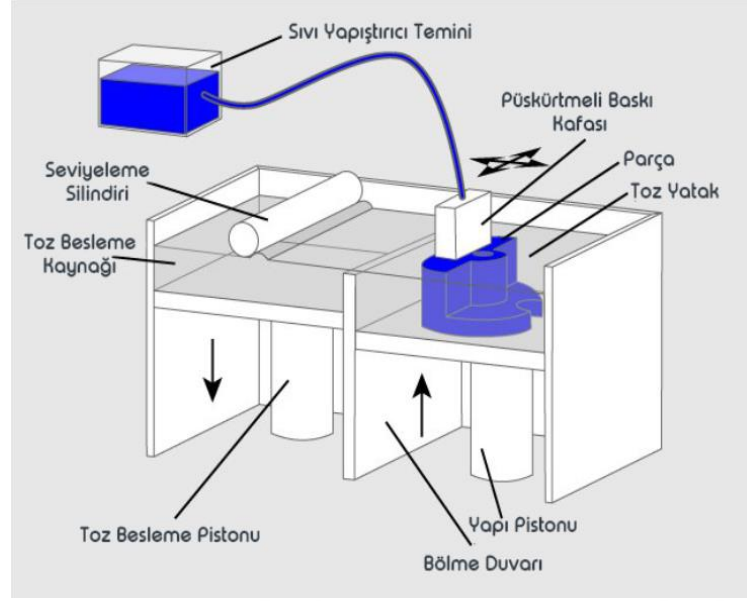


Şekil 2.13 : FDM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar [35].

Katman elde edildikten sonra platform aşağıya doğru hareket etmektedir. Daha sonra başlık üzerinden ergimiş plastik bir önceki katmanın üzerine akmakta ve hemen onun üzerinde katlaşıp ve yapışmaktadır. Bu şekilde 3 boyutlu parça katmanlar halinde tamamlanmaktadır [38]. Bu yöntem ile karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi mümkündür. Genellikle plastik malzemeler kullanılmaktadır [39, 40].

2.5.4 Bağlayıcı ile katmanlı imalat yöntemi

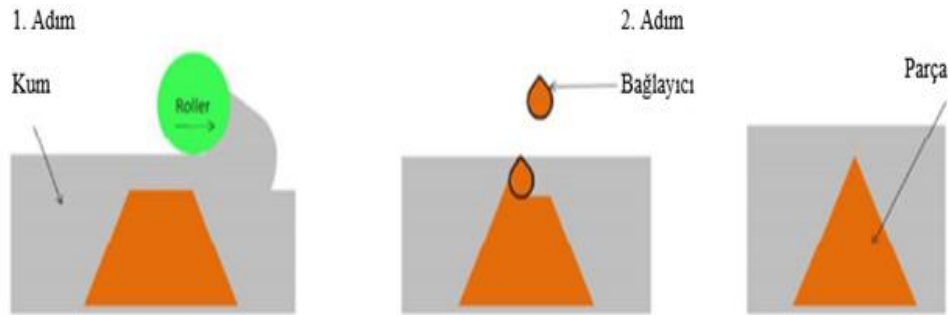
Bağlayıcı ile katmanlı imalat yönteminde bağlayıcılar kullanılarak katmanlı imalat yapılmaktadır. İlk olarak hareketli platform üzerine toz malzeme serilmektedir. Bu toz malzeme kum, metal, seramik veya kompozit olabilmektedir. Platforma serilen toz malzemenin üzerine bağlayıcı püskürtülmektedir. Bu bağlayıcı STL datada belirlenmiş alanlara püskürtülmektedir. Her bir katman yazıldıktan sonra platform aşağıya inmekte ve üzerine yeni bir katman yazılmaktadır. Bu işlem üretilmesi hedeflenen parça ortaya çıkana kadar devam etmektedir [41, 42]. Şekil 2.14’ te bağlayıcı ile katmanlı imalat yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilen parçalar gösterilmiştir.



Şekil 2.14 : Bağlayıcı ile katmanlı imalat sisteminin çalışma prensibi [43].

2.5.5 Döküm sektöründe eklemeli imalat

Son yıllarda eklemeli imalat yöntemleri her sektörde kendine yer bulmaya başlamıştır. Döküm sektöründe bu sektörlerin başında gelmektedir [44]. Döküm sektöründe kullanılan 3B (3 boyutlu) yazıcılar binder jetting yöntemine göre çalışmaktadır. Döküm sektöründe kullanılan 3B yazıcılarda maça ve kalıp üretimi yapılmaktadır. Katman katman serilen kumlar bağlayıcılar ile birbirine bağlanmaktadır. Bir kat kum bir kat bağlayıcı olacak şekilde üretim yapılmaktadır [44, 45]. Şekil 2.15’ te bağlayıcı ile katmanlı üretim yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.15 : Bağlayıcı ile katmanlı üretim yöntemi [44].

Döküm sektöründe üretilen parçaları incelediğimizde karmaşık geometriye sahip parçaların üretildiğini görmekteyiz. Bu karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi için

kum kalıplama yöntemi seçilmektedir. Ayrıca bu karmaşık geometrilerin oluşturulabilmesi için maçalara ihtiyaç duyulmaktadır [46]. Her bir maçanın üretimi için maça sandığına ihtiyaç duyulmaktadır. 3B (3 boyutlu) yazıcılar sayesinde maça sandıkları ve model ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. 3B yazıcılar maça sandığı ve model imalatı yapılmadan, bunların imalatında geçecek süreyi kaybetmeden hızlı şekilde prototip üretimi gerçekleştirmeyeve müşteriye daha kısa sürede numune vermeye imkan sunmaktadır [47, 48]. Şekil 2.16' da 3B yazıcılarda üretilmiş olan kum kalıbı gösterilmiştir.



Şekil 2.16 : 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş kum kalıp [45].

Upadhyay ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [49] 3B yazıcıların ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı şu aşamada büyük ölçekli dökümhanelerin sahip olabileceğine değinmişlerdir. Karmaşık geometriye sahip parçaların üretimine imkan verdiği ve tasarım kısıtlamalarının olmadığını ileri sürmüşlerdir. Hızlı numune üretimi açısından avantajlı olduğuna değinmişlerdir. Fakat üretim hacminin seri kalıplama yöntemlerine göre daha düşük olduğundan bahsetmişlerdir. Ayrıca şu aşamada 3 boyutlu yazıcının iş kutusunun boyutlarının sınırlı olduğu ve çok büyük kalıplar imal edilmek istenirse birkaç iş kutusunda üretilip birbirine montaj edilmesi gerektiğini açıklamışlardır.

2.6 Döküm Simülasyonu

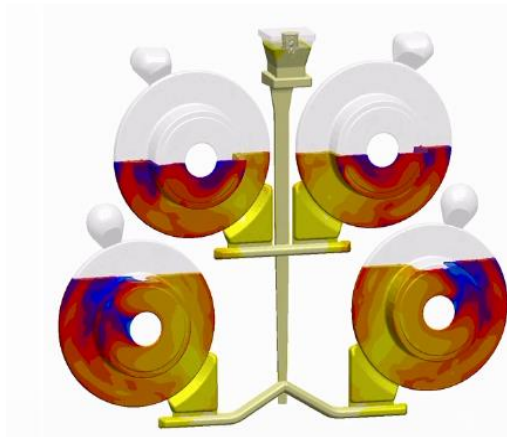
Döküm prosesinde besleyici ve yolluk sistemini doğru tasarlamak sağlam parça üretimi açısından çok önemlidir. Bu tasarımların doğru yapılabilmesi için döküm simülasyon programları kullanılmaktadır. Döküm simülasyon programları, döküm parçanın üretimi esnasında oluşabilecek hataların deneme yanılma yoluyla bilgisayar

ortamında tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece yüksek kaliteli parçalar üretilmektedir [50].

Döküm simülasyon programları ile katılaşma, dolum ve stress simülasyonları yapılabilmektedir. Bu simülasyonlar ile çekinti değerleri, sıcaklık dağılımları, soğuk birleşme problemleri, akış hızları, kalıcı gerilmeler gibi parametreler ve döküm hataları tespit edilebilmektedir [51, 52].

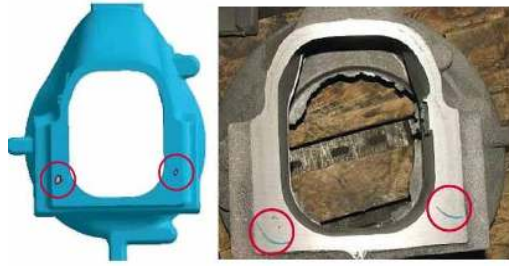
Dökme demirlerin dökümünden önce simülasyon programları kullanılarak proses ve tasarım parametrelerini belirlemek büyük avantajlar sağlamaktadır. Doğru belirlenen proses ve tasarım parametreleri dökümhanelerdeki deneme döküm sayısını azaltmakta, ıskarta oranını düşürmektedir [53]. Iqbal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [54] dolum ve katılaşma esnasında kalıp içersinde oluşabilecek hatalardan bahsetmişlerdir. Ayrıca dökümhanelerin simülasyon yardımı ile kompleks geometriye sahip kalıpların dizaynlarını optimize ettikleri zaman, kalıplama ve deneme maliyetlerinden tasarruf edeceklerini ileri sürmüşlerdir.

Simülasyon programları ile döküm parçalarında temiz yüzey kalitesi ve minimum empürite oranı elde etmeyi sağlayacak yolluk sistemi tasarımları yapılabilmektedir [53]. Kwon ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [55] simülasyon programı yardımıyla doğru yolluk tasarımı yaptıklarını ve kalıp dolumunu hatasız gerçekleştirerek döküm hatalarını engellediklerini ileri sürmüşlerdir. Şekil 2.17' de fren diski için tasarlanmış yolluk sisteminin dolum anındaki görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.17 : Fren diski için tasarlanmış yolluk sisteminin dolum anındaki görüntüsü [53].

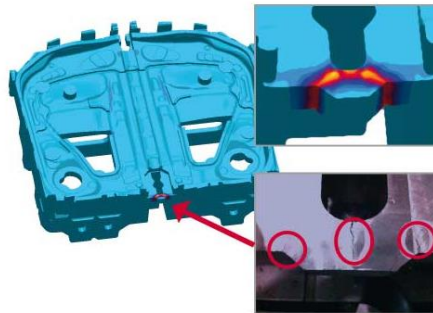
Simülasyon programları ile optimum besleyici boyutu belirlenebilmekte ve muhtemel çekinti hataları en aza indirgenebilmektedir. Parçanın termal modülü belirlenip ona göre doğru besleyici seçimi sağlanabilir [53]. Choudhari ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [56] simülasyon programı yardımıyla parçanın son katılacak bölgesini tespit edip, bu bölgeye besleyici konumlandırmışlar ve döküm boşluğu riskini en aza indirdiklerini göstermişlerdir. Şekil 2.18’ de simülasyon sonucu öngörülen çekinti riski ile döküm parçada gerçekleşen çekinti hatası gösterilmiştir.



Şekil 2.18 : Simülasyon sonucu öngörülen çekinti riski ile döküm parçada gerçekleşen çekinti hatası gösterilmiştir [53].

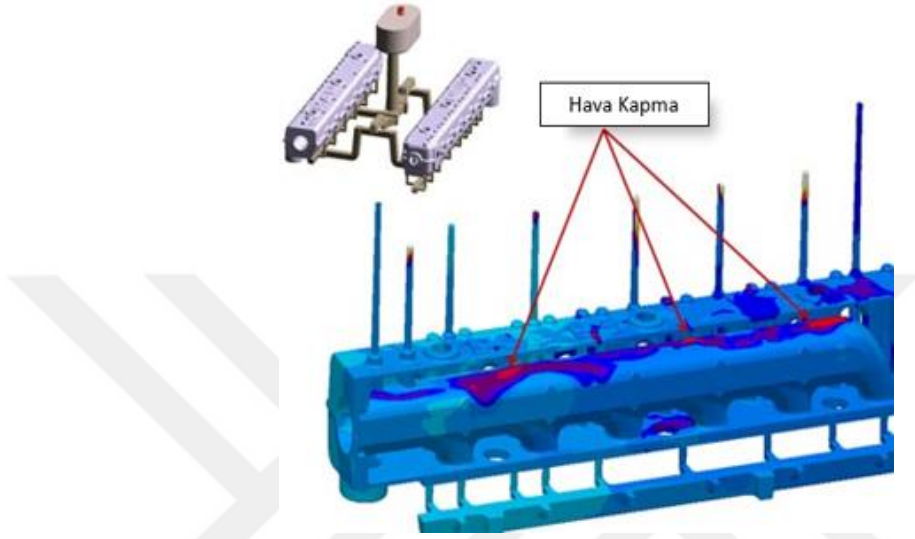
Simülasyon programları ile optimum proses parametreleri belirlenerek döküm parçanın istenen mekanik değerlere ulaşması sağlanabilmektedir. Sertlik değerleri, çekme dayanımları gibi mekanik özellikler tespit edilebilmektedir [53].

Simülasyon programları ile parçaların termal modülleri belirlenebilmektedir. Kalıntı gerilmeleri ve soğuk çatlak oluşabilecek bölgeler tespit edilebilmektedir. Norouzi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [57] tasarladıkları test numunesindeki sıcak yırtılma ve kalıntı gerilme riski olan bölgeleri simülasyon programı yardımıyla tespit etmişlerdir. Şekil 2.19’ da simülasyon sonucu ile öngörülen soğuk çatlak riskleri ile döküm parçada gerçekleşen soğuk çatlak problemi gösterilmiştir.



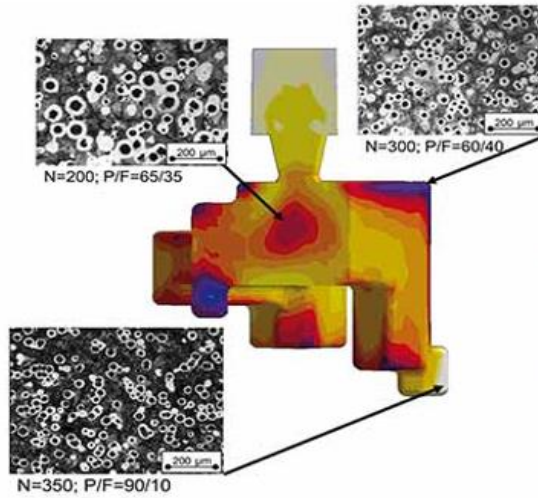
Şekil 2.19 : Simülasyon sonucu ile öngörülen soğuk çatlak riskleri ile döküm parçada gerçekleşen soğuk çatlak problemi gösterilmiştir [53].

Döküm simülasyon programları ile kalıbın dolumu izlenebilmektedir. Dolum esnasında türbülans olup olmadığı, hava kapma meydana gelip gelmediği ve bunun sonucunda gaz boşluğu riski olup olmadığı tespit edilebilmektedir [53]. Şekil 2.20’ de simülasyon sonucuna göre hava kapması riski olan bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 2.20 : Simülasyon sonucuna göre hava kapması riski olan bölgeler gösterilmiştir [53].

Simülasyon programları ile sfero parçalarda bölgesel küresellik analizi ve mikroyapı analizi yapılabilmektedir. Şekil 2.21’ de sfero parçada bölgesel perlit yüzdesi analizi gösterilmiştir.



Şekil 2.21 : Bölgesel perlit yüzdesi analizi [53].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deneysel Çalışmaların Planlanması

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ilk önce maça tasarımları ve yolluk sistemi tasarımları yapılarak başlanmıştır. Tasarlanan yolluk sistemi ile döküm simülasyonları yapılmıştır. Döküm simülasyonları ile elde edilen dolum ve katılaşma sonuçlarına göre optimum proses ve tasarım parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler ile dökümler yapılmıştır. Döküm parçalardan elde edilen numuneler ile çekme testi, çentik darbe testi, sertlik ölçümleri, aşınma testi, mikroyapı analizleri yapılmıştır. Yaş kum kalıba yapılan dökümlerden ve reçineli kum kalıba yapılan dökümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.2 Döküm Simülasyon Çalışmaları

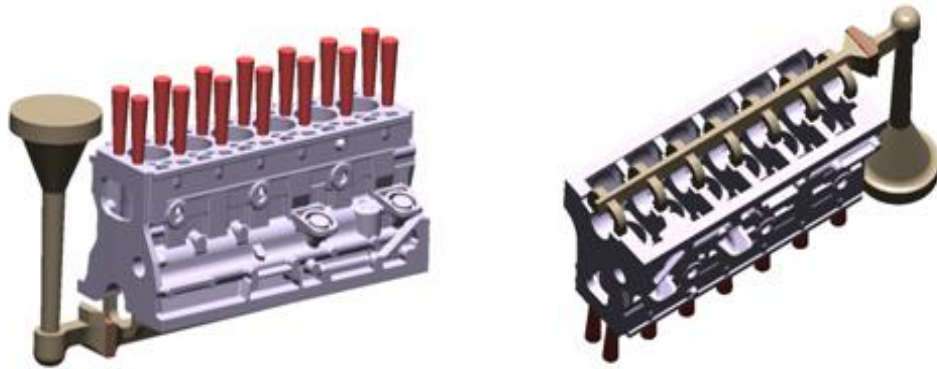
3.2.1 Simülasyonda kullanılan bilgisayar ve programlar

Deneysel çalışma kapsamında yolluk sistemi ve maçaların tasarımı Siemens NX CAD programı kullanılarak yapılmıştır. NX programında tasarlanan yolluk sistemi bileşenleri, simülasyon çalışmaları için stl formatında Magmasoft yazılımına aktarılmış ve Magmasoft döküm simülasyonu yazılımı kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Magmasoft, döküm tasarımı ve optimizasyonu için kullanılan bir yazılımdır. Bu yazılım, kalıp doldurma, katılaştırma ve soğutmanın daha iyi anlaşılmasını sağlayarak döküm parça kalitesinin ve proses zincirinin tahminini temsil eder ve ortaya çıkan dökümlerin mekanik özelliklerinin, termal gerilmelerinin ve bozulmalarının kantitatif tahminine izin verir. Simülasyon, bir döküm bileşenin kalitesini üretim başlamadan önce doğru bir şekilde tanımlar ve döküm yöntemi gerekli bileşen özelliklerine göre tasarlanabilir.

Magmasoft yazılımının kullanıldığı iş istasyonunda 512 GB ram, 8 GB ekran kartı bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında 10 versiyon simülasyon yapılmış ve simülasyonlar toplam 75 saat sürmüştür.

3.2.2 Simülasyonların yapılması

Sağlam döküm parça elde edebilmek için proses ve tasarım parametrelerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı ilk olarak döküm simülasyon yazılımı ile bu parametreler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan simülasyonlarda dolum süresi ve sıcaklık parametreleri üzerinde çalışılmıştır. Gaz çıkıcılarını kullanıp kullanmamanın gaz boşluğuna etkileri incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarında yolluk girişlerindeki sıvı metal hızları, dolum sonunda parçadaki sıcaklık dağılımları, gaz boşluğu hataları, kum yanması ve çekme boşluğu hataları değerlendirilmiştir. 3 boyutlu yazıcılarda üretilcek motor bloğunun simülasyon sonuçları ile konvansiyonel yöntem ile üretilen motor bloğunun simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.1’ de 3 boyutlu yazıcılarda üretilcek olan motor bloğu ve yolluk sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : 3 boyutlu yazıcılarda üretilcek olan motor bloğu ve yolluk sistemi.

Proses ve tasarım parametrelerinin doğru belirlenmesi amacıyla tasarlanan yolluk sistemi ile toplam 10 versiyon simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu yapılan simülasyonlarda seçilen alaşım (EN GJL 300) ve seçilen kalıp kumu (furan) sabit olup, versiyonlardaki diğer değişkenler Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

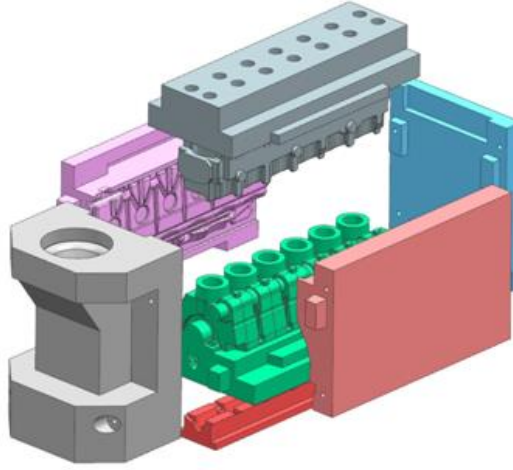
Çizelge 3.1 : Simülasyon parametrelerindeki değişkenler.

Versiyon	Sıcaklık (°C)	Dolum Süresi (s)	Gaz Çıkıcı
1	1400	22	Yok
2	1400	22	Var
3	1360	22	Var
4	1440	22	Var
5	1400	15	Var
6	1360	15	Var
7	1440	15	Var
8	1400	30	Var
9	1360	30	Var
10	1440	30	Var

3.3 Dökümlerin Gerçekleştirilmesi

3.3.1 Maçaların 3b yazıcıda yazdırılması ve kalıp oluşturulması

Yapılan simülasyonlar sonucunda belirlenen yolluk sistemi tasarımı, gaz çıkıcıları ve dökülecek olan parçanın 3 boyutlu datası kullanılarak maçaların tasarımına başlanmıştır. Maçaların tasarımında 3 boyutlu bilgisayar destekli tasarım programları kullanılmıştır. Maçaların tasarımları yapılırken maçaların mümkün olduğunca hafif olması göz önünde bulundurulmuştur. Fakat hafif olması yönünde tasarım yapılırken maçanın içine dökülecek olan sıvı metalin uygulayacağı basınca da dayanıklı olması göz ardı edilmemiştir. Bu nedenle mümkün olduğunca ergonomik maça tasarımı için çalışılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda, üretilmesi planlanan motor bloğunun maça paketi Şekil 3.2’ de görüleceği gibi 7 farklı maçanın 3 boyutlu yazıcıda yazdırılması ve bu maçaların montaj edilmesi sonucunda oluşturulmuştur.



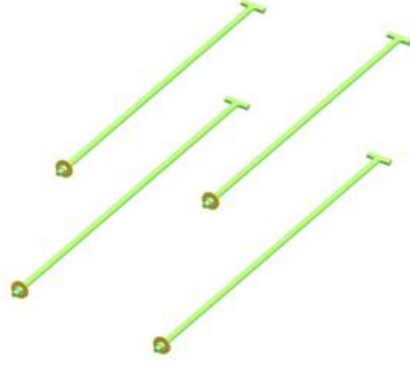
Şekil 3.2 : Tasarımı yapılan maçalar.

Maçaların yazdırılmasında kullanılan yazıcı, ExOne firmasının S-Max Pro modeli olan 3 boyutlu kum yazıcısıdır. Bu yazıcının iş kutusu ölçüleri 1800x1000x700 mm'dir. İş hacmi 1260 litre ve yazdırma hızı 120 l/s' dir. Katman kalınlığı 0.26-0.38 mm arasındadır. Bu yazıcıda bağlayıcı sistemi olarak furan bağlayıcılar ve inorganik bağlayıcılar kullanılabilir. Bizim yazdırdığımız maçalarda furan bağlayıcılar kullanılmıştır. Şekil 3.3' te maçaların yazdırılmasında kullanılan 3 boyutlu kum yazıcı gösterilmiştir.



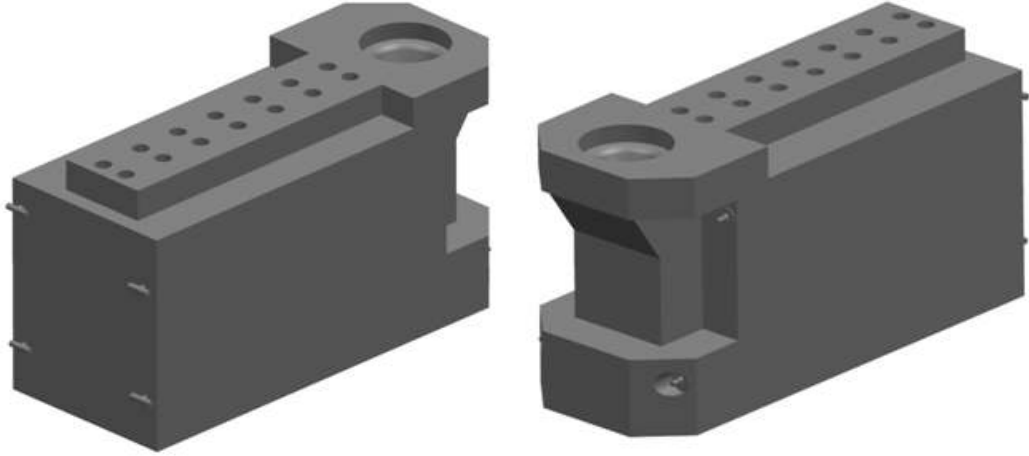
Şekil 3.3 : Maçaların yazdırılmasında kullanılan 3B kum yazıcı.

7 farklı maça 3 boyutlu yazıcıda yazdırıldıktan sonra 4 adet bağlama demiri ile birbirlerine montaj edilmişler ve kalıp haline getirilmişlerdir. Şekil 3.4' te maçaların montajının yapıldığı bağlama demirleri ve bağlantı elemanları gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Maçaların montajında kullanılan bağlama demirleri ve bağlantı elemanları.

Montajı yapılan maçalar kalıp halini almış ve döküme hazır duruma gelmiştir. Döküme geçilmeden önce maçaların montajı kontrol edilmiştir. Montaj esnasında oturmayan bölgelerin, birbirini karşılamayan bölgelerin olup olmadığına bakılmıştır. Su terazisi ile son montaj halinin dengede olup olmadığı test edilmiştir. Şekil 3.5'te maçaların montaj edilmiş hali gösterilmiştir.

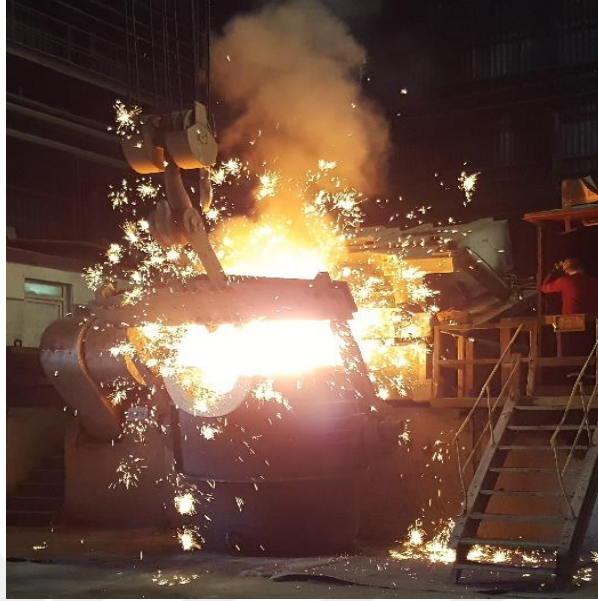


Şekil 3.5 : Maçaların montaj edilmiş hali.

3.3.2 Sıvı metalin ergitilmesi ve döküm

Dökülecek olan motor bloklarının ağırlığı 175 kg'dır. Yaş kum kalıba dökülecek olan motor bloğu, yolluk sistemi ve gaz çıkıcıları ile birlikte toplam brüt ağırlığımız 225 kg, reçineli kum kalıba dökülecek olan brüt ağırlığımız ise 220 kg gelmektedir. Bu nedenle indüksiyon ocağında 500 kg EN GJL 300 alaşımı ergitilmiştir. Ergimiş metal

indüksiyon ocağından 2 farklı döküm potasına 250 kg olacak şekilde alınmıştır. Şekil 3.6' da sıvı metalin indüksiyon ocağından döküm potasına alınması gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Ergitilmiş metalin indüksiyon ocağından döküm potasına alınması

Döküm potasında iken sıvı metalin curufu temizlenmiş ve arkasından sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Şekil 3.7'de sıvı metalin sıcaklık ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Sıvı metalin sıcaklığının ölçülmesi

Curufu temizlenmiş ve sıcaklık ölçümü yapılmış olan sıvı metal döküme hazır hale getirilmiştir. Reçineli kum kalıba ve yaş kum kalıba 1400 °C sıcaklığındaki sıvı metal

dökülmüştür. Döküm süresi simülasyon programında hesaplandığı gibi 22 s olarak ölçülmüştür. Şekil 3.8’ de sıvı metalin döküm anı gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : Sıvı metalin kalıba dökülmesi.

3.4 Mikroyapı İncelemeleri

Dökülen parça üzerinden alınan mikroyapı numunesi sırasıyla 240, 600 ve 1000 nolu zımpara kağıdı ile zımpara yapıldıktan sonra alüminyum oksit toz ile parlatılmışlardır. Daha sonra %40’lık nitrik asit ve etil alkol karışımı ile 30 s dağlanmıştır. Hazırlanan numune mikroskop altında 100X büyütmede incelenmiştir. Yapılan görüntülemelerde grafitlerin yapısı incelenmiş ve perlit oranı hesaplanmıştır.

Mikroyapı incelemesi gerçekleştirmek için hazırlanan numuneler Şekil 3.9’ da gösterilen optik mikroskop ile incelenmiştir. Bu mikroskop Omnimet görüntü analiz sistemi ile entegre çalışmaktadır. Bu mikroskopta 3X büyütmeden 100X büyütmeye kadar inceleme yapılabilir.



Şekil 3.9 : Mikroyapı incelemesi yapılan optik mikroskop.

3.5 Mekanik Testler

3.5.1 Mekanik testlerde kullanılan cihazlar

Çekme testi;

Çekme testlerinin gerçekleştirilmesi için Şekil 3.10’ da görülen Shimadzu markalı çekme cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz Trapezium-x ve DVE 2 yazılımları ile entegre çalışmaktadır. Numuneyi kavramak için alt ve üst çeneler bulunmaktadır. Numune çenelere bağlandıktan sonra cihaza çalışma komutu verilmekte ve çekmeye dair verileri test sonrası vermektedir.



Şekil 3.10 : Çekme testi yapılan Shimadzu markalı cihaz.

Çentik darbe testi;

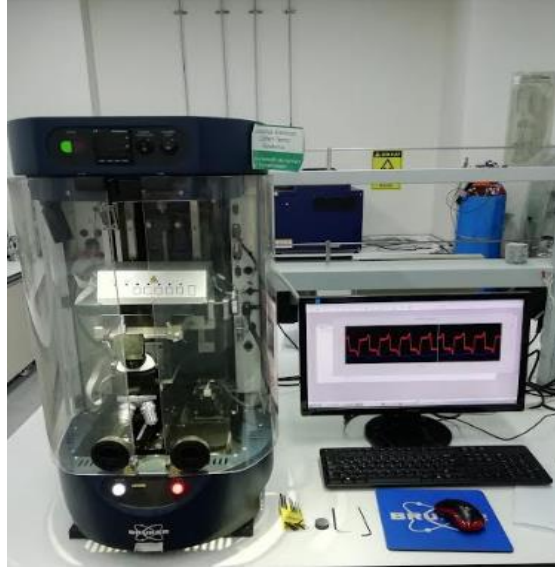
Çentik darbe testlerinin yapılabilmesi için şekil 3.11’ de gösterilen ALŞA ZBC 300J markalı cihaz kullanılmıştır. Bu cihaz ile V ve U çentik açılmış numuneler test edilebilir. Cihaz önce kendi içinde kalibre edilmekte ve sonrasında 5.5 m/s hızla 1600 açı ile düşen çekiç kol vasıtasıyla oluşan enerjiler ölçülebilmektedir.



Şekil 3.11 : Çentik darbe testi yapılan ALŞA ZBC 300J markalı cihaz.

Aşınma testi;

Aşınma testleri Şekil 3.12’ de gösterilen Burker UMT 2 markalı cihaz ile yapılmıştır. Cihaz diğer aşınma testi cihazlarına göre daha hassastır. Bu cihaz ile 4 N yük ve 10mm/sn hızla aşınma gerçekleştirilebilmektedir. Numuneler cihaza uygun olarak hazırlanmakta ve tablaya manuel olarak yerleştirilmektedir. Bilgisayar kontrolünde numune yaklaştırılan aşınma bilyesi ile işlem gerçekleştirilmektedir. Sonuçlar otomatik olarak alınmaktadır.



Şekil 3.12 : Aşınma testi yapılan Bruker UMT 2 markalı cihaz.

Sertlik testi;

Sertlik ölçümleri brinell cinsinden yapılmıştır. 10 mm çapa sahip bir bilyanın, 3000 kg'lık bir yük ile, 10 saniye batırılması ve daha sonra da bu izin çapının okunması ve iz çapına karşılık gelen sertliğin saptanması şeklinde yapılır. Sertlik ölçümleri Şekil 3.13' te gösterilen cihaz ile yapılmıştır.

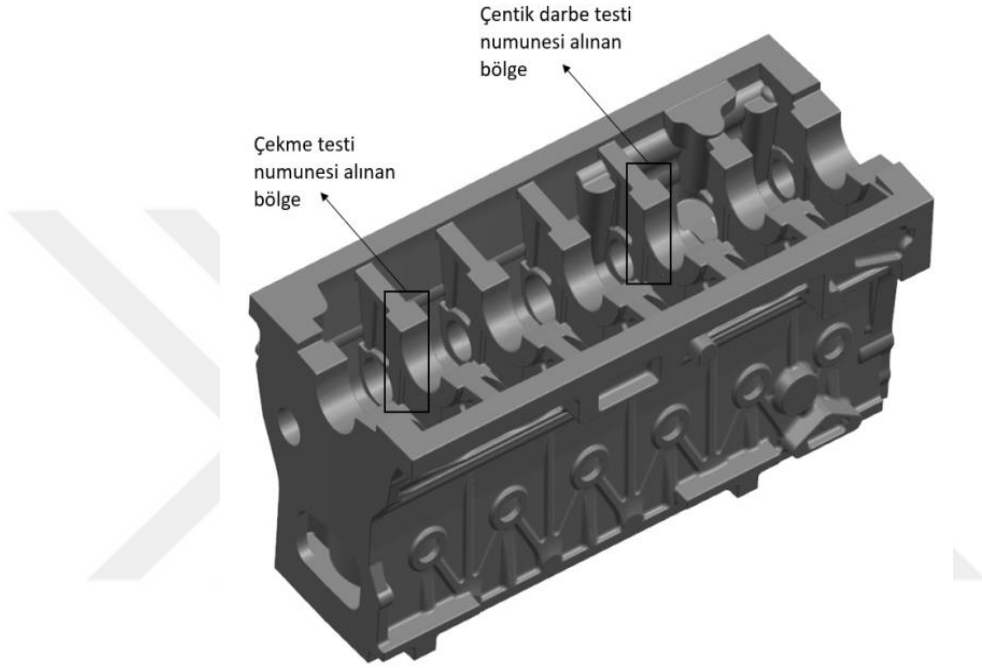


Şekil 3.13 : Sertlik ölçümlerinin yapıldığı cihaz.

3.5.2 Mekanik testlerin gerçekleştirilmesi

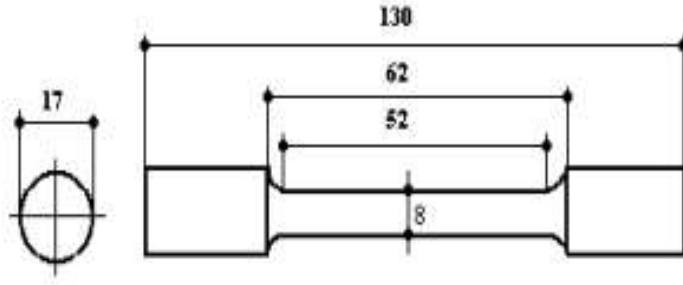
Çekme testi;

Tez kapsamında üretilen motor bloklarının mekanik özelliklerini incelemek amacıyla yapılacak olan çekme testleri ve çentik darbe testleri için gerekli olan test numuneleri motor bloğun kep bağlama bölgeleri üzerinden alınmıştır. Şekil 3.14’ te çekme testi numuneleri ve çentik darbe testi numunelerinin alındığı bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : Çekme testi ve çentik darbe testi numunelerinin alındığı bölgeler.

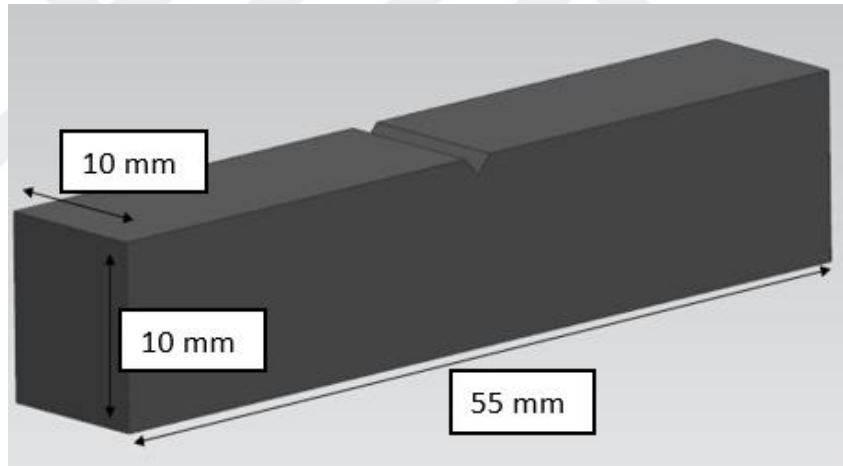
Malzemelerin mukavemetleri hakkında esas dizayn bilgilerini saptamak, malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak ve üretilen malzemelerin kontrolünü yapmak amacıyla, en çok başvurulan test metodlarından biri çekme testidir. Çekme testi sonrasında malzemenin elastisite modülü, elastik sınırı, rezilyansı, akma gerilmesi çekme dayanımı, tokluk, % uzama ve % kesit daralması gibi özellikleri elde edilir. Dökülen parça üzerinden alınan numune DIN EN 1561 standartına göre hazırlanmıştır ve bu standarta göre çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15’ te çekme testi numune ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Çekme testi için numune ölçüleri.

Çentik darbe testi;

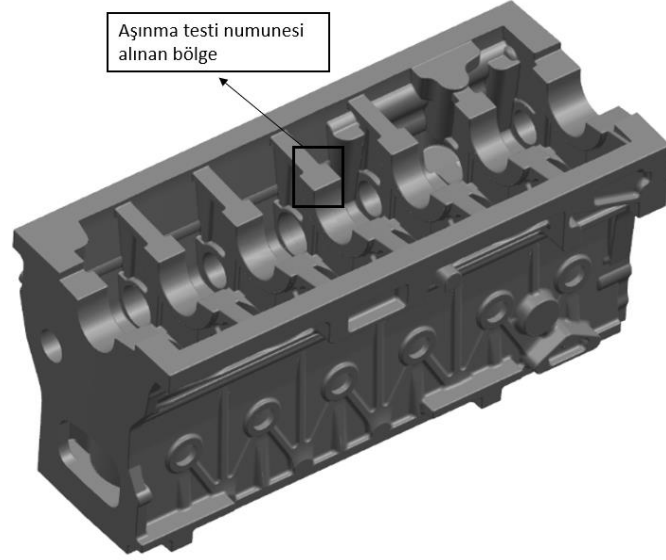
Parça üzerinden darbe testi için alınan numune, ISO 148-1' e göre işlenmiştir. İşlenen numunelere V çentik açılmıştır. Standarta göre işlenen ve çentik açılan numuneler Konya Teknik Üniversite'sinde Alşa marka ZBC 300J çentik darbe test cihazı ile çentik darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16' da darbe testi için hazırlanan örnek numune ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 3.16 : Çentik darbe testi için hazırlanan örnek numune ölçüleri.

Aşınma testi;

Reçineli kum kalıba ve yaş kum kalıba dökülmüş olan motor bloklarından alınan numunelerin aşınma davranışları incelenmiştir. Şekil 3.17' de motor bloklarından aşınma testi numunesi alınan bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 3.17 : Aşınma testi numunesi alınan bölge.

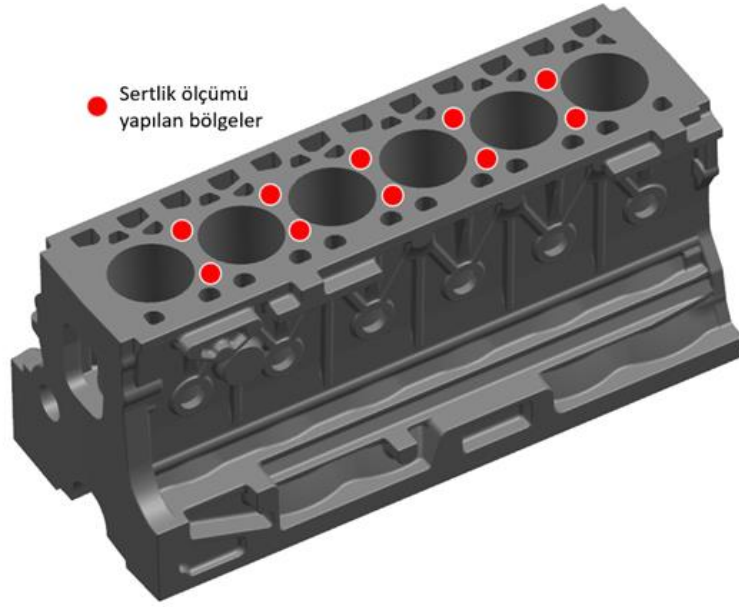
Aşınma testi için parça üzerinden 10x10 mm’lik numuneler kesilmiştir. Bu numuneler aşınma cihazına düz bir şekilde konulabilmesi için bakalite alınmıştır. Aşınma testleri kuru ortam ve yağlı ortam olmak üzere 2 farklı ortamda yapılmıştır. Aşınma testinin yağlı ortamda yapılabilmesi için cihazın farklı bir hücresi vardır ve bu hücreye numunenin konulması gerekmektedir. Aşınma cihazı olarak Bruker UMT2 markalı aşınma cihazı kullanılmıştır. Cihazda sabit halde bulunan zımpara numuneyi hem yatay hem de dikey olarak aşındırmaktadır. Farklı kuvvet ve yol parametreleri ayarlanabilmektedir. Bizim uyguladığımız aşınma testi 3 N kuvvet ve 20 m yol parametrelerine göre yapılmıştır. Şekil 3.18’de aşınma testi için hazırlanan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 3.18 : Aşınma testi numuneleri.

Sertlik testi;

Numunelerin sertlik değerleri Brinell sertlik metodu ile ölçülmüştür. Yapılan sertlik ölçümleri motor kafası bağlama yüzeyinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.19’da sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : Sertlik ölçümü yapılan bölgeler.

Sertlik ölçme yöntemi; konik veya küresel standart bir ucun sertliği ölçülecek malzemeye batırılmasına karşı, malzemenin gösterdiği direnci ölçmek demektir. Uygun olarak seçilen sert uç, tatbik edilen yük altında malzemeye batırıldığında, malzeme üzerinde bir iz bırakacaktır. Malzemenin sertliği iz çapı veya derinliği ile ters orantılıdır. Yani iz çapı veya derinliği arttıkça malzemenin sertliği düşer ve yine iz çapı veya derinliği azaldıkça da malzemenin sertliği artar. Bizim yaptığımız sertlik ölçümleri direk parça üzerinden yapılmıştır. Sertlik ölçümü yaparken Brinell sertlik ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler DIN 50 351 standartına göre yapılmıştır. 10 mm bilya çapı ile 3000 kg yük, 10-15 s parçaya uygulanmıştır ve parça üzerindeki iz çapına göre sertlikler belirlenmiştir.

3.6 X-Ray İncelemelerinin Yapılması

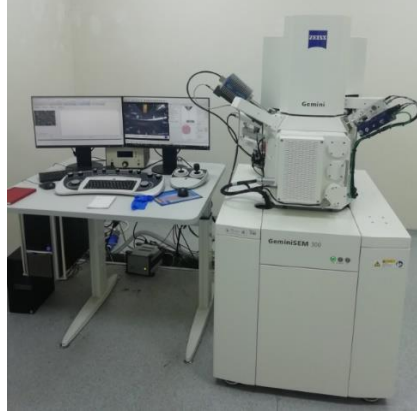
X-ray kontrolü döküm parçaların yüzey altı boşluk ve hatalarının taranarak tespit edildiği tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir. Tez aşamısında üretilen motor bloğun x ray kontrolleri yapılmıştır. Dökülen parçanın iç sağlamlığını ve parça içerisinde oluşmul olabilecek hataları tespit etmek için X-ray kontrolleri Şekil 3.20’ de gösterilen ünite de yapılmıştır. Bu x ışınları ünitesinde 225 ve 450 KV’ luk tüpler kullanılmaktadır. Bu tüplerin seçimi malzeme türüne ve et kalınlığına göre değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 3.20 : X-ray kontrol ünitesi.

3.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemelerinin Yapılması

Çekme ve darbe testine tabi tutulan test numunelerinin SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM incelemeleri elde edilen test sonuçları dikkate alınarak yapılmıştır. Tüm numuneler üzerinde inceleme yapılmamıştır. Dikkat çeken sonuçlar veren numuneler üzerinde SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Darbe ve çekme test numunelerinin kırık yüzeyleri incelenmiştir. Darbe ve çekme testlerine tabi tutulan numuneler Şekil 3.21’ de gösterilen taramalı elektron mikroskobu ile incelenmişlerdir. Cihaz 2 milyon büyütme kapasitesine sahiptir ve düşük vakumda yüksek çözünürlüklü sonuç veren, plazma tekniği ile görüntü kirliliğini önleyen, peltier soğutma ile ıslak numuneleri çalışabilen ve elementel analiz ve haritalama yapabilen bir cihaz olarak üstün özelliklere sahiptir.

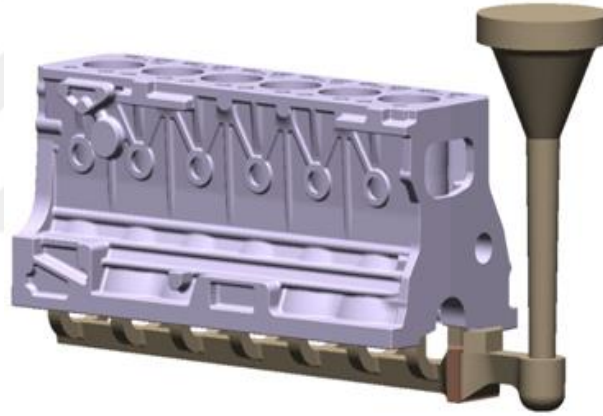


Şekil 3.21 : Taramalı elektron mikroskobu.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

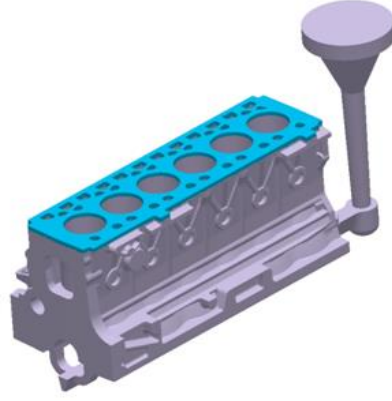
4.1 Simülasyon Sonuçları

Optimum proses ve tasarım parametrelerinin belirlenmesi için, 1. versiyondan 10. versiyona kadar yapılan tüm simülasyon sonuçları incelenmiştir. Yolluk tasarımı yapıldıktan sonra çalıştırılan ilk versiyonda gaz çıkıcıları bulunmamaktadır. 1. versiyonda çalıştırılan yolluk sistemi Şekil 4.1’ de gösterilmiştir.



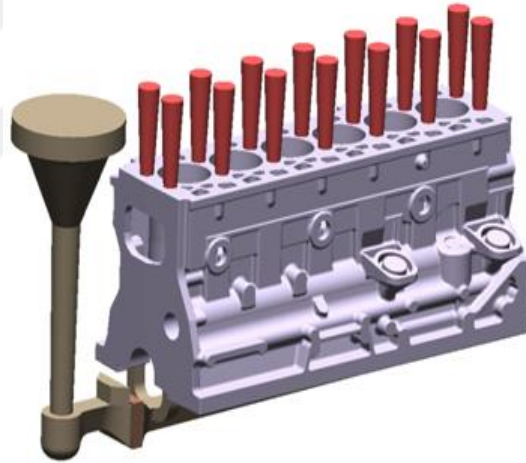
Şekil 4.1 : 1. versiyon simülasyon çalışması yolluk sistemi.

İlk versiyonda gaz çıkıcılarının bulunmamasından dolayı dolum esnasında kalıp boşluğunda bulunan ve maçalardan gelen gazların atmosfere atılamadığı gözlemlenmiştir. Atmosfere atılamayan bu gazlar parçanın üst bölgelerinde gaz sıkışmalarına neden olacağı ve döküm sonunda gaz boşluğu meydana geleceği görülmüştür. Şekil 4.2’ de 1. versiyondaki hava sıkışma riski olan bölgeler gösterilmiştir.



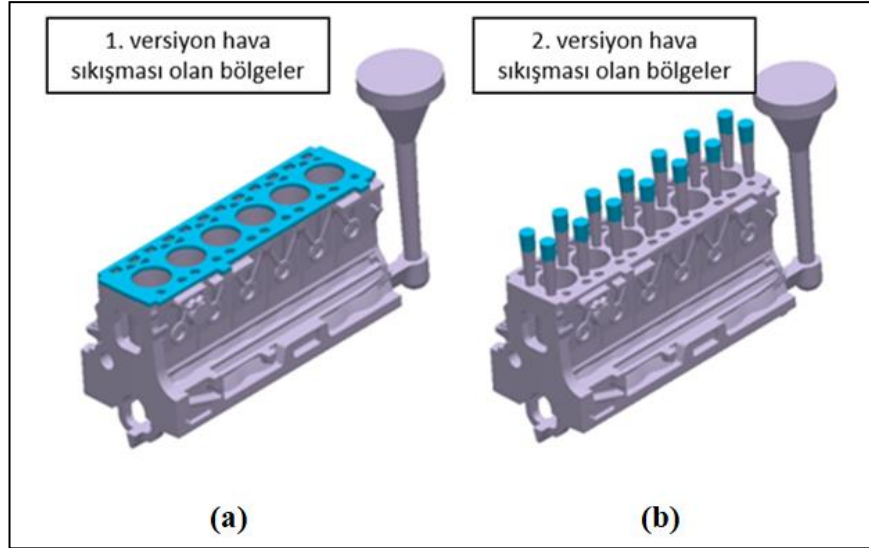
Şekil 4.2 : 1. versiyondaki hava sıkışma riski olan bölge.

İlk versiyonda tespit edilen ve gaz boşluğu sakatına neden olabilecek gaz boşluklarının giderilmesi için 2. versiyonda Şekil 4.3’ te görüleceği gibi parçanın üst yüzeyine çapı 25 mm olan gaz çıkıcıları ilave edilmiştir. Kalıp içerisinde sıkışan gazların bu gaz çıkıcılarına yönlendirilmesi ve buralardan atmosfere atılması hedeflenmiştir.



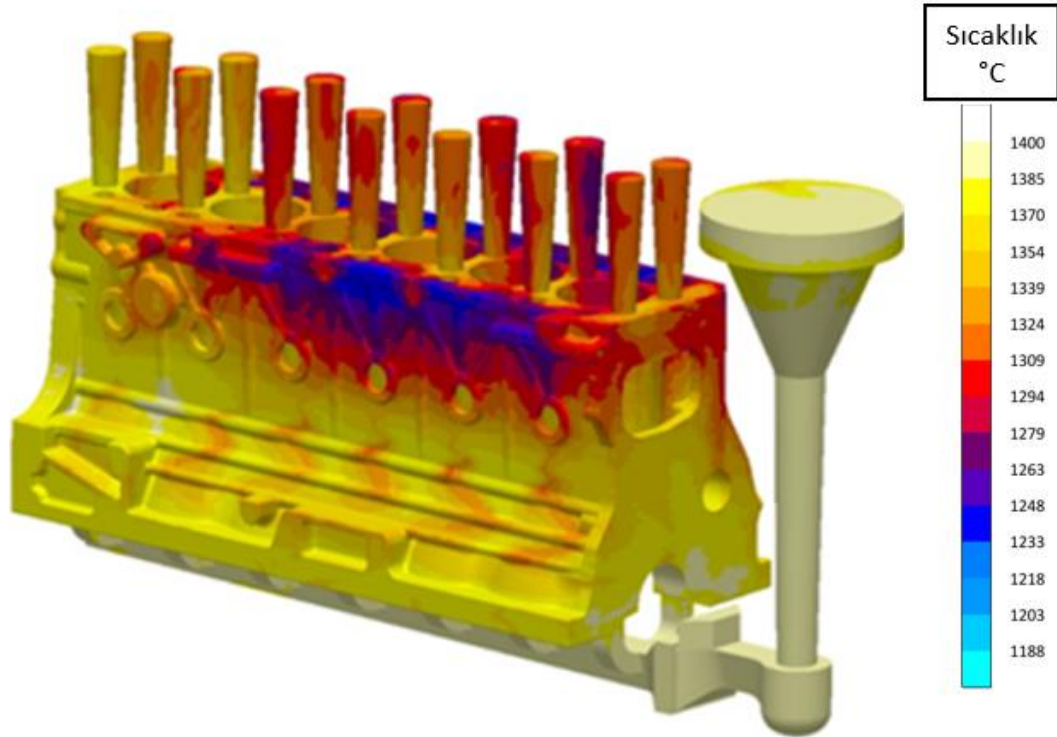
Şekil 4.3 : 2. Versiyonda ilave edilen gaz çıkıcıları.

İlave edilen gaz çıkıcıları ile çalıştırılan 2. versiyonda hava sıkışma riski, 1. versiyona göre daha düşüktür. Kalıbın dolumu incelendiğinde son dolan kısımların ilave edilen çıkıcılar olduğu ve gazın bu bölgelerden atmosfere atıldığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre kalıp tasarımına gaz çıkıcılarının ilave edilmesine karar verilmiştir. Şekil 4.4’ te (a) 1. versiyon ve (b) 2. versiyonun hava sıkışma sonuçları karşılaştırılmıştır.



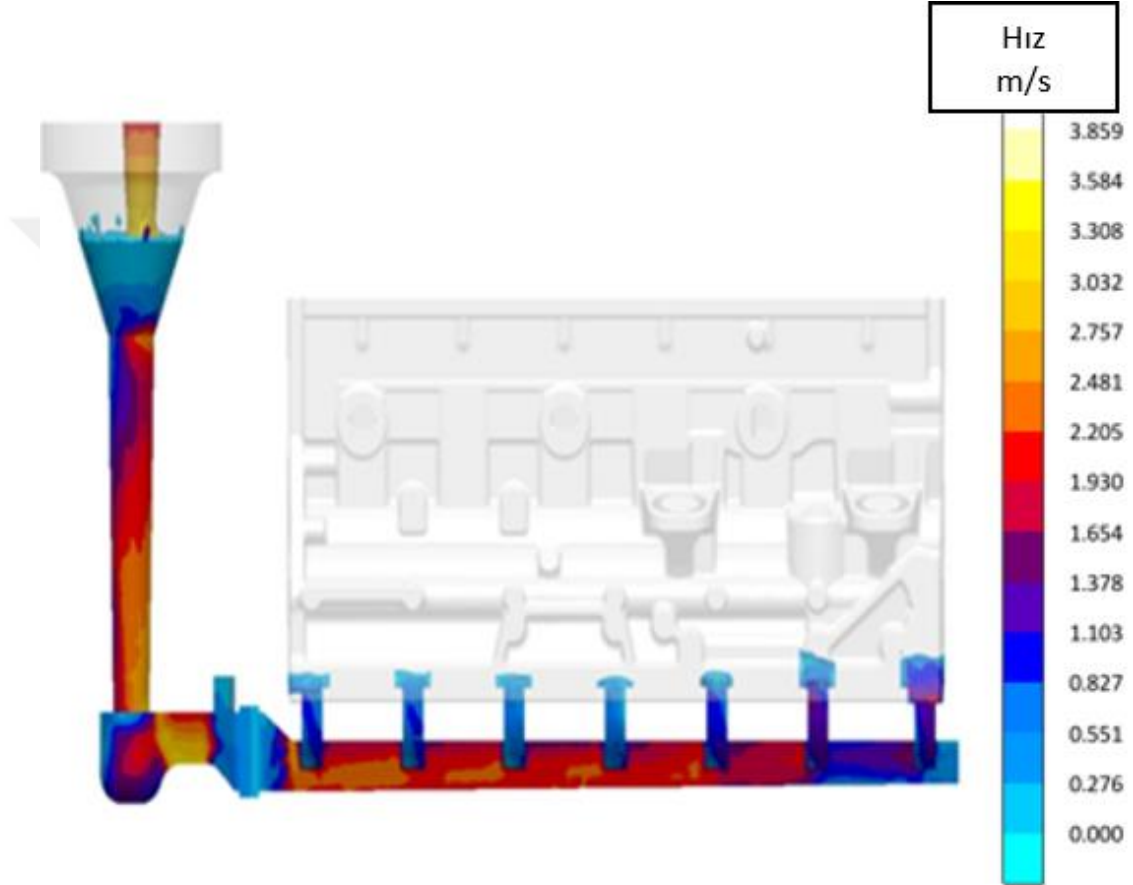
Şekil 4.4 : (a) 1. Versiyon ve (b) 2. Versiyon hava sıkışması olan bölgeler.

2. versiyonda çalıştırılan yolluk sisteminin dolum süresi , sıcaklık dağılımı, sıvı metal hızları ve çekme boşluğu sonuçları incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre dolum süresi 22 s gelmektedir. Parça üzerinde homojen sıcaklık dağılımı bulunmakta ve soğuk birleşme riski olabilecek bir bölge görülmemektedir. Şekil 4.5’ te dolum sonunda parça üzerindeki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



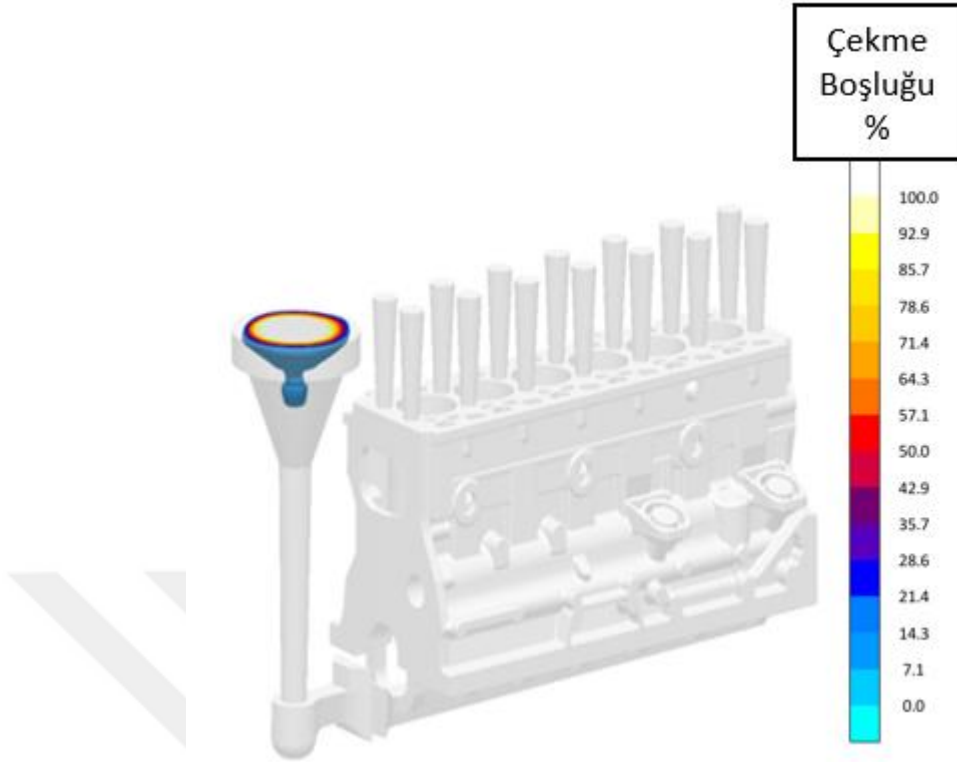
Şekil 4.5 : 2. versiyon dolum sonu parça üzerindeki sıcaklık dağılımı.

Yolluk tasarımı yaparken sıvı metalin tüm girişlerden aynı anda parçaya girmesi hedeflenmiş ve girişlerdeki hızların 0,5 mm/s' nin altında olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Simülasyon sonucuna sıvı metal tüm girişlerden aynı anda giriş yapmakta ve giriş hızları 0,3-0,5 mm/s arasında değişmektedir. Şekil 4.6' da sıvı metalin parçaya ilk girişi ve hızları gösterilmiştir



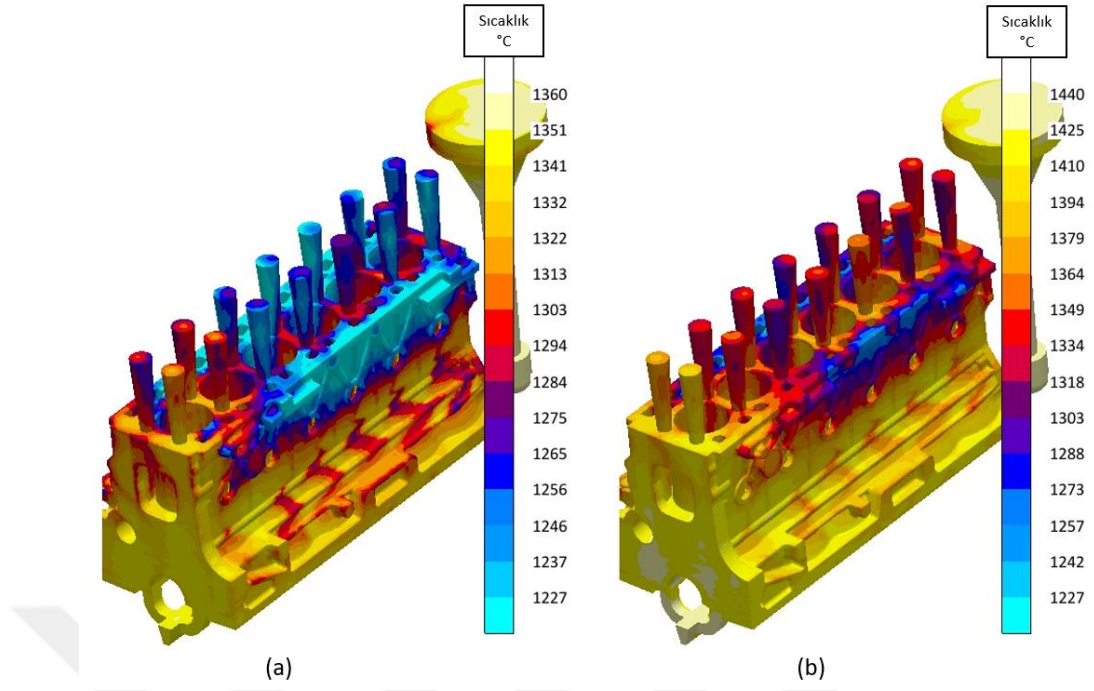
Şekil 4.6 : Sıvı metalin girişlerdeki hızı.

Simülasyon sonuçlarında dolum ile ilgili sonuçların ardından katılaşma ile ilgili sonuçlardan olan çekme boşluğu sonucu incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre çekme boşluğu sonuçlarında parça içerisinde herhangi bir çekme boşluğu riski gözükmemektedir. Şekil 4.7' de çekme boşluğu sonuçları gösterilmiştir.



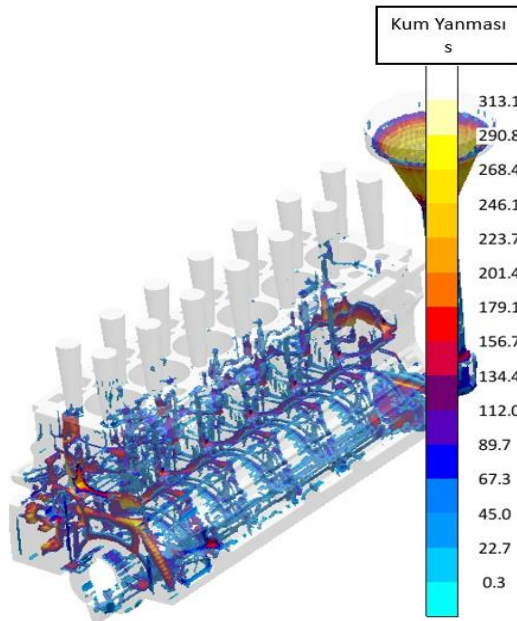
Şekil 4.7 : Çekme boşluğu sonuçları.

2. versiyonda çalıştırdığımız simülasyonda döküm sıcaklığı 1400 °C ve dolum süresi 22 s gelmektedir. Döküm sıcaklığını doğru tayin edebilmek için, dolum süresi 22 s’ de sabit tutularak döküm sıcaklıkları 1360 °C ve 1440 °C olacak şekilde 3. ve 4. versiyon çalıştırılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Sonuçlara göre dolum sonrasında sıcaklık dağılımının en iyi olduğu versiyon, döküm sıcaklığı 1440 °C olan 4. versiyondur. Döküm sıcaklığı yükseldikçe parçadaki sıcaklık dağılımı iyileşmektedir. Döküm sıcaklığı düştükçe parçada soğuk birleşme riski artmaktadır. Şekil 4.8’de 3. ve 4. versiyonun sıcaklık dağılımı sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : (a) 3. versiyon, (b) 4. versiyonun sıcaklık dağılımı sonuçları.

Fakat kum yanması sonuçlarına baktığımızda, döküm sıcaklığının 1440 °C olan 4. versiyonda kum yanması değeri en yüksektir. Kum yanmasının yüksek olması parçanın yüzey kalitesi olumsuz yönde etkilemektedir. Kum yanması değeri sıcaklık düştükçe düşmektedir. Şekil 4.9’da 4. versiyonun kum yanması sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : 4. versiyonun kum yanması sonuçları.

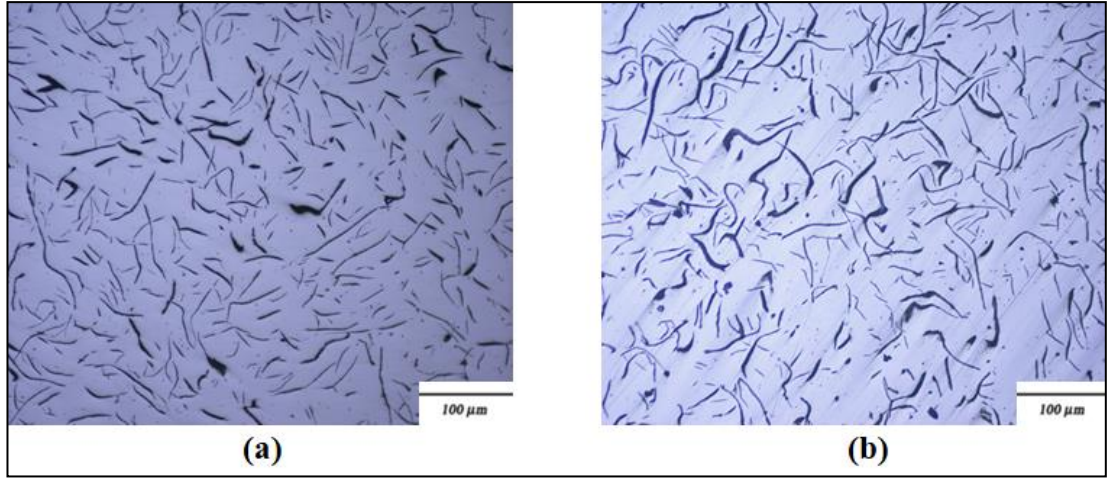
5., 6. ve 7. versiyonda dolum süresi 15 s olacak şekilde, döküm sıcaklıkları sırasıyla 1400 °C, 1360 °C ve 1440 °C için sonuçlar incelenmiştir. Dolum süresini düşürdüğümüzden dolayı kalıp daha hızlı dolmuş ve girişlerdeki sıvı metal hızları 2. versiyondaki sıvı metal hızlarına göre yükselmiştir. Girişlerdeki sıvı metal hızlarının yükselmesi kum sürüklenmesine ve bunun sonucunda da kum boşluğu riskine neden olmaktadır.

8., 9. ve 10. versiyonda dolum süresi 30 s olacak şekilde, döküm sıcaklıkları sırasıyla 1400 °C, 1360 °C ve 1440 °C için sonuçlar incelenmiştir. Dolum süresini uzattığımızdan dolayı kalıp daha yavaş dolmuş ve parçadaki sıcaklık dağılımı 2. versiyondaki sıcaklık dağılımına göre kötüleşmiştir. Sıcaklık dağılımında meydana gelen bu kötüleşme parçada soğuk birleşme riskine neden olmaktadır.

Tüm yapılan versiyonların incelenmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi neticesinde, döküm sıcaklığının 1400 °C seçilmesine, dolum süresinin 22 s olmasına ve parçanın üst kısmında gaz çıkıcılarının bulunmasına karar verilmiştir.

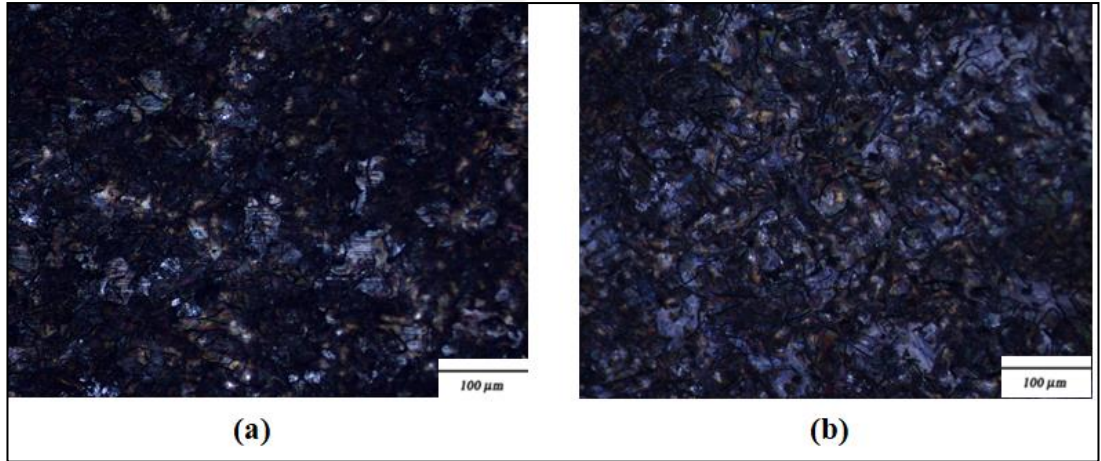
4.2 Mikroyapı Analizleri

Numunelerin grafit tipini ve perlit yapısını tespit etmek amacıyla metal mikroskopunda 100X büyütmede görüntüler alınmıştır. Hem yaş kum kalıpta üretilen parçanın mikroyapısı incelendiğinde, hem de reçineli kalıpta üretilen parçanın mikroyapısı incelendiğinde benzer mikroyapılara sahip oldukları görülmüştür. Her iki numunede de %99 perlitik yapı ve A tipi grafit yapısı bulunmaktadır. Grafit boyutu 4' tür. A tipi grafit, yapıda homojen olarak dağılmış ve rastgele yönelime sahip yapraklar halinde ortaya çıkmaktadır. Soğuma hızının aşırı yüksek olmadığı ve doğru aşılama yöntemi ile aşılınmış dökme demirlerde görülmektedir. L.Collini ve arkadaşları [7] EN GJL 300 alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri belirlemek için yaptıkları çalışmada, elde ettikleri numunelerin mikroyapılarını incelediklerinde %100 perlitik yapıya sahip olduklarını ve grafitlerin A tipi grafit olduklarını söylemişlerdir. Şekil 4.12' de (a) yaş kum kalıp ve (b) reçineli kum kalıpta üretilen parçaların mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.10 : (a) Yaş kum kalıp, (b) reçineli kum kalıpta üretilen parçaların mikroyapıları

Nital çözeltisi ile dağlanmış numunelerden bakılan mikroyapıda sementit oluşumu gözlemlenmemiştir. Şekil 4.11’ de (a) yaş kum kalıp ve (b) reçineli kum kalıpta üretilen parçaların nital çözeltisi ile dağlanmış mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir.

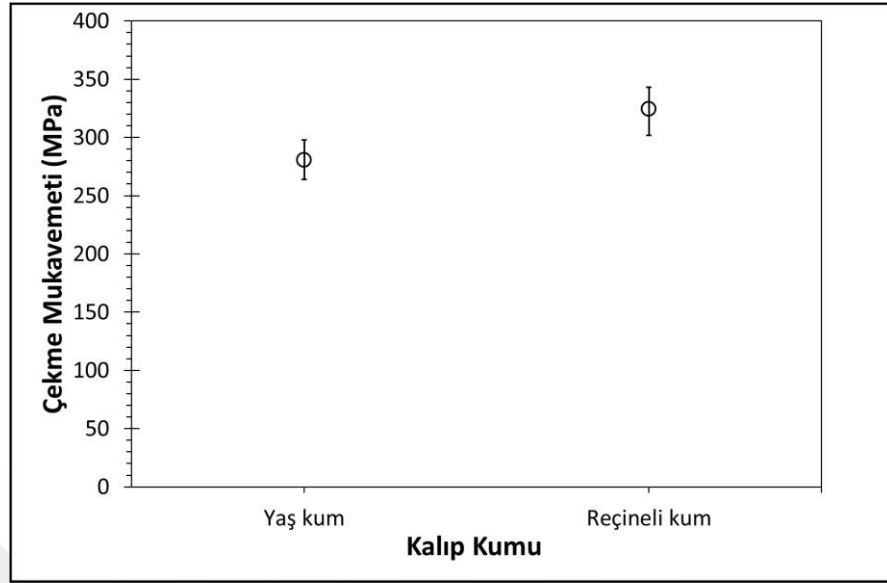


Şekil 4.11 : (a) Yaş kum kalıpta üretilen parçanın dağlanmış mikroyapısı (100X büyütme) (b) reçineli kum kalıpta üretilen parçanın dağlanmış mikroyapısı (100X büyütme).

4.3 Çekme Testi ve Çentik Darbe Testi Sonuçları

Döküm parça üzerinden alınan çekme testi numuneleri Döktaş Dökümcülük’ te bulunan SHIMADZU markalı çekme cihazı ile çekme testlerine tabi tutulmuştur. Test esnasında tüm numunelerde gevrek kırılma gözlemlenmiştir. Yaş kum kalıp ile elde edilen motor bloğundan alınan numunelerin çekme testi sonuçları, reçineli kalıpta üretilmiş olan motor bloğundan alınan numunelerin çekme testi sonuçlarına göre daha

düşük gelmektedir. Şekil 4.12’ de yaş kum kalıptan elde edilen numuneler ile reçineli kalıptan elde edilen numunelerin çekme mukavemeti sonuçları gösterilmiştir.

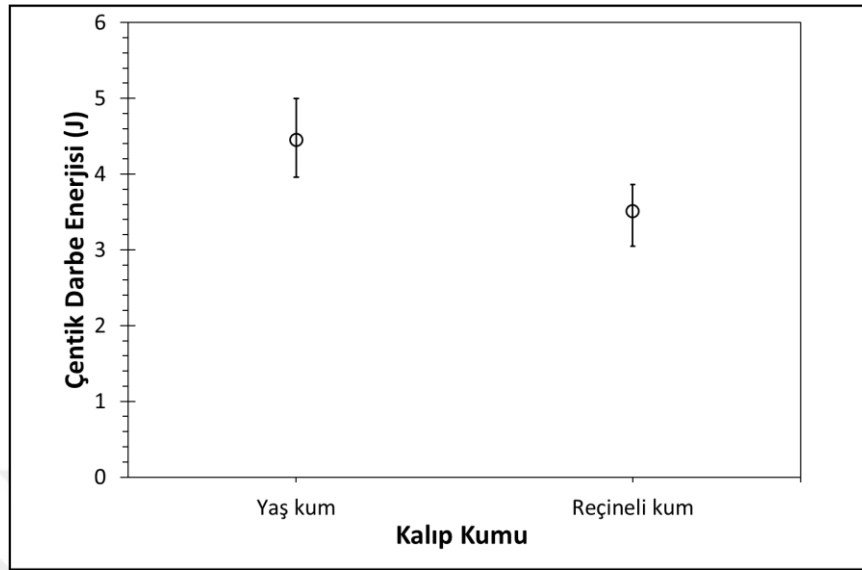


Şekil 4.12 : Çekme testi sonuçları.

Yaş kum kalıp ile elde üretilen motor bloklarında yapılan ölçümlerde çekme mukavemeti 280 MPa, reçineli kalıpta üretilen motor bloklarında yapılan ölçümlerde çekme mukavemeti ise 324 MPa olarak ölçülmüştür. L.Collini ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [7] EN GJL 300 döküm alaşımının çekme testi sonuçları incelemiştir. 3 farklı dökümhanede yaş kum kalıba dökülen aynı şartlarda dökülen alaşımın çekme mukavemetleri 281 MPa , 261 MPa ve 240 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre L. Collini ve arkadaşları aynı alaşımın mekanik özelliklerinin dökümhaneden dökümhaneye farklılıklar gösterebileceğini öne sürmüşlerdir. L. Alvarez ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [58] %3.35 C ve %2.07 Si içeren gri dökme demirden üretilmiş motor bloğun silindirleri arasındaki et kalınlıklarından aldıkları numunelerin çekme testlerini gerçekleştirmişler ve 306 MPa çekme mukavemeti elde ettiklerini ileri sürmüşlerdir.

Döküm parça üzerinden alınan numuneler çentik darbe testi standartına göre 10x10x55 mm ölçülerinde hazırlanmış ve Konya Teknik Üniversitesinde teste tabi tutulmuşlardır. Test esnasında tüm numunelerde gevrek kırılma görülmüştür. Yapılan testlerin sonucuna göre yaş kum kalıp ile elde edilen motor bloğundan alınan numunelerin çentik darbe enerjisi, reçineli kalıpta üretilmiş olan motor bloğundan alınan numunelerin çentik darbe enerjisine göre daha yüksek gelmektedir. Şekil 4.13’ te yaş

kum kalıptan elde edilen numuneler ile reçineli kalıptan elde edilen çentik darbe enerjisi gösterilmiştir.

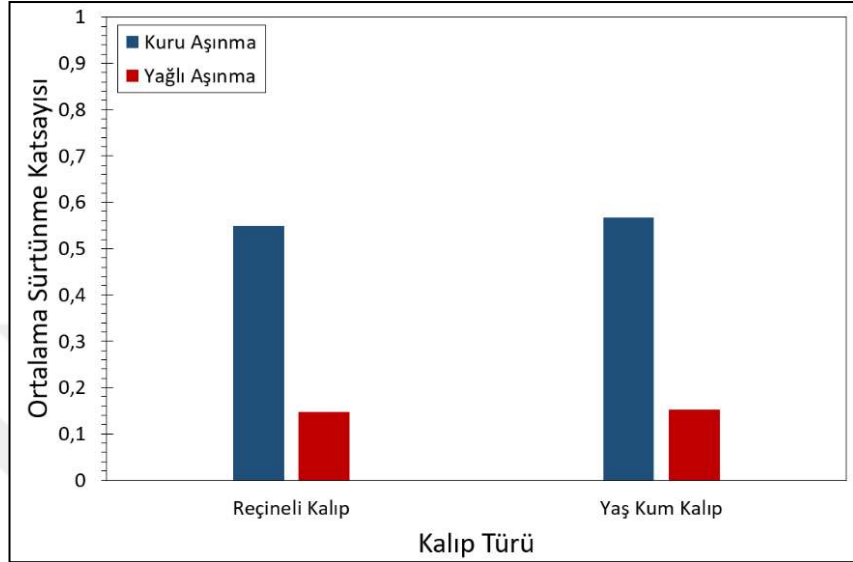


Şekil 4.13 : Çentik darbe testi sonuçları.

Gri dökme demirler gevrek malzeme olduğu için gerçekleştirilen literatür taramalarında gri dökme demirlere genel olarak çentik darbe testi uygulanmadığı görülmüştür. Yoon-Jun Kim ve arkadaşları [59] östemperlenmiş dökme demirlerde darbe enerjisi çalışması yapmışlardır. 910 °C ‘de 90 dakika östenitlendikleri küresel grafitli dökme demiri 350-410 °C arasındaki farklı sıcaklıklarda östemperleme ısı işlemine tabi tutmuşlar ve her bir numunenin darbe enerjisini belirlemişlerdir. Isıl işleme tabi tutulmayan numune 73.1 J darbe enerjisine sahip iken, 350 °C ‘de ısı işlemine tabi tutulan numune 101.9 J, 410 °C ‘de ısı işlemine tabi tutulan numune ise 136.2 J darbe enerjisine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Tez kapsamında elde ettiğimiz numuneler ile bizim yaptığımız çentik darbe testlerinde yaş kum kalıp numunelerinin darbe enerjisi 4,5 J olarak ölçülmüştür. Reçineli kalıp numunelerinin darbe enerjisi ise 3,5 J olarak ölçülmüştür. Yapılan çentik darbe testi sonuçlarına göre, hem yaş kum kalıpta üretilmiş olan hem de reçineli kalıpta üretilmiş olan lamel grafitli dökme demirler çok düşük darbe enerjisine sahiptirler.

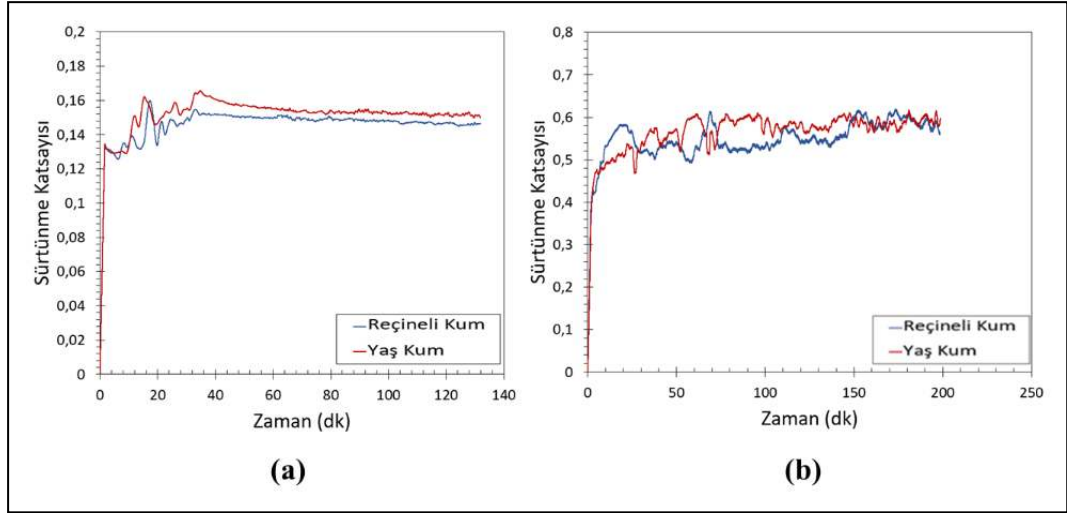
4.4 Aşınma Testi Sonuçları

Üretilen motor bloklarından alınan aşınma testi numuneleri kuru ve yağlı olmak üzere 2 farklı ortamda aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Şekil 4.14’ te test numunelerinin, farklı aşınma ortamlarındaki ortalama sürtünme katsayıları gösterilmiştir.



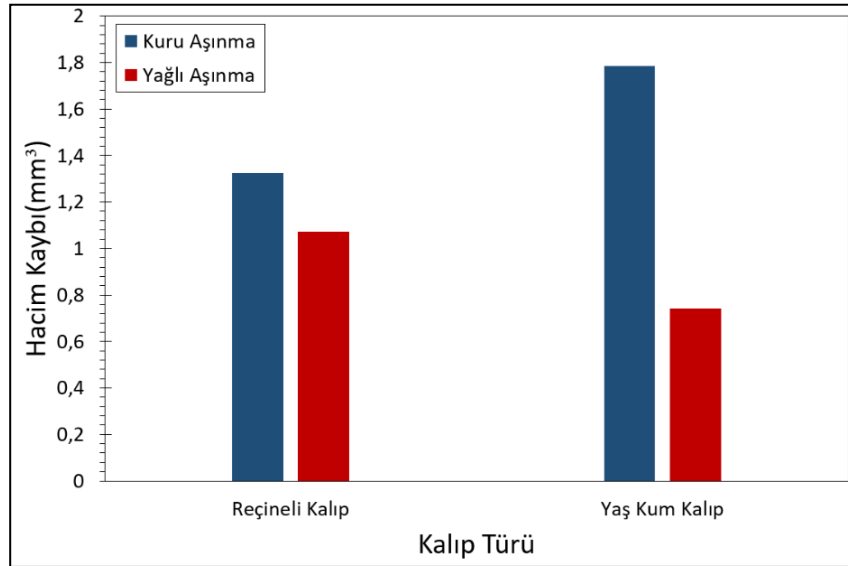
Şekil 4.14 : Ortalama sürtünme katsayıları.

Şekilde görüldüğü gibi kuru ortamda numunelerin sürtünme katsayıları yağlı ortama göre daha yüksektir. Bu aslında beklenen bir durumdur. Çünkü yağlı ortamda gerçekleştirilen aşınma testinde, aşındırıcı ile numune arasında yağ bulunmaktadır. Bulunan bu yağ aşındırıcının hareketlerini kolaylaştırmakta ve aşınma testine tabi tutulan numunenin daha az aşınmasına neden olmaktadır. Reçineli kalıpta üretilen numuneler ile yaş kum kalıpta üretilen numunelerin ortalama sürtünme katsayısına baktığımız zaman, her iki kalıp türünde de birbirine yakın sonuçlar çıktığını görmekteyiz. Bu sonuçlara göre kalıp türünün ortalama sürtünme katsayısına etkisi olmadığını söyleyebiliriz. Şekil 4.15’ te (a) yağlı ortamda (b) kuru ortamda sürtünme katsayısının zamanla değişim grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.15 : (a) Yağlı ortamda sürtünme katsayısı-zaman grafiği (b) kuru ortamda sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

Yağlı ortamda yapılan aşınma test sonuçlarına göre hem reçineli kum kalıpta üretilmiş numunenin hem de yaş kum kalıpta üretilmiş olan numunenin sürtünme katsayıdeğişimi birbiri ile benzer özellik göstermektedir. Her iki numunede de aşınma testi boyunca birbirine yakın simetride bir sürtünme katsayısı-zaman grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.16’ da test numunelerinin, farklı aşınma ortamlarındaki hacim kayıpları gösterilmiştir.



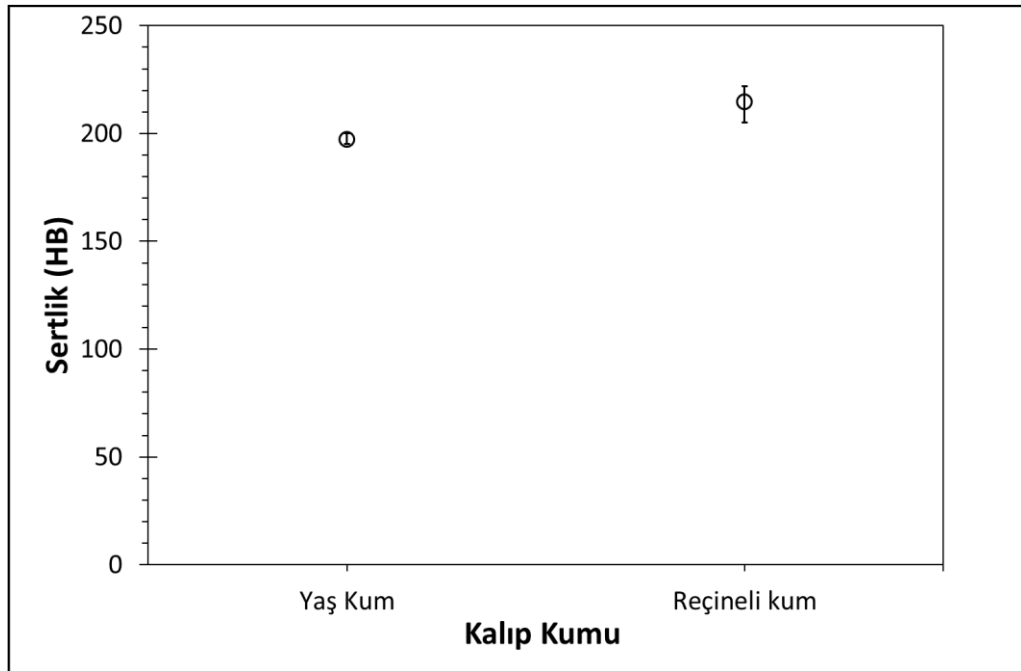
Şekil 4.16 : Hacim kayıpları.

Kuru aşınmada meydana gelen hacim kayıpları, yağlı aşınmaya göre daha yüksektir. Yağlı aşınmada aşındırıcı ile numune arasında bulunan yağ, hacimsel olarak daha az aşınmanın gerçekleşmesini sağlamıştır.

4.5 Sertlik Testi Sonuçları

Yaş kum kalıpta ve reçineli kum kalıpta üretilen motor bloklarının sertlik ölçümleri motor bloklarının yüzeylerinden yani kalıp kumu ile temas eden bölgelerinden yapılmıştır. Alvarez L. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [58] % 3.35 C ve % 2.07 Si içeren gri dökme demirden üretilen motor bloklarının kalıp ile temas eden yüzeylerinden ve yüzeyden 70 mm uzak bölgeden aldıkları sertlik ölçümlerini değerlendirmişlerdir. Bu sertlik ölçümlerini 10 mm bilya çapı ve 3000 kg yük ile gerçekleştirmişlerdir. Yüzeyden aldıkları ölçümlerin ortalaması 230 HB, yüzeyden 70 mm uzak bölgeden aldıkları sertlik ölçümlerinin ortalamasının ortalama 213 HB geldiğini bildirmişler ve kalıba temas eden yüzeyin daha hızlı soğuduğundan dolayı daha yüksek sertliğe sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Bizim yaptığımız çalışmada yaş kum kalıpta üretilen motor bloklarında yapılan ölçümlerde sertlik değeri 198 HB , reçineli kalıpta üretilen motor bloklarında yapılan ölçümlerde sertlik değeri ise 215 HB olarak ölçülmüştür. Darbe enerjisi ile sertlik değeri ters orantılı olduğundan dolayı, yaş kum kalıpta üretilen parçanın darbe enerjisi yüksek sertlik değeri düşüktür. Reçineli kalıpta üretilen parçanın ise darbe enerjisi düşük sertlik değeri yüksektir. Şekil 4.17’de sertlik sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.17 : Sertlik sonuçları.

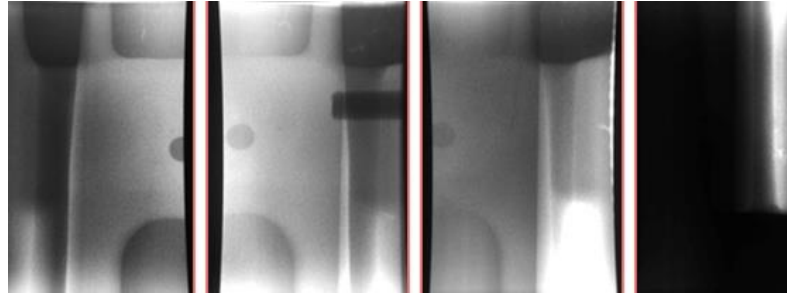
4.6 X-Ray Sonuçları

Belirlenen proses parametreleri ile yapılan simülasyon çalışmasında parçanın herhangi bölgesinde çekme boşluğu ya da gaz boşluğu riski görülmemiştir. Dökümleri yapılan motor blokların iç sağlamlığını değerlendirmek ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırmak için 450 KVA gerçek zamanlı radyaskopi cihazı ile x-ray kontrolleri yapılmıştır. İlk olarak motor blokları tek parça halinde kontrol edilmiştir. Daha sonra kontrol edilen motor blokları dilimler halinde kesilerek elde edilen kesitlerin X-ray kontrolü yapılmıştır. Şekil 4.18’ de motor blokların dilimlenmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 4.18 : X-ray kontrolü için dilimlenmiş motor bloğu.

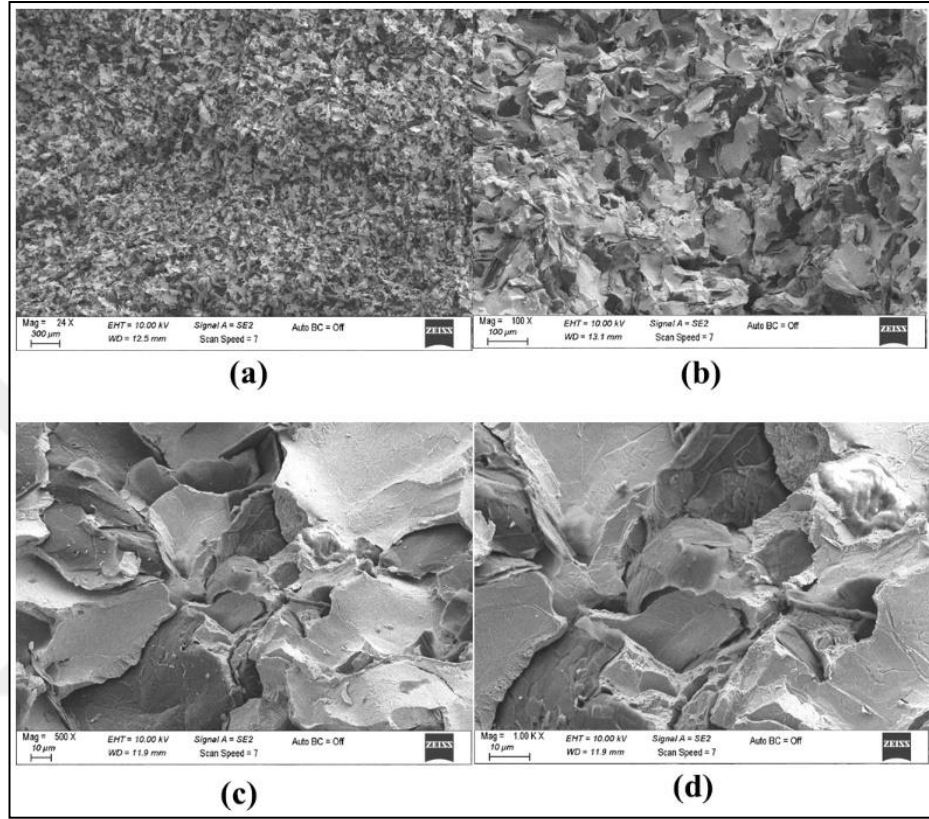
X-ray kontrollerinde motor bloklarında çekme boşlukları ve gaz boşlukları gibi döküm hatalarının olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekil 4.19’ da kontroller sonucu elde edilen x-ray sonuçları gösterilmiştir. X-ray sonuçlarına göre deneysel çalışmada dökümü yapılan motor bloğunda herhangi bir döküm hatası gözlemlenmemiştir.



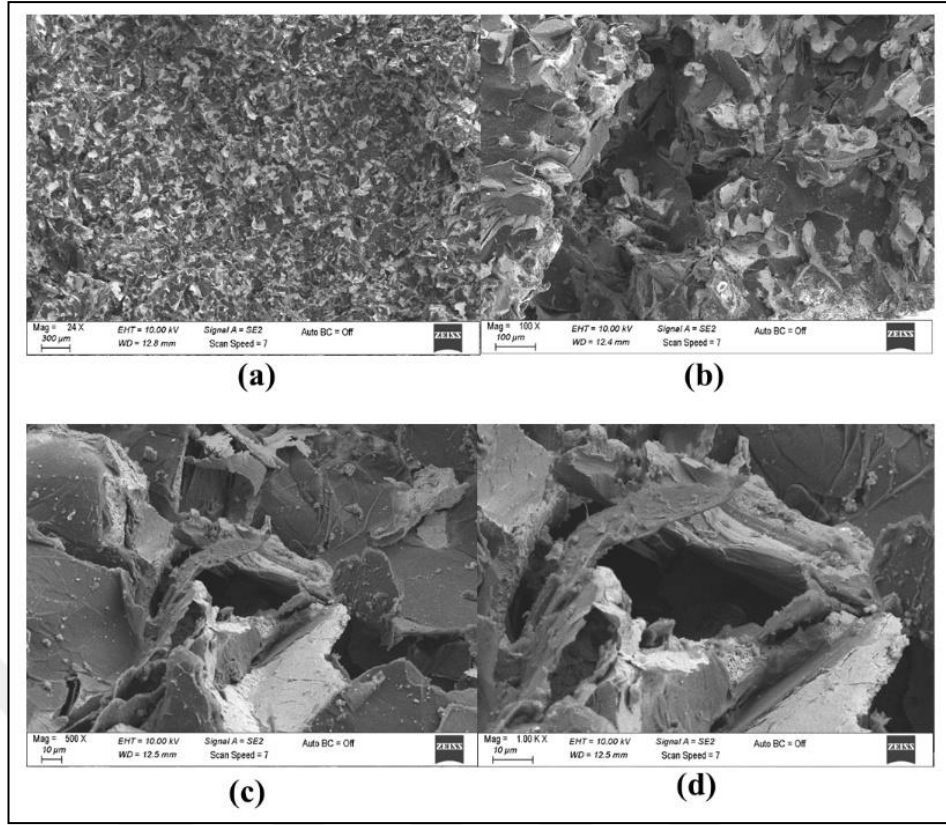
Şekil 4.19 : X-ray görüntüleri.

4.7 SEM Analiz Sonuçları

Çekme testi numunelerinin kırık yüzeylerinden SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.20’ de reçineli kalıptan elde edilen numunelerin, Şekil 4.21’ de de yaş kum kalıptan elde edilen numunelerin farklı büyütmelerdeki görüntüleri gösterilmiştir.

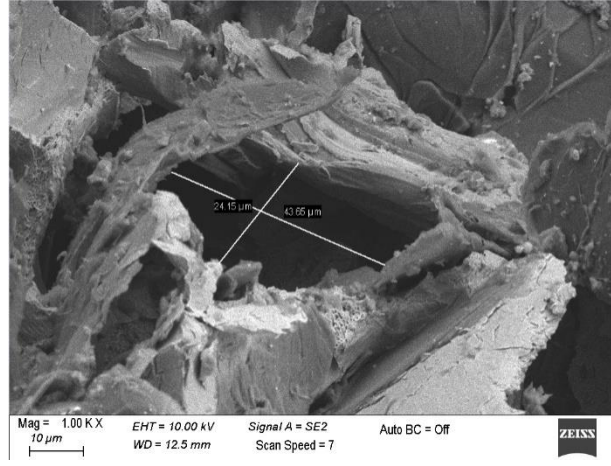


Şekil 4.20 : (a) Reçineli kalıptan elde edilen numunenin 24X büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) reçineli kalıptan elde edilen numunenin 100X büyütmedeki SEM görüntüsü, (c) reçineli kalıptan elde edilen numunenin 500X büyütmedeki SEM görüntüsü, (d) reçineli kalıptan elde edilen numunenin 1000X büyütmedeki SEM görüntüsü.



Şekil 4.21 : (a) Yaş kum kalıptan elde edilen numunenin 24X büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) yaş kum kalıptan elde edilen numunenin 100X büyütmedeki SEM görüntüsü, (c) yaş kum kalıptan elde edilen numunenin 500X büyütmedeki SEM görüntüsü, (d) yaş kum kalıptan elde edilen numunenin 1000X büyütmedeki SEM görüntüsü.

Yapılan SEM incelemelerinde yaş kum kalıptan elde edilen numunelerin kırık yüzeylerinde döküm boşlukları olduğu gözlemlenmiş ve bu bölgeler daha detaylı olarak incelenerek döküm boşluklarının boyutları ölçülmüştür. Yapılan bu ölçümlerde kırık yüzeyinde bulunan boşlukların yaklaşık olarak 30-40 μm çapında oldukları tespit edilmiştir. Yaş kum kalıplardaki numunelerin çekme mukavemetlerinin düşük olmasının sebeplerinden biri de bu döküm boşluklarıdır. Reçineli kum kalıp numunelerin kırık yüzeylerinde herhangi bir döküm hatasına rastlanmamıştır. Şekil 4.22' de yaş kum kalıptan elde edilen numunenin kırık yüzeyinde tespit edilen bir döküm boşluğu gösterilmiştir.



Şekil 4.22 : Yaş kum kalıptan elde edilen numunenin kırık yüzeyinde bulunan döküm boşluğu SEM görüntüsü.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapılan simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile motor bloklarının dökümünde; dolum süresi, döküm sıcaklığı gibi proses parametrelerinin ve kalıp tasarımı, yolluk tasarımı, gaz çıkıcılarının tasarımı gibi tasarım parametrelerinin döküm parça kalitesinde etkili olduğu anlaşılmıştır.

Motor bloklarının dökümünde yüksek sıcaklıklar (1440 °C) ile döküm yapıldığında kum yanmasından dolayı yüzeyde kum emmeleri, düşük sıcaklık ile (1370 °C) ile döküm yapıldığında ince kesitli bölgelerde soğuk birleşme riskleri olduğu görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı optimum döküm sıcaklığının 1400 °C olduğu belirlenmiştir.

Dolum hızlarının çok hızlı olduğu durumlarda, sıvı metal kalıp kumunu kopartacağından dolayı döküm parçada kum boşluğu sakatına neden olacağı bu yüzden girişlerdeki hızların 0.7 m/s' den daha yüksek olmaması gerektiği tespit edilmiştir.

EN GJL 300 alaşımı ile yapılan motor blok dökümlerinde besleyici gömleği kullanılsa dahi parça içerisinde çekinti boşluklarının olmadığı tespit edilmiştir.

Yaş kum kalıba dökülen motor bloğundan alınan numuneler ile reçineli kum kalıba dökülen motor bloğundan alınan numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Reçineli kum kalıpta üretilen motor bloğunun çekme mukavemeti (324 MPa) ve sertlik değerleri (215 HB) yaş kum kalıpta üretilen motor bloğunun çekme mukavemeti (280 MPa) ve sertlik değerlerine (198 HB) göre daha yüksektir. Darbe enerjisi ise yaş kum kalıpta üretilen motor bloğunun 4,5 J, reçineli kalıpta üretilen motor bloğunun ise 3,5 J' dır.

Her iki kalp türüne dökülen motor bloklarından alınan mikro yapı numuneleri incelendiğinde benzer mikroyapılar görülmüştür. Numunelerin ikisinde de %99 perlitik yapı ve A tipi grafit mevcuttur.

Reçineli kum kalıpta üretilen motor bloktan alınan numuneler ile yaş kum kalıpta üretilen motor bloktan alınan numunelerin kuru ve yağlı ortamda aşınma testi sonucunda, ortalama sürtünme katsayılarına birbiri ile benzerlik göstermektedir.

5.2 Öneriler

Motor bloklarının dökümünde, optimum proses ve tasarım parametrelerini belirlemek amacıyla dolum ve katılma simülasyonları yapılmış ve buna yönelik olarak sıcaklık dağılımı, sıvı metilin kalıba giriş hızı, çekme boşluğu, dolum süresi gibi sonuçlar incelenmiştir. Dolum ve katılma simülasyonlarına ilave olarak stress simülasyonları da yapılabilir. Stress simülasyonları sonucunda her iki kalıp türü için kalıntı gerilmeleri, çarpılmalar ve çatlak riskleri tespit edilip, birbiri ile karşılaştırılabilir. Simülasyon sonucunda tespit edilen kalıntı gerilmelerinin yüksek olduğu bölgelerdeki gerilmeleri azaltmak için döküm prosesinden sonra gerilim giderme ısıl işlemine ihtiyacı olup olmayacağı incelenebilir. Isıl işlem uygulanırsa, motor bloklarının mekanik değerlerinde ne gibi değişikliklerin meydana geleceği, bu değişimlerin avantajları ve dezavantajları araştırılabilir.

Bu tez çalışmasında yaş kum kalıp ve reçineli kalıba dökülen motor bloklarının mekanik özelliklerin çoğu incelenmiş ve birbiri ile karşılaştırılmıştır. Fakat üretilen motor bloklarından alınan numunelerin yorulma testleri yapılmamıştır. Farklı kumlar ve farklı bağlayıcılar ile üretilen kum kalıplarının yorulma mukavemeti üzerine etkisi araştırılabilir.

3B yazıcılardan elde edilen maçalar ile oluşturulan kalıpların maliyeti günümüz şartlarında çok yüksektir ve seri üretim için uygun değildir. Numunelendirme aşamalarında kullanımı şu an için daha uygundur. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için bu konu üzerine çalışmalar yapılarak 3B yazıcıların gelişimine katkı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yenici, B.S.**, (2002). Gri ve küresel dökme demirlerin ısıtıl işlemleri. (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Beniwal, G. and Saxena, K.K.**, (2020). Effect of niobium addition in grey cast iron: A short review. *Materials Today: Proceedings*.
- [3] **Piotr, K., Tertel, E., Frankovský, P., Kelemen, M., and Cyganiuk, J.**, (2014). Matematic Model of the Use of Raw Spheroidal Iron Casts. *Procedia Engineering*, 96. 257-267.
- [4] **Chemezov, D., Smirnova, L., and Bogomolova, E.**, (2018). Metal mold casting of cast iron and aluminium pistons. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 05 (61). 132-141.
- [5] **Singhal, P. and Saxena, K.K.**, (2020). Effect of silicon addition on microstructure and mechanical properties of grey cast Iron: An overview. *Materials Today: Proceedings*.
- [6] **Baicchi, P., Collini, L., and Riva, E.**, (2007). A methodology for the fatigue design of notched castings in gray cast iron. *Engineering fracture mechanics*, 74(4). 539-548.
- [7] **Collini, L., Nicoletto, G., and Konečná, R.**, (2008). Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering: A*, 488(1-2). 529-539.
- [8] **Kamps, T., Walker, J., Wood, R., Lee, P., and Plint, A.**, (2017). Scuffing mechanisms of EN-GJS 400-15 spheroidal graphite cast iron against a 52100 bearing steel in a PAO lubricated reciprocating contact. *Wear*, 376. 1542-1551.
- [9] **Scozzafava, A., Tomesani, L., and Zucchelli, A.**, (2004). Image analysis automation of spheroidal cast iron. *Journal of Materials Processing Technology*, 153. 853-859.
- [10] **Ceschini, L., Morri, A., and Morri, A.**, (2017). Effects of Casting Size on Microstructure and Mechanical Properties of Spheroidal and Compacted Graphite Cast Irons: Experimental Results and Comparison with International Standards. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(6). 2583-2592.

- [11] **Abdoos, M., Yamamoto, K., Bose, B., Fox-Rabinovich, G., and Veldhuis, S.,** (2019). Effect of coating thickness on the tool wear performance of low stress TiAlN PVD coating during turning of compacted graphite iron (CGI). *Wear*, 422. 128-136.
- [12] **Merta, E., Yilmaza, B., Bayraktara, Ö., Uzuna, G., and Korkuta, İ.,** (2015). Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Delinebilirliğinin İncelenmesi. 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul
- [13] **Megahed, H., El-Kashif, E., Shash, A.Y., and Essam, M.A.,** (2019). Effect of holding time, thickness and heat treatment on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1). 1188-1196.
- [14] **Fatahalla, N., AbuElEzz, A., and Semeida, M.,** (2009). C, Si and Ni as alloying elements to vary carbon equivalent of austenitic ductile cast iron: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 504(1-2). 81-89.
- [15] **Url-1** <<https://dokumhane.net/kutuphane/karbon-esdegerini-yanlis-hesapliyor-olabilir-misiniz>>, Erişim Tarihi 01.12.2020.
- [16] **Stefanescu, D.M., Alonso, G., Larranaga, P., and Suarez, R.,** (2016). On the stable eutectic solidification of iron–carbon–silicon alloys. *Acta Materialia*, 103. 103-114.
- [17] **da Silva, A.E., de Melo, I.N.R., Pinheiro, I.P., and da Silva, L.R.,** (2020). Characterisation and machinability of high chromium hardened white cast iron with and without the addition of niobium. *Wear*, 460. 203463.
- [18] **Sanchez-Cruz, A., Bedolla-Jacuinde, A., Guerra, F., and Mejía, I.,** (2020). Microstructural modification of a static and dynamically solidified high chromium white cast iron alloyed with vanadium. *Results in Materials*, 7. 100114.
- [19] **Liu, Z., Li, Y., Chen, X., and Hu, K.,** (2008). Microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron. *Materials Science and Engineering: A*, 486(1-2). 112-116.
- [20] **Upadhyay, S. and Saxena, K.K.,** (2020). Effect of Cu and Mo addition on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: An overview. *Materials Today: Proceedings*.
- [21] **Wang, W., Jing, T., Gao, Y., Qiao, G., and Zhao, X.,** (2007). Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes. *Journal of materials processing technology*, 182(1-3). 593-597.
- [22] **Liu, Y., Martín-Torres, M., Mei, J., Sun, W., Shao, A., and Chen, K.,** (2020). Cast a different iron: Grey and mottled cast iron production in early China. *Journal of Cultural Heritage*.

- [23] **Balachandran, G., Vadiraj, A., Kamaraj, M., and Kazuya, E.,** (2011). Mechanical and wear behavior of alloyed gray cast iron in the quenched and tempered and austempered conditions. *Materials & Design*, 32(7). 4042-4049.
- [24] **Vadiraj, A., Balachandran, G., Kamaraj, M., and Kazuya, E.,** (2011). Mechanical and wear behavior of quenched and tempered alloyed hypereutectic gray cast iron. *Materials & Design*, 32(4). 2438-2443.
- [25] **Akgül, B.,** (2018). *Gri dökme demirde kalayın (Sn) mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması* Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [26] **Demir, İ.D.K. and Uygur, İ.,** (2017). Kriyojenik İşlem Uygulanmış Dökme Demir Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1). 210-219.
- [27] **Fundições, T.,** (2005). Thermal conductivity of gray iron and compacted graphite iron used for cylinder heads. *Revista Matéria*, 10(2). 265-272.
- [28] **Bourell, D., Kruth, J.P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A.M., and Clare, A.,** (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2). 659-681.
- [29] **Özsoy, K. and Duman, B.,** (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1). 36-48.
- [30] **Duman, Ö.G.D.B. and Kayacan, M.C.,** (2016). Eklemeli İmalatta Kullanılan Stl Dosyalarının Hataları ve Onarım Yöntemleri. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu (3D-BTS), 05 - 07 Mayıs 2016. İstanbul
- [31] **Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M.C., and Duysak, A.,** (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (031). 53-70.
- [32] **Horn, T.J. and Harrysson, O.L.,** (2012). Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. *Science progress*, 95(3). 255-282.
- [33] **Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., and Barlow, J.,** (1995). Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*.
- [34] **Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S., and Basit, A.W.,** (2017). Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines. *International journal of pharmaceutics*, 529(1-2). 285-293.
- [35] **Cebeci, N.Ö. and Tokmakçioğlu, H.H.,** (2018). Protetik Diş Tedavisinde Ekleme Yöntemi ile Üretim. *Sağlık Akademisi Kastamonu*, 3(1). 66-86.

- [36] Leong, K.F., Chua, C.K., Chua, G.S., and Tan, C.H., (1998). Abrasive jet deburring of jewellery models built by stereolithography apparatus (SLA). *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3). 36-47.
- [37] Phillips, B.T., Alder, J., Bolan, G., Nagle, R.S., Redington, A., Hellebrekers, T., Borden, J., Pawlenko, N., and Licht, S., (2020). Additive manufacturing aboard a moving vessel at sea using passively stabilized stereolithography (SLA) 3D printing. *Additive Manufacturing*, 31. 100969.
- [38] Di Angelo, L., Di Stefano, P., and Marzola, A., (2017). Surface quality prediction in FDM additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9-12). 3655-3662.
- [39] Messimer, S.L., Patterson, A.E., Muna, N., Deshpande, A.P., and Rocha Pereira, T., (2018). Characterization and processing behavior of heated aluminum-polycarbonate composite build plates for the FDM additive manufacturing process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(1). 12.
- [40] Polak, R., Sedlacek, F., and Raz, K. 2017. Determination of FDM printer settings with regard to geometrical accuracy. *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*.
- [41] Bai, Y. and Williams, C.B., (2015). An exploration of binder jetting of copper. *Rapid Prototyping Journal*.
- [42] Ziaee, M. and Crane, N.B., (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28. 781-801.
- [43] Url-2 <<https://3dedi.com/blog/3d-baski-nedir.html>>, Erişim Tarihi 15.05.2021.
- [44] Snelling, D., Blount, H., Forman, C., Ramsburg, K., Wentzel, A., Williams, C., and Druschitz, A. 2013. The effects of 3D printed molds on metal castings. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- [45] Walker, J.M., Prokop, A., Lynagh, C., Vuksanovich, B., Conner, B., Rogers, K., Thiel, J., and MacDonald, E., (2019). Real-time process monitoring of core shifts during metal casting with wireless sensing and 3D sand printing. *Additive Manufacturing*, 27. 54-60.
- [46] Url-3 <<https://www.exone.com/en-US/case-studies/what-is-binder-jetting>>, Erişim Tarihi 03.03.2021.
- [47] Sama, S.R., Wang, J., and Manogharan, G., (2018). Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing. *Journal of Manufacturing Processes*, 34. 765-775.
- [48] Snelling, D.A., Williams, C.B., and Druschitz, A.P., (2019). Mechanical and material properties of castings produced via 3D printed molds. *Additive Manufacturing*, 27. 199-207.

- [49] Upadhyay, M., Sivarupan, T., and El Mansori, M., (2017). 3D printing for rapid sand casting—A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 29. 211-220.
- [50] Bhatt, H., Barot, R., Bhatt, K., Beravala, H., and Shah, J., (2014). Design optimization of feeding system and solidification simulation for cast iron. *Procedia Technology*, 14(357-364). 2nd.
- [51] Choudhari, C., Padalkar, K., Dhumal, K., Narkhede, B., and Mahajan, S. 2013. Defect free casting by using simulation software. *Applied Mechanics and Materials*.
- [52] Murat, K. and Serçe, O., (2014). Yüksek Basıncılı Döküm Prosesinde Enjeksiyon Parametrelerine Bağlı Olarak Döküm Simülasyon. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 36(5). 10-23.
- [53] Url-4 <<https://www.magmasoft.com.tr/tr/coezuemler/demir-doekuem>>, Erişim Tarihi 19.03.2021.
- [54] Iqbal, H., Sheikh, A.K., Al-Yousef, A., and Younas, M., (2012). Mold design optimization for sand casting of complex geometries using advance simulation tools. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(7). 775-785.
- [55] Kwon, H.-J. and Kwon, H.-K., (2019). Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55. 147-153.
- [56] Choudhari, C., Narkhede, B., and Mahajan, S., (2014). Casting design and simulation of cover plate using AutoCAST-X software for defect minimization with experimental validation. *Procedia Materials Science*, 6(2014). 786-797.
- [57] Norouzi, S., Shams, A., Farhangi, H., and Darvish, A., (2009). The temperature range in the simulation of residual stress and hot tearing during investment casting. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 3(10). 558-564.
- [58] Álvarez, L., Luis, C., and Puertas, I., (2004). Analysis of the influence of chemical composition on the mechanical and metallurgical properties of engine cylinder blocks in grey cast iron. *Journal of materials processing technology*, 153. 1039-1044.
- [59] Kim, Y. J., Shin, H., Park, H., and Lim, J.D., (2008). Investigation into mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI) in accordance with austempering temperature. *Materials Letters*, 62(3). 357-360.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Cem Aydın

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2010, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans (Devam Ediyor)** :2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı , Malzeme Bilimi

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- ALCAST Metal , Proje Mühendisi
- Döktaş Dökümcülük A.Ş. , Simülasyon Mühendisi