

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERDE TERMAL ANALİZ YÖNTEMİ  
İLE KARBON EŞDEĞERLİĞİNİN TAYİNİ, MİKROYAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bünyamin KURT**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet ÖZEL**

**Mayıs 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERDE TERMAL ANALİZ YÖNTEMİ  
İLE KARBON EŞDEĞERLİĞİNİN TAYİNİ, MİKROYAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ


YÜKSEK LİSANS TEZİ

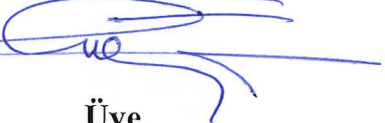
Bünyamin KURT

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 17/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Jüri Başkanı  
Prof.Dr.  
Ahmet ÖZEL

  
Üye  
Prof. Dr.  
S. Can Kurnaz

  
Üye  
Prof. Dr.  
Uğur Özsaraç

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Bünyamin KURT

17/09.2019

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ahmet ÖZEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Kutes Döküm A.Ő. çalışanlarına teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLOLAR LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
DÖKME DEMİRLER.....	7
BÖLÜM 3.	
LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER.....	9
3.1. Lamel Grafitli Dökme Demirlerde Bulunan Alaşım Elementleri.....	14
3.2. Lamel Grafitli Dökme Demirlerde Karbon Eşdeğerin Önemi.....	16
BÖLÜM 4.	
TERMAL ANALİZ YÖNTEMİ.....	18
4.1. Termal Analiz Yöntemleri.....	19
4.1.1. Termo-gravimetri (TG) .....	20
4.1.2. Diferansiyel Termal Analiz (DTA) .....	20
4.1.3. Diferansiyel Tarayıcı Kalorimetri (DSC) .....	21
4.1.4. Dilatometre (DIL) .....	21

4.2. Karbon Eşdeğerin Bulunması.....	21
4.3. Karbon Eşdeğerin Mikroyapıya Etkisi.....	22
4.4. Karbon Eşdeğerin Mekanik Özelliklere Etkisi.....	23
4.5. Aşının Karboş Eşdeğere Etkisi.....	25
4.6. Aşının Karbon Eşdeğere Etkisi.....	26
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	28
5.1. Materyal.....	28
5.2. Yöntem.....	28
5.3.Çekme Deney Raporları ve İncelenmesi.....	45
5.4. Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi.....	49
5.5. Aşılamanın Soğuma Eğrisi Üzerindeki Etkisi.....	53
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	77

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

KGDD	: Küresel grafitli dökme demir
DD	: Dökme demir
C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
Fe	: Demir
ASTM	: American society for testing and materials
N	: Newton
mm	: Milimetre
HB	: Brinell Sertlik Değeri
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
P	: Fosfor
Ni	: Nikel
Cu	: Bakır
Mo	: Molibdan
V	: Vanadyum
TGA	: Termogravimetrik Analiz
DSC	: Diferansiyel tarayıcı kalorimetri
DTA	: Diferansiyel termal analiz
TG	: Termo-gravimetri
DIL	: Dilatometre
Fe <sub>3</sub> C	: Demir Karbür
Ba	: Baryum

EGA : Çıkan gazların analizi  
EGD : Çıkan gazların tanınması  
SiO<sub>2</sub> : Silisyum oksit  
Zr : Zirkonyum



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Aşılamanın kama numunelerinde görülen ötektik hücre sayısı ve chill derinliğine etkisi, (a) Aşılamadan önce, (b) Aşılamadan hemen sonra, (c) Aşılamadan sonra döküme kadar uzun süre geçmesi nedeniyle aşırı sönümü .....	2
Şekil 1.2. Gri dökme demirde sıvı çekirdeklenmesinin az oluşu nedeniyle aşırı soğumuş grafit oluşumu .....	3
Şekil 1.3. İnce kesitli KGDD' de ötektik karbürlerin oluşumu.....	6
Şekil 1.4. Aşırı sönmesinin gri dökme demirde ötektik hücre sayısına, KGDD modül sayısına etkisi .....	6
Şekil 3.1. Lamel grafitli dökme demir yapısı.....	9
Şekil 3.2. Lamel grafitli dökme demirlerde grafit lamellerinin tipleri (AFS-ASTM) (WEB_3 2004 ) .....	11
Şekil 3.3. Lamel grafitli dökme demirlerde grafit lamellerinin boyutları (AFS-ASTM) (WEB_4 2004).....	11
Şekil 3.4. Lamel grafitli dökme demirlerde kesit kalınlığı, karbon eşdeğerliliği ve likidus sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki (Çavuşoğlu 1992) .....	16
Şekil 4.1. Termal analiz yöntemleri .....	20
Şekil 4.2. Lamel grafitli dökme demirlerde kesit kalınlığı, karbon eşdeğerliliği ve likidus sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki .....	24
Şekil 5.1. A- tipi grafit ve gri katılmış lamel grafitli dökme demirin mikroyapısı (Inoculation cast iron) .....	29
Şekil 5.2. Elde edilen çekme çubukları .....	30
Şekil 5.3. Nikon marka MA100 model optik metal mikroskobu.....	30
Şekil 5.4. Aşısız mikroyapı görüntüsü .....	31
Şekil 5.5. VP316 %0.12 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	31

Şekil 5.6.VP 316 %0.15 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	32
Şekil 5.7. VP 316 %0.20 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	32
Şekil 5.8. VP316 %0.25 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	33
Şekil 5.9. VP316 %0.30 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	33
Şekil 5.10. SB5 %0.12 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	34
Şekil 5.11. SB5 %0.15 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	34
Şekil 5.12. SB5 %0.20 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	35
Şekil 5.13. SB5 %0.25 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	35
Şekil 5.14. SB5 %0.30 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	36
Şekil 5.15. ZM6 %0.12 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	36
Şekil 5.16. ZM6 %0.15 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	37
Şekil 5.17. ZM6 %0.20 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	37
Şekil 5.18. ZM6 %0.25 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	38
Şekil 5.19. ZM6 %0.30 aşılı mikroyapı görüntüsü .....	38
Şekil 5.20. Kullanılan Atas cihazı .....	42
Şekil 5.21. Tellür içeren quickcab .....	43
Şekil 5.22. Alşa marka 30 ton'luk PLC-Hidrolik kontrollü çekme cihazı .....	46
Şekil 5.23. Değişik oranlarda kullanılan VP316 aşısının; mekanik değerlerindeki değişimi gösteren grafik .....	46
Şekil 5.24. Değişik oranlarda kullanılan SB5 aşısının; mekanik değerlerindeki değişimi gösteren grafik .....	47
Şekil 5.25. Değişik oranlarda kullanılan ZM-6 aşısının; mekanik değerlerindeki değişimi gösteren grafik .....	47
Şekil 5.26. Emcotest Duravision marka sertlik ölçme cihazı .....	50
Şekil 5.27. GG25 Malzemedede 3 Farklı tip aşının değişik oranlarda kullanılarak elde edilen sertlik değerlerinin karşılaştırılması .....	50
Şekil 5.28. GG25 Malzeme için ; farklı aşı tiplerinin %0.12 oranında kullanılmasının mekanik değerlere etkisinin grafiği .....	51
Şekil 5.29. GG25 Malzeme için ; farklı aşı tiplerinin %0.15 oranında kullanılmasının mekanik değerlere etkisinin grafiği .....	51
Şekil 5.30. GG25 Malzeme için ; farklı aşı tiplerinin %0.20 oranında kullanılmasının mekanik değerlere etkisinin grafiği .....	52

Şekil 5.31. GG25 Malzeme için ; farklı aşu tiplerinin %0.25 oranında kullanılmasının mekanik değerlere etkisinin grafiği.....	52
Şekil 5.32. GG25 Malzeme için ; farklı aşu tiplerinin %0.30 oranında kullanılmasının mekanik değerlere etkisinin grafiği.....	53
Şekil 5.33. TL-TS Karşılaştırma grafiği .....	55
Şekil 5.34. GRF1-GRF2 Karşılaştırma grafiği .....	55
Şekil 5.35. R-PÖ-GRF1-GRF2 Karşılaştırma grafiği .....	56
Şekil 5.36. S1-S2-S3-GRF1-GRF2-MQ Karşılaştırma grafiği .....	56
Şekil 5.37. Dökülen sıvı metalin zamana bağlı sıcaklık eğrisi örneği .....	57
Şekil 5.38. GG25 Aşısız soğuma eğrisi.....	58
Şekil 5.39. VP316 %0.12 soğuma eğrisi.....	59
Şekil 5.40. VP316 %0.15 soğuma eğrisi.....	60
Şekil 5.41. VP316 %0.20 soğuma eğrisi.....	61
Şekil 5.42. VP316 %0.25 soğuma eğrisi.....	62
Şekil 5.45. SB5 %0.15 soğuma eğrisi .....	65
Şekil 5.46. SB5 %0.20 soğuma eğrisi .....	66
Şekil 5.47. SB5 %0.25 soğuma eğrisi .....	67
Şekil 5.48. SB5 %0.30 soğuma eğrisi .....	68
Şekil 5.49. ZM6 %0.12 soğuma eğrisi.....	69
Şekil 5.50. ZM6 %0.15 soğuma eğrisi.....	70
Şekil 5.51. ZM6 %0.20 soğuma eğrisi.....	71
Şekil 5.52. ZM6 %0.25 soğuma eğrisi.....	72
Şekil 5.53. ZM6 %0.30 soğuma eğrisi.....	73

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Deneyde kullanılan aşıların kimyasal içerikleri.....	29
Tablo 5.2. GG 25 Standartlarında istenilen Döküm Proses şartları .....	39
Tablo 5.3. Üretilen numunenin ocakta yüklenen şarja nazaran gelmesi gereken analizi.....	40
Tablo 5.4. Üretilen numunelerin ocaktaki nihai spektral analizleri.(Alyaj atıldıktan sonra).....	40
Tablo 5.5. Ocak analizi.....	40
Tablo 5.6. Bazı FeSi esaslı aşı bileşimleri.....	41
Tablo 5.7. Deneyde kullanılan numunelerin aşı, malzeme tipleri ve kullanım miktarları .....	44
Tablo 5.8. Yapılan deney sonuçları .....	45
Tablo 5.9. Termal analiz cihazından elde edilen veriler.....	54

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Karbon eş değeri, termal analiz yöntemi, lamel grafitli dökme demirler

Bu çalışmada; termal analiz yöntemi ile dökme demirlerde karbon eş değerliğinin yeri ve önemi; mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, 3 farklı tip aşuların 5 farklı oranlarda kullanılarak ATAS termal analiz cihazıyla karbon eşdeğeri tayin edilmiş ve herbirinden çekme çubukları dökülerek çekme testi ile akma ve kopması araştırılmıştır. Gri dökme demirler, karbon eşdeğeri tayininde ‘C’ ve ‘Si’ in üçte birinin toplamının 4,3 olduğu dökme demirlerdir. Aşıdan gelecek olan ‘‘Si’’ karbon eşdeğeri üzerinde önemli bir etki yarattığı için alaşımın katılaşma sürecini de etkilediğinden karbon eşdeğeri açısından önemli yere sahiptir. Dolayısıyla aşımın tipi ,miktarı ve içeriği malzemenin de mekanik özelliklerine yansiyacaktır.Aşılama ile malzemenin karbon eşdeğerinin değiştiğini ve mikro yapıda ferrit yapıcı etkisi gösterdiğini biliyoruz. Bu araştırmada, bu etkinin hangi oranlarda nasıl olduğu araştırılmıştır.

Bunun için Atas marka termal analiz cihazı kullanılmıştır. Cihaza uyumlu 400 gr lık kapasiteli 0.8 modüllü kaplar kullanılmıştır. İndüksiyon ocaklarında eriyen ve analizi GG 25 olarak ayarlanan ocaktan kaplara ilk etapta %0.12, sonrasında %0.15, %0.20, %0,25 ve en son da %0.30 oranlarında aşular konarak karbon eşdeğeri tayin edildi. Bu çalışma esnasında her bir deneme için çekme çubukları dökülmüştür .3 farklı aşu için aynı çalışma tekrar edilerek ve aşısızla karşılaştırmak için toplamda 16 veri elde edilip, karşılaştırma yapılmıştır.

Araştırmada elde edilen bulgulara göre,malzemenin karbon eşdeğerinin sola kayması ile ferritik yapı oluşması ve bununla birlikte mekanik özelliklerinde düşme (sertlik düşük, dayanma gücü ve kopması düşük) görülürken,sağa kaymasıyla perlitik yapı oluşması ve buna bağlı olarak da mekanik özelliklerinde iyileşme(sertlik yüksek, dayanma gücü yüksek ve kopması yüksek) görülmüştür.Aşu tiplerine göre bakıldığında ise; Ba esaslı SB5 aşısı diğerlerine nazaran perlit yapıcı özelliğinin fazla olması ile mekanik özelliklerinin iyileştiği görülmektedir.

# **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CARBON EQUIVALENT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES WITH THERMAL ANALYSIS METHODS IN LAMEL GRAPHITE CAST IRON**

## **SUMMARY**

Keywords: Carbon equivalent, thermal analysis method, gray cast irons

In this study; The role and importance of carbon equivalent in cast iron by thermal analysis method and its effect on microstructure and mechanical properties were investigated. In this study, 3 different types of vaccines were used in 5 different ratios, carbon equivalent was determined by ATAS thermal analysis device and pull bars were extracted by pulling pull rods and tensile test was investigated. Gray cast irons are cast iron in the determination of carbon equivalent, where the sum of one third of carbon and silicon is 4,3. Since the silica coming from the vaccine has a significant effect on the carbon equivalent, it has an important role since it affects the solidification process of the alloy. Therefore, the type, amount and content of the vaccine will be reflected in the mechanical properties of the material. We know that the carbon equivalent of the material changes and the ferrite-forming effect in the microstructure. In this study, the effects of this effect were investigated.

Atas brand thermal analyzer is used for this purpose. In accordance with the device, 400 grams capacity, 0.8 module cups are used. The carbon equivalent was determined by adding 0.12%, 0.15%, 0.20%, 0.25% and finally 0.30% of the inoculant, which was melted in the induction furnaces and was set as GG 25. During this study, the draw rods were poured for each trial. A total of 16 data were obtained to compare the same study with the unvaccinated.

According to the findings of the study; with the carbon equivalent of the material shifting to the left, the formation of ferritic structure and the decrease in its mechanical properties (low hardness, low strength, and low rupture) were observed. However, with the carbon equivalent of the material shifting to the right, the formation of perlitic structure and consequently increase in its mechanical properties (high hardness, high strength and high breakage) were observed. According to vaccine types; mechanical properties have improved with Ba-based SB5 vaccine due to the high perlite structure compared to the others.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

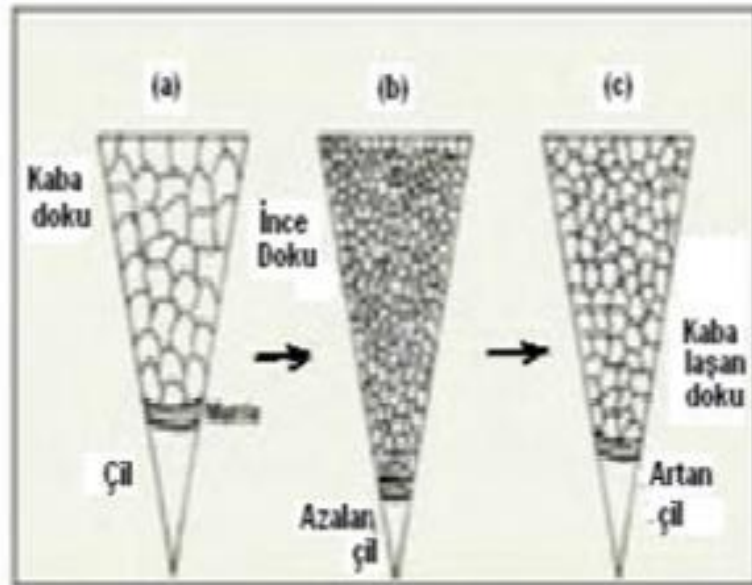
Aşılama; lamel, küresel ve ara grafitli dökme demirlerin katılaşması sırasında ötektik grafitinin gelişebileceği çekirdeklenme noktalarının sayısını arttıran işlem şeklinde tanımlanabilir. Aşılamanın temel amacı ötektik katılaşma sırasında sıvı demirin aşırı soğuma derecesini en aza indirmek, dolayısıyla nihai döküm mikroyapılarında ötektik karbürlerinin oluşmasını önlemektir. Aşılama ayrıca ötektik grafit yapısının ve dağılımının kontrolü, dolayısıyla dokudaki ferrit ve perlit düzeylerinin kontrolünde de önemli rol oynar. Lamel grafitli dökme demirlerde aşılama, zayıf grafit fazının sürekliliğini azaltarak kopma dayanımını arttırırken östenit-lamel grafit ötektiğinin hücre büyüklüğünü de düzenler. Düşük mukavemetli gri dökümlerin üretiminde kullanılan karbon eşdeğeri yüksek dökme demirlerde normal olarak aşılama yapmaya ihtiyaç yoktur, ancak 250-400 N/mm<sup>2</sup> arasında en düşük kopma dayanımı gerektiren karbon eşdeğeri düşük bileşimlerde aşılama bir zorunluluktur.

Gri (lamel grafitli) dökme demirlerde aşılama;

- Özellikle ince kesit ve köşelerdeki ötektik karbürlerinin oluşumunu önlemek,
- A tipi ince ve üniform bir grafit dağılımı sağlamak,
- Aşırı soğumuş grafit ve bundan kaynaklanan dokuda yumuşak, serbest ferrit oluşumunu önlemek için yapılır.

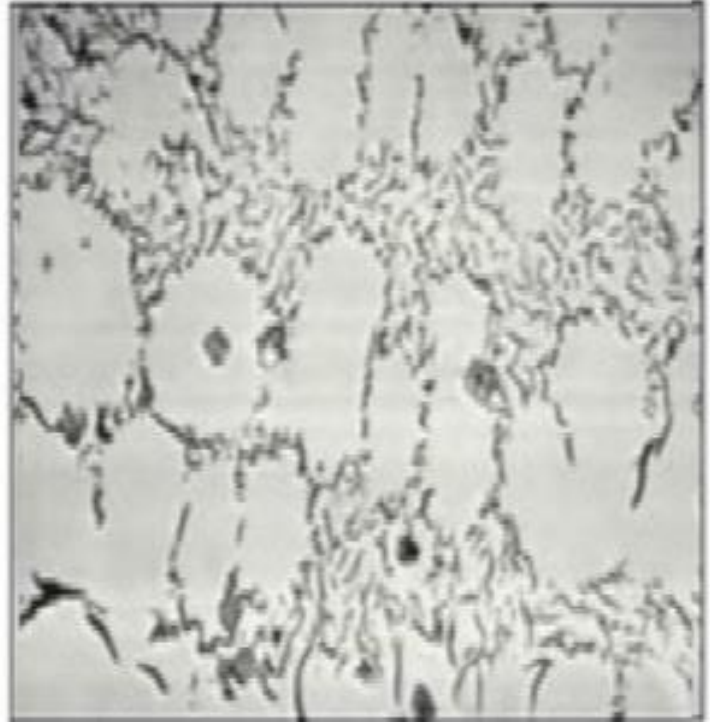
Ötektik karbürlerinin oluşumuna chill: çil adı verilir, çil döküm parçanın kullanım taşıma veya kullanım sırasında kırılma riskini arttırır, sert bölgeler meydana getirerek işlenebilirliği önemli ölçüde düşürür [1], [2].

Şekil 1.1.'de kama numuneleri kullanarak gri dökme demirde aşılamanın çil azaltma ve hücre büyüklüğünü düzenlemedeki etkileri gösterilmiştir. Aşılama ayrıca sıvı metal çekirdeklenmesinin az olduğu zaman çok daha fazla olan aşırı soğuma nedeniyle çok ince dallanmış grafitlerden meydana gelen büyük ötektik hücrelerinin oluşumunu da önlemektedir. Şekil 1.2.'de açıkça görüldüğü üzere, yüzey alanı fazla olan aşırı soğumuş grafit perlitik dokudan çok ferrit oluşumunu teşvik eder. Serbest ferrit ise mukavemet, sertlik ve aşınma dayanımını düşürür, kesici uç üzerinde parça toplanmasına neden olarak hem kesici uç ömrünü kısaltır hem de işlenmiş yüzey kalitesini düşürür [1], [3]–[5].



Şekil 1.1. Aşılamanın kama numunelerinde görülen ötektik hücre sayısı ve chill derinliğine etkisi, (a) Aşılama öncesi, (b) Aşılama sonrası, (c) Aşılama sonrası döküme kadar uzun süre geçmesi nedeniyle aşılama sonumu





Şekil 1.2. Gri dökme demirde sıvı çekirdeklenmesinin az oluşu nedeniyle aşırı soğumuş grafit oluşumu

Yüksek mukavemetli düşük karbon eşdeğerli gri dökme demir üreticileri ötektik katılaşma sonucu perlitik matriks ile A tipi grafit elde edebilmek için aşılama ihtiyacı duyarlar.

Aşılama yaklaşık 50 sene önce çil ve D tipi grafit oluşumu ile ortaya çıkan ve çekme mukavemeti başta olmak üzere mekanik değerleri kötü etkileyen ferrit oluşumunu ortadan kaldırmak üzere geliştirilmiştir [6]–[8].

Karbon eşdeğeri düştükçe sıvı içinde daha fazla östenit çökmeye başlar. Östenitler çökeler ve büyürken sıvı bunların arasında kalır ve ötektik reaksiyon bunların arasında olur. Sonuç ise daha küçük boyda ve birbirine yakın grafit kümeleri olan D tipi grafitir. Bu grafit yapısının içinde ferrit oluşmasının sebebi ise ötektoid reaksiyon yani katı fazda karbonun difüzyon mesafesinin çok kısalmış olmasıdır.

İyi bir aşılama yöntemi ve miktarı istediğimiz özellik ve yapıların elde edilmesi için faydalı olacaktır. Genel uygulamalar için Ca içeren ferrosilisyum alaşımları kullanılır

ancak ortama Ba ilavesi etkiyi çok fazla artıracaktır. Bu ilave ile ötektik hücre sayısı çok fazla artacaktır.

İlave oranı 1-3 kg/ton olarak alınabilir, fakat ani katılaşma ve kesit daralmasının yoğun olduğu parçalarda 4-5 kg/ton da kullanılabilir. Kenar sertliği problemine yatkın parçalarda ötektik kompozisyona yakın analizlerde dahi aşılama ihtiyacı olacaktır. Ötektik kompozisyona yaklaştıkça çil oluşumu rahat kontrol edilebildiği için mikro yapılar gelişecektir. Ötektiğe yakın kompozisyonlarda üretimi yapılan ve çil riski olan parçalarda da aşılama ihtiyacı duyulmaktadır. Halen kontrol ihtiyacımızı kama testi yeterince karşılamaktadır. Ötektiğe yakın kompozisyonlar aşılanmamış halde iyi özellikler gösterebilirken daha düşük karbon eşdeğerlerinde bu sağlanamayabilir. Burada söz konusu olan hangi alaşım tipi en ekonomik olarak kullanılabilir sorusudur.

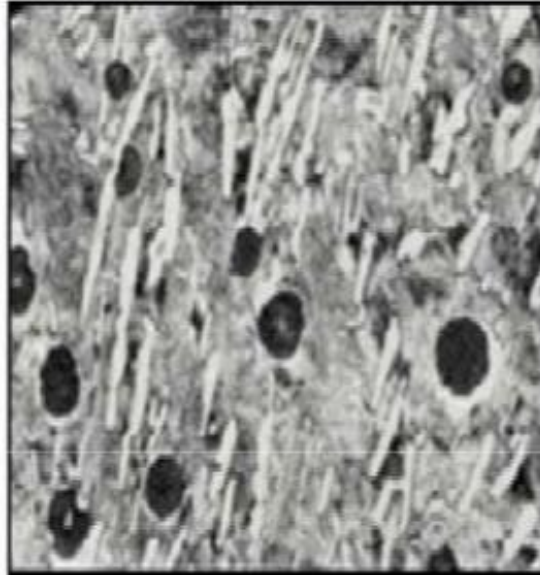
Ca, Ca+Ba ve Sr alaşımları içeren aşılama gözetimci göz önüne alındığında çil önlemede harcanan birim başına en iyi değer Sr ile görülmektedir. Şarjlarında yüksek miktarda çelik ve düşük miktarda pik kullanan dökümhanelerde aşılama ihtiyacı olacaktır. Kupolda özellikle oksijen enjekte edilenlerde oksijence zengin ve hatta kok kullanımı nedeniyle karbonca doymuş metal söz konusudur. Fakat ötektik çekirdeklenme açısından döküm hurdası, yolluk veya pik kadar zengin olmayacaktır. Dolayısıyla aslında aşılama dökümhanenin kendi yolluklarını, yüksek miktarda çeliği kullanarak ekonomi yaratması açısından öne çıkmaktadır [1], [2], [9], [10].

Eğer baz metalimizde karbon eşdeğerimiz istenilen değerlerin üzerine çıkmaya başlarsa, aşılama miktarını düşürmek gerekir. Çok yüksek karbon eşdeğeri ve aşılama metalin geç donmasını sağlayacaktır. Fazla miktarda aşılama fazla sayıda ötektik hücre oluşumu ve açığa çıkacak ısı miktarında artış demektir. Bu da kalıp duvarındaki kabuk oluşumunu geciktirecektir, grafitler çökelmeye başladığında hacmin artışı kalıp duvarını zorlayacaktır. Kalıbımız yeterince sıkı değilse veya bazı bölgeleri yumuşak kalıyorsa, buralarda hacimsel genleşme olacak ve çekintiler ortaya çıkacaktır. Aşılama kesinlikle iyi sıkışma sonucu yüksek kalıp mukavemeti ile çekintiye neden olmayacaktır. Ancak yüksek kalıp mukavemeti problemi olan

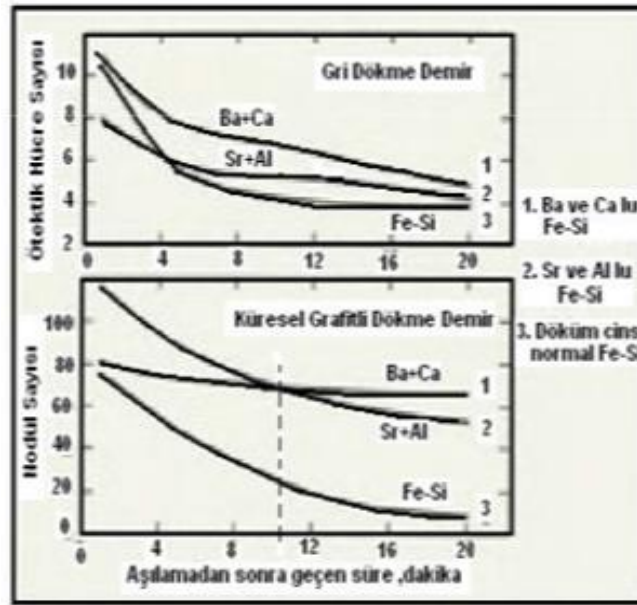
dökümlerde eğer çil riski yoksa aşılama çekintiye olmayacak noktaya azaltılmalıdır. Fakat iyi kalıp mukavemetinin sağlanması sadece çekinti değil daha birçok problemin çözümüne de yardımcı olacağı için bundan taviz verilmemesi gerekir.

KGDD' lerde ise ötektik karbürleri bütün döküm içinde hücrelerarası bölgelerde oluşma eğilimi gösterir, ancak Şekil 1.3.'te gösterildiği gibi yüksek soğuma hızları nedeniyle ince kesitlerde ya da karbürlerin segregasyonu nedeniyle kalın kesitlerde oluşma ihtimali çok daha fazladır. Ostenit ve nodül ötektik hücreleri arasındaki hücrelerarası alanlar en geç katılan alanlardır ve sıvı metalde segregasyon özelliği fazla olan mangan, krom ve niobyum, vanadyum ve titanyum gibi karbür yapıcı iz elementler bu bölgelerde birikir. Aşılamanın hücrelerarası karbürlerin oluşumunu önleyecek ve aynı zamanda yüksek bir küreselleşme sağlayacak şekilde yeterli sayıda grafit nodülü oluşturması gerekir. Nodül sayısı az ve bu nodüller iri olduğu zaman, küreselleşme de azalır [1], [2], [5], [9]–[11].

Ne yazık ki aşılama işlemlerinin etkileri geçicidir ve aşılama metal dökümden önce potada fazla bekletildiği zaman bu etkileri azalır. Buna “aşılama sönümü” adı verilmektedir. Şekil 1.1.(c)' de gösterildiği gibi, lamel grafitli dökme demirlerde bu sönüm (aşılama kaybı) daha fazla çil oluşmasına ve ötektik hücrelerin büyüyerek mukavemeti düşürmesine yol açmaktadır. En çok kullanılan üç tip aşılama malzemesinin gri ve küresel grafitli dökme demirlerdeki aşılama etkileri Şekil 1.4.'te özetlenmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, her üç aşılama da her iki malzeme üzerindeki etkisi aşılamanın hemen sonrasında en üst düzeydedir. KGDD lerde nodül sayısının süreye bağlı olarak azalması dokuda daha az ferrit ve daha çok perlit oluşmasına yol açar. Hem buharlaşma ile magnezyum kaybı hem de aşılama sönümü olması yüzünden KGDD üretimi için işlem görmüş metalin bekletilmesi sırasında aşılama sönümü çok daha ciddi bir sorundur. Metal çok uzun bir süre herhangi bir önlem alınmadan bekletilirse, küreselliği düşük grafit yüzünden dökümlerin tamamı sakata ayrılabilir.



Şekil 1.3. İnce kesitli KGDD' de ötektik karbürlerin oluşumu



Şekil 1.4. Aşı sönmesinin gri dökme demirde ötektik hücre sayısına, KGDD modül sayısına etkisi

Aşı sönümünün bu olumsuz etkilerini azaltabilmek için döküm aşılama işleminden sonra mümkün en kısa sürede bitirilmelidir, ancak üretim şartlarında bu her zaman sağlanamamaktadır. Gri ve KGDD lerde aşı sönümü sorunları, daha az sönüm gösteren aşılama geliştirilmesi, döküm sırasında veya kalıp içi aşılama son aşılama teknikleri hep bu nedenle araştırılmıştır ve hala başlıca Ar-Ge ve tretman teknolojisi geliştirme alanı olmaya devam etmektedir [1], [5], [7], [8], [12].

## **BÖLÜM 2. DÖKME DEMİRLER**

Teoride %2,06 C' den daha fazla C içeren Fe-C alaşımlarına dökme demir denilmektedir. Dökme demir malzemeler; dayanım, sertlik, işlenebilirlik, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi iyi mekanik özellikler göstermelerinin yanında kolay üretilebilmeleri ve ekonomik olmalarından dolayı sıklıkla kullanılan mühendislik malzemelerinin başında gelmektedir.

Dökme demir malzemelerin üretiminde ilk gelişme; aşılama yönteminin uygulanmasıyla lamel grafitli dökme demirlerin (gri, pik dökme demirlerin) üretilmesi olmuştur. 1950'li yılların ortalarında ise magnezyum ve seryum alaşım elementleri ilavesi ile grafitlerin lamel şeklinden küresel şekle dönüşmesi sağlanıp, lamel grafitli dökme demirlerden yaklaşık iki kat daha mukavemetli küresel grafitli dökme demirler (sfero, düktil, nodüler dökme demirler) elde edilmiştir. Özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini daha da iyileştirmenin yolları aranmış ve bu amaçla matriksin modifikasyonunu geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaya başlanmıştır (ostemperleme ısı işlemi gibi).

Kullanım yerlerine göre uygun dökme demir malzemesinin seçilmesi önemli olmakla birlikte günümüzde dökme demir endüstrisinin en büyük tonaja sahip ürünü lamel grafitli dökme demirler olup, dökülen parçaların %70'ini kapsamaktadır. Lamel grafitli dökme demirler, geniş aralıkta değişen dayanım, sertlik, işlenebilirlik, aşınma direnci, korozyon direnci, titreşim sönümlenme, termal şok direnci gibi özelliklere sahip malzemelerdir. Ne var ki, lamel grafitli dökme demirlerde grafitlerin lamel şeklinde bulunuşu bazı özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir (süneklik özelliğinin yetersiz olması gibi). Bununla birlikte metalurjik uygulamalardaki

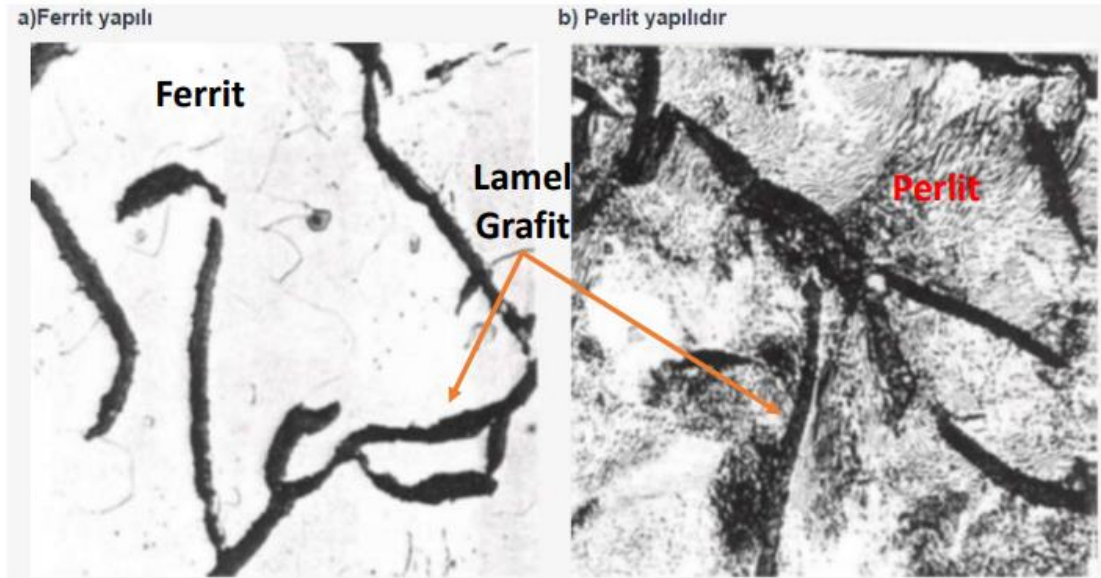
gelişmeler lamel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini iyileştirme imkanını sağlamıştır.

Günümüzde sac, köşebent, lama, çeşitli profiller (I, U, T, H gibi), inşaat demiri gibi mamullerin üretiminin gerçekleştirildiği yaygın imal usullerinden olan haddelemeyi sağlayan hadde merdanelerinin malzemesi olarak sıklıkla dökme demir malzemeler kullanılmakta olup, hadde merdanesi dökümünde uygulanan yöntemlerle istenen içyapı, sertlik, yüzey kalitesi, aşınma direnci gibi özellikler sağlanabilmektedir.

İlk hadde merdaneleri, dökülebilirliği ve geniş alaşım aralığı nedeniyle dökme demirlerden imal edilmiştir. Daha sonraları uygulanan ısıt işlemlerle merdanelerin sertleştirilmeleri sağlanmıştır. Kalıp tekniğinde ulaşılan gelişmeler, merdane tasarımındaki değişimler, merdanelerde yüzey sertliği gereksinimi ve hızlı soğutma ile içyapı matriksinin değişiminin sağlanması ve uygulanan ısıt işlemlerle istenen özelliklerde ve güvenilir merdane üretimleri gerçekleştirilmeye başlamıştır. Özellikle farklı alaşım elementlerinin dökme demirlere kazandırdığı farklı özellikler sayesinde hadde merdanelerinin kırılma, yorulma, aşınma gibi problemleri çözümlenmeye başlamıştır [1]–[8], [12]–[14].

### BÖLÜM 3. LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Katılaştıktan sonra bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest grafit yaprakları halinde bulunan bir dökme demir çeşididir. Kırıldığı zaman yüzeyi isli gri görünümlüdür. Grafitten dolayı rengi esmer olan bu dökme demire lamel grafitli dökme demir veya gri dökme demir denir. • Bileşiminde yaklaşık olarak %2,5-5 arasında C ve %0,8-3 arasında Si içeren lamel grafitli dökme demirlerde grafit yaprakları şeklinde ortaya çıkan lamel grafitler hem yük taşıyan kesitlerin küçülmesi hem de çentik etkisi yaratmasından dolayı dayanımları düşüktür. • Lamel grafitli dökme demir mikroskopla incelendiğinde, yapısı içinde dağılmış grafit yaprakları görülür. Bu grafit yapraklar, kalın kesitli döküm parçaların yapısında gözle bile görülebilir özelliktedir. Lamel grafitli dökme demir mikroskopla incelendiğinde görülen yapı Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Lamel grafitli dökme demir yapısı

Lamel grafitli dökme demirler, piyasada %70'lik kullanım oranıyla en yaygın kullanılan dökme demir türüdür. Katılaşmadan sonra, içerdiği karbonun büyük kısmı serbest halde veya başka bir deyişle grafit lamelleri halinde bulunacak şekilde bir bileşime sahip dökme demir türüdür. Lamel grafitli dökme demirin kırık yüzeyi gri renktedir [11], [15]. Bu nedenle piyasada yaygın olarak gri dökme demirler olarak bilinmektedir.

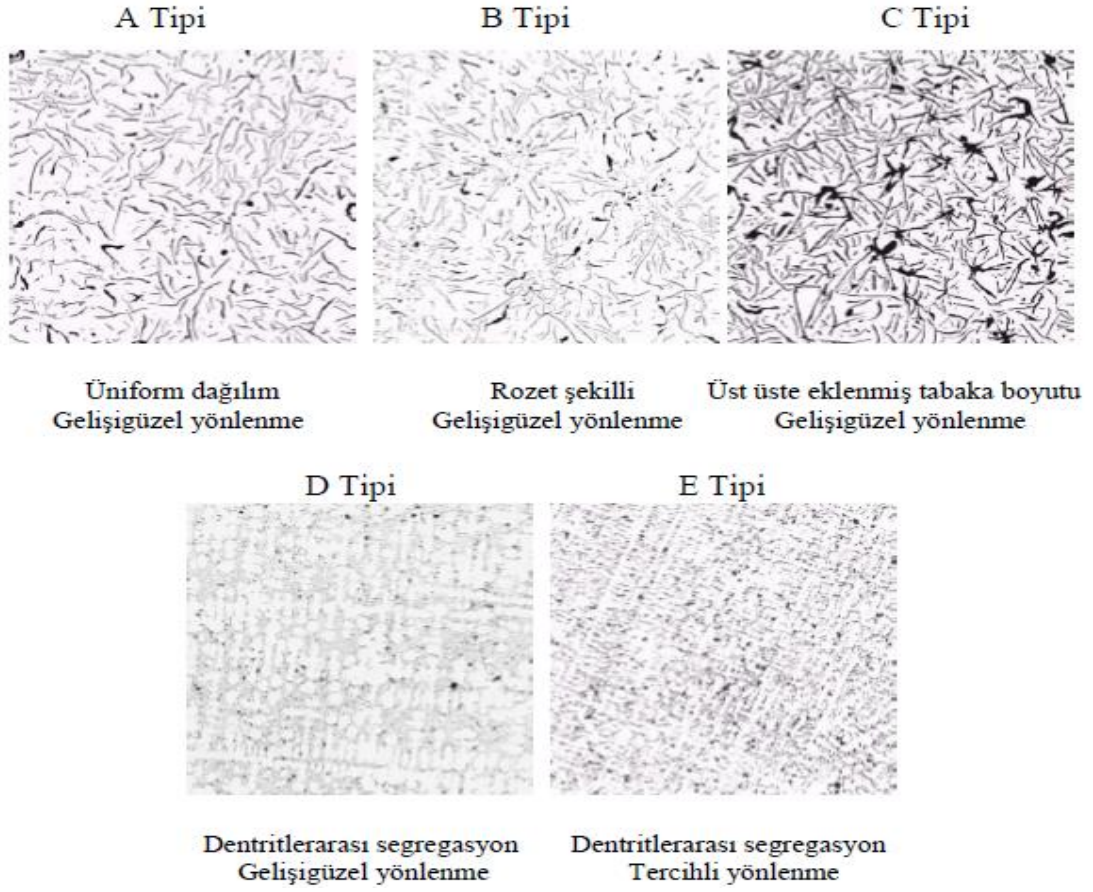
Lamel grafitli dökme demirler, ötektik sıcaklığında ostenitin katı eriyik olarak içerebileceğinden daha fazla karbonu olan demir-karbon-silisyum alaşımlarıdır. Bileşimdeki bu fazla karbon yapıda grafit lamelleri halinde çökelmektedir [11]. Lamel grafitli dökme demirler genellikle %1,7-4,5 C ve %1-3 Si içerirler [11], [15]. Bununla birlikte arzulan mikroyapıya göre değişen oranlarda mangan (ferritik dökme demirlerde %0,1'e kadar düşük, perlitik dökme demirlerde ise %1,2'ye kadar yüksek miktarlarda olabilir) içerirler. Döküm yapısı ve grafit morfolojisi lamel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Grafit-ferrit karışımı bir mikroyapı, en düşük mukavemetli dökme demiri verirken karbon miktarının artmasına bağlı olarak mukavemet ve sertlikte de artma görülür [11], [16].

Enerji tasarrufu nedeniyle parça ağırlığının azaltılması yönünde bir eğilimin olduğu günümüzde, dökülen parçanın tüm kesitlerinde mekanik özelliklerin istenilen değerleri sağlayabilmesi gerekir. Bu nedenle kullanıcılar, ağırlığı azaltacak şekilde tasarlanmış bir parçadaki grafit tipinin mümkün olduğunca homojen olması konusunda oldukça ısrarcı olabiliyorlar. Dökülen parçanın kritik bir bölgesinde istenmeyen bir grafit tipinin ortaya çıkması, parçanın mekanik özelliklerinde ciddi bir gerilemeye yol açabilir. Bu nedenle kullanıcıların siparişlerinde sadece GG-25 şeklinde dökülecek dökme demirin türünü değil, ayrıca grafit tipini de net bir şekilde belirttikleri görülebilir.

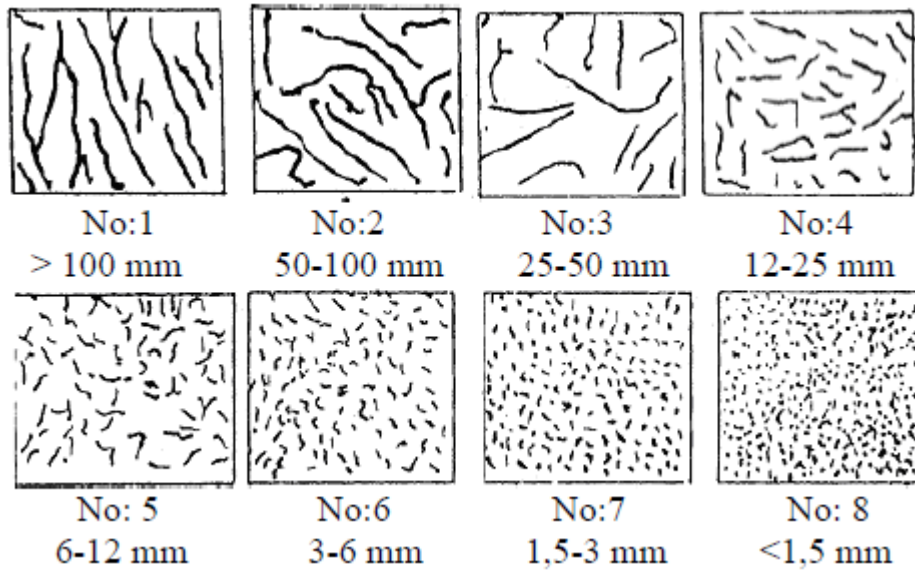
Lamel grafitli (gri) dökme demirlerde grafitin şekli ve yapısı alaşımın mekanik özellikleri üzerine önemli bir rol oynamaktadır. Grafit lamellerinin şekli, boyutu ve dağılımı katılaşma esnasında oluşur ve daha sonra herhangi bir ısıl işlem ile değiştirilmez [11], [17]. Grafit tipleri ve boyutları arasındaki farklılıklar incelenmiş,



ASTM ve AFS tarafından kabul edilen standartlarla belirlenmiştir (Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.).



Şekil 3.2. Lamel grafitli dökme demirlerde grafit lamellerinin tipleri (AFS-ASTM) (WEB\_3 2004 )



Şekil 3.3. Lamel grafitli dökme demirlerde grafit lamellerinin boyutları (AFS-ASTM) (WEB\_4 2004)

A tipi grafitler, orta hızlarda soğuyan aşılansmış dökme demirlerde bulunur ve gri dökme demirlerde genel olarak gelişi güzel yönlenmiş ve üniform dağılmış bu tip lameller tercih edilir. Ergitme ve aşılama uygun yapıldığında istenen boyutta A tipi grafitlerin elde edilmesi mümkündür. A tipi grafit, yapıda homojen olarak dağılmış ve rastgele yönelmiş yapraklar halinde ortaya çıkar. Soğuma hızının çok yüksek olmadığı ve doğru bir şekilde aşılansmış dökme demirlerde grafitin A tipine sahip şekilde oluştuğu görülür. Bu nedenle, bu grafit türünün ortaya çıktığı dökme demirlerde aşırı soğumanın da oldukça düşük seviyelerde olduğu gözlemlenir. A-tipi grafitin, sağladığı yüksek mekanik özellikler nedeniyle, çoğu durumda dökme demirin yapısında istenen grafit tipi olduğunu söylenebilir.

B tipi grafitler ötektik bileşime yakın dökme demirlerde düşük soğuma hızlarında görülür ve sınırlı sayıdaki çekirdek üzerinde katılaşır. Bu tip grafitler daha çok ferritik matriks içerisinde oluşan rozet şekilli ve gelişi güzel yönlenmeye sahip grafitlerdir ve yüksek mukavemet istenen durumlar için ideal değildir. Çiçeksi grafit (rosette graphite) adı da verilen bu grafit tipi, ötektik kompozisyona sahip dökme demirlerde, A tipi grafitte kıyasla biraz daha fazla aşırı soğumanın gerçekleştiği durumlarda ortaya çıkar. Nispeten hızlı soğuma koşullarında ortaya çıkan bu grafit tipini, genellikle ince kesitlerde ya da kalın kesitli parçaların yüzeyine yakın bölgelerde görülür. Zaman zaman, aşılamanın verimsiz olduğu durumlarda da B tipi grafit oluşabilir.

C tipindeki grafitler ise ötektik üstü demirlerde minimum soğuma hızına sahip bir katılaşma sonucu meydana gelir. C tipi grafitler termal şok mukavemetine sahiptir ancak düşük dayanım ve işleme sonrası kaba bir yüzey verir. Kış grafit (kish graphite) adı da verilen C tipi, sadece karbon eşdeğerinin çok yüksek olduğu, ötektik üstü (hiperötektik) dökme demirlerde ortaya çıkar. Birincil katılaşma sırasında çökelen bu grafit tipi oluşurken, yine oldukça düşük miktarlarda aşırı soğuma gerekmektedir. Büyük ve kalın tabaka yapısına sahip bu grafit türü dökme demirin mekanik özelliklerini olumsuz şekilde etkilediği gibi, işleme sonrasında pürüzlü bir yüzey oluşmasına da neden olabilir. Grafit miktarının fazla olması nedeniyle dökme

demire yüksek ısı iletkenliği sağlayan bu grafit tipi, bu özelliği nedeniyle yüksek ısı iletimi istenen uygulamalarda tercih edilir.

D tipi grafitler genellikle yüksek silisyum içeriğine sahip ve yüksek soğuma hızlarında katılaşmış ötektik altı veya ötektik dökme demirlerde görölmektedir. İyi işlenebilme özelliğine karşın, düşük mukavemet ve düşük aşınma direnci göstermesi dezavantajdır.

E tipi grafitler ise sıklıkla karbon oranı düşük ötektik altı dökme demirlerde görülür, böyle bir durumda grafitlerde tercihli bir yönlenme görülür.

D ve E tipi grafitler katılaşma sırasındaki yüksek soğuma hızlarıyla alakalıdır. Daha fazla bir aşırı soğuma gerçekleşmesi ise çekirdekleşme ve grafitleşmeyi önleyebilir ve bu durumda beyaz dökme demir meydana gelir. Dökme demirin katılaşma esnasındaki soğuma hızına ve/veya sonradan gördüğü işlemlere göre yukarıda bahsedilen grafit tiplerinden herhangi biri oluşabilir. Grafit tipiyle birlikte grafit boyutu da mekanik özellikleri etkileyen önemli bir faktördür. Grafit boyutu doğrudan dayanım ile ilgili bir parametredir. Lamel grafit boyutunun artması ile lamel grafitli dökme demirlerin çekme dayanımı düşüş gösterir [11], [17]. Her iki grafit yapısı da, karbür (sementit) oluşturacak derecede olmasa da, aşırı soğumanın nispeten fazla olduğu durumlarda ortaya çıkar. Dendritler arası bölgede kümelenmiş şekilde gözlemlediğimiz bu grafit yaprakları, D tipinde rastgele yönelime sahip olarak, E tipinde ise belli bir doğrultuda yönelmiş olarak bulunuyorlar. Dökme demir yapısında fazla alüminyum ya da titanyum bulunmasının bu grafit tiplerinin oluşumuna yardımcı olduğunu biliyoruz. Bu kadar ince ve dallanmış grafit yaprakları oluştuğu zaman karbonun difüzyon mesafeleri kısıtlandığı için, bu grafit tipleri ortaya çıktığında matrisin genellikle sadece ferrit yapısı sergilediği görülür.

Lamel grafitli dökme demirlerin sürtünme ve aşınma dirençleri çok yüksektir. Bu nedenle piston segmanları, silindir gömlekleri, krank milleri, dişliler, hadde merdaneleri gibi parçaların üretiminde kullanılırlar [17]. Bununla birlikte lamel grafitli dökme demirler en iyi işlenebilen demir esaslı alaşımlardır. Fakat çil etkisi ile

sertleşen kenarlar veya ince kesitlerdeki sert noktalar işlenebilirlik özelliğini çok azaltan etkilidir [11], [15].

Lamel grafitli dökme demirler ötektik bileşime yakın alaşımlardır ve bu nedenle akışkanlıkları oldukça iyidir. Bu avantajından dolayı çok ince kesitli parçaların bile dökülmesi mümkündür. Lamel grafitli dökme demirlerde basma dayanımı çekme dayanımının genellikle 3-5 katı kadardır. Yüksek basma dayanımı, lamel grafitli dökme demirlerin önemli özelliklerindedir. Lamel grafitli dökme demirlerde sertlik çekme dayanımına paralel olarak değişim gösterir. Çekme dayanımı ile sertlik arasındaki ilişkiyi bir bağıntı ile ifade etmek mümkündür [11].

Çekme Dayanımı (N/mm<sup>2</sup>) = Brinell Sertlik Değeri (HB)×K

Burada K = 1,1 ile 1,5 arasında değişmektedir.

### 3.1. Lamel Grafitli Dökme Demirlerde Bulunan Alaşım Elementleri

Lamel grafitli dökme demir, aslında sadece demir ve karbonun alaşımlanmasıyla elde edilebiliyor. Fakat sanayide dökülen dökme demirlere baktığımızda, yapıda bu iki element dışında birçok farklı element de bulunmaktadır.

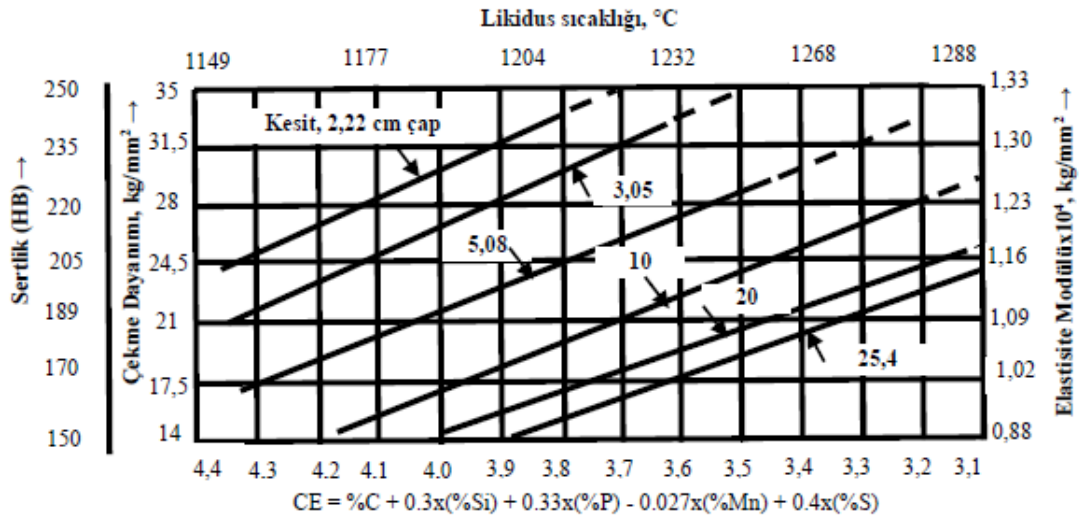
- Silisyum (Si): Silisyum, sıvı dökme demirin akışkanlığını arttırdığı gibi, karbon eşdeğeri üzerinde önemli bir etki yarattığı için alaşımın katılaşma sürecini de etkiler.
- Kükürt (S): Silisyumun aksine kükürt kuvvetli bir karbür yapıcı etkiye sahiptir. Lamel grafitli dökme demirlerde yaklaşık %0.06 – %0.18 aralığında bulunabilen kükürt, daha yüksek olması durumunda aynı zamanda demirle birleşerek FeS bileşiğinin sert ve kırılğan bir yapıya sahip olan beyaz dökme demir oluşumunu tetikleyebiliyor. Düşük erime noktasına sahip olan bu bileşiğin, yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalarda çatlak oluşmasına yol açabilmesi nedeniyle, dökme demirin yapısında bulunması tercih edilmez.
- Mangan (Mn): Manganın, tıpkı nikel gibi, oldukça kuvvetli bir östenit yapıcı etkisi vardır. Genellikle yapıda düşük miktarda bulunan mangan, fazla olması

durumunda birincil grafitleşmeyi de bir derece erteleyebiliyor. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi mangan, esas olarak yapıda bulunan kükürtün olumsuz etkilerini ortadan kaldırması için eklenir. Kükürtü dengeleyecek miktarın üzerinde mangan eklenmesi durumunda yapıdaki karbür miktarında artış gözlemlendiği görülebilir.

- Fosfor (P): Fosfor bir yandan sıvının akışkanlığını arttırırken, aynı zamanda ötektik katılma aralığını da genişletecek şekilde bir etki ortaya çıkartıyor. Fakat fosfor ne kadar yüksekse o kadar iyi anlamına da gelmez. Fosfor, demirle birleşerek demir fosfür (Fe<sub>3</sub>P) bileşimini oluşturabilir. Oluşan bu bileşik, sementit ve östenitle üçlü bir ötektik oluşturup, steadit (İngilizce: steadite) adını verdiğimiz, kırılğan yapıya sahip bir fazın ortaya çıkmasına yol açabilir.
- Nikel (Ni): Nikel de dökme demirin yapısında bulunan önemli elementlerden bir tanesidir. Hem perlit yapısını, hem de grafit yapısını inceltici bir etkiye sahip olan nikel, dökme demirin tokluğunu arttırdığı gibi, farklı kesitler arasındaki sertlik farklarını da ortadan kaldırıyor. Kuvvetli bir östenit yapıcı olan nikel, yüksek oranda eklendiğinde dökme demirin östenitik yapıda katılmasını sağlıyor.
- Krom (Cr): Kuvvetli bir karbür yapıcı olan krom, az miktarda eklendiğinde bile yapıdaki grafit miktarını azaltıp, çil oluşumunu tetikleyecek bir etki yaratabilir.
- Bakır (Cu): Sıvı dökme demir içine ocakta ya da potada %0.5 – %2.5 oranında eklenen bakır çili azalttığı gibi, grafit yapısını incelten ve sıvının akışkanlığını arttıran bir etki de bulunur.
- Molibden (Mo): Karbür yapıcı bir etkisi olan molibden, aynı zamanda hem grafit yapısını, hem de perlitik yapıyı inceltici bir etki ortaya çıkartıyor. Dökme demirlere %0.3 – %1 aralığında eklenen molibden, genellikle alaşımın sertliğini arttırmak için bakır, nikel ve krom ile birlikte kullanılıyor.
- Vanadyum (V): Karbür yapıcı bir etkisi olan vanadyum, dökme demirin sertliğini ve aşınma direncini arttırmak için %0.15 – %0.5 oranında eklenebilir [4], [7], [8], [15], [18]–[20].

### 3.2. Lamel Grafitli Dökme Demirlerde Karbon Eşdeğerinin Önemi

Karbon ve silisyum mekanik özellikleri etkileyen başlıca elementlerdir. Karbon eşdeğerliliği ile birçok mekanik özellik arasında çeşitli ilişkiler geliştirilmiştir. Kesit kalınlığı, karbon eşdeğerliliği ve likidüs sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki şematik olarak Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Lamel grafitli dökme demirlerde kesit kalınlığı, karbon eşdeğerliliği ve likidüs sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki (Çavuşoğlu 1992)

Bir dökme demir kompozisyonunun, ötektik noktaya kıyasla nerede bulunduğunu değerlendirmek için karbon eşdeğerinden faydalanılır. Alaşımında bulunan bazı elementler, dökme demirin sıvılaşma (likidüs) sıcaklığını, dolayısıyla da ötektik noktanın konumunu tıpkı karbon gibi etkileyebilmektedirler. En dikkate değer etkiyi yaratan elementler ise silisyum ve fosfordur. Her iki element de ötektik noktanın denge faz diyagramı üzerinde bir miktar sola doğru kaymasına yol açarlar. Diğer bir deyişle, ötektiğin içerdiği karbon miktarının azalmasına sebebiyet veriyorlar. Silisyum, örneğin, sıvılaşma (likidüs) sıcaklığı üzerinde karbona kıyasla 1/4 oranında bir etki yaratırken, fosfor karbonun yarattığı etkinin yarısı kadar bir etki ortaya çıkartıyor. Yani, dökme demirdeki silisyum miktarını %0,8 arttırmak, aslında karbon miktarını %0,2 arttırmakla aynı işleme denk gelmektedir. Benzer şekilde, fosfor miktarını %0,04 arttırdığımız zaman, sıvılaşma sıcaklığı sanki karbon %0,02 artmış gibi etkilenir. Kompozisyonun ötektik noktadan ne kadar uzakta olduğunu bilmemiz,

birçok döküm hatasından korunabilmemiz için büyük önem taşımaktadır. Örneğin karbon eşdeğerini doğru analiz edemez de ötektik üstü (hiperötektik) bir kompozisyon dökerseniz, küresel grafitli dökme demirde karbon yüzmesi sorununa ortaya çıkabilir, lamel grafitli dökme demirde ise kiş (Kish) grafit (C tipi grafit) oluşumunu tetikleyerek, işlem sonunda malzemenin pürüzlü bir yüzey sergilemesine yol açabilir.

Lamel grafitli dökme demirlerde karbon eşdeğerliliğinin azalmasıyla çekme dayanımının maksimum artış sınırı 310 N/mm<sup>2</sup> kadardır. Daha yüksek mukavemet elde edebilmek için alaşım elementi ilavesi gereklidir. Sertlik ve çekme dayanımı arasındaki ilişkiye grafit lamel tipinin büyük etkisi vardır. Verilen bir sertlik değeri için en yüksek çekme dayanımı, küçük A tipi grafitler bulunduğu elde edilir. Diğer yandan verilen bir sertlik değeri için D tipi grafit lamelleri ile düşük bir çekme dayanımı elde edilecektir [11], [15], [17].

## BÖLÜM 4. TERMAL ANALİZ YÖNTEMİ

Döküm süreçleriyle üretilen parçalarda mikroyapı kontrolü, parçanın istenilen özelliklere sahip olmasını sağlayabilmek açısından büyük önem taşımaktadır. Katılma sırasında mikroyapı oluşumu birçok farklı süreç tarafından kontrol edilmesi nedeniyle, oldukça karmaşık bir doğaya sahiptir. Örnek olarak parça ve kalıp arasındaki ısı transferi, sıvı içindeki sıcaklık eğimi (gradyanı) katı fazın çekirdeklenme ve büyüme süreçlerinin hızı ya da kompozisyondaki dalgalanmalar gibi birçok etken katılma sonrasında ortaya çıkan mikroyapı özelliklerini, dolayısıyla da döküm parçanın özelliklerini önemli derecede etkilemektedir [10], [21]–[25].

Döküm parçaların kalitesini ocak başında kontrol etme imkânı sunan, güvenilir bir araç olması nedeniyle termal analiz yöntemi, dökümhanelerde uzun bir süredir kullanılmaktadır [23]–[25]. Döküm sırasında, içinde bir termokupl bulunan ufak bir kap içine alınan bir numunenin soğuma eğrisinden alınan veri sayesinde, alaşımın sıvılaşıma (likidus), ötektik başlangıç ve katılma sonu sıcaklıkları tayin edilebilmekte, ilerleyen sayfalarda ayrıntılı olarak ele alınacak olan karbon eşdeğeri ve doymunluk derecesi kavramları sayesinde, dökülen parçanın kompozisyonu hassas bir şekilde kontrol edilebilmekte aynı zamanda dökülen parçanın mikroyapısı ve bazı yapısal özellikleri hakkında da bilgi edinilebilmektedir [4], [24].

Termal analiz, en genel şekliyle, sıcaklığa bağlı olarak malzemelerin özelliklerinde meydana gelen değişimleri inceleyen, malzeme biliminin bir branşı olarak tanımlanmaktadır. Farklı termal analiz yöntemlerinde, sıcaklıktaki değişimlere bağlı olarak birçok farklı özelliğin takibi yapılabilir. Örnek olarak enerji değişimlerinin takip edildiği yöntemler (DTA, DSC ve soğuma eğrisi analizi gibi),



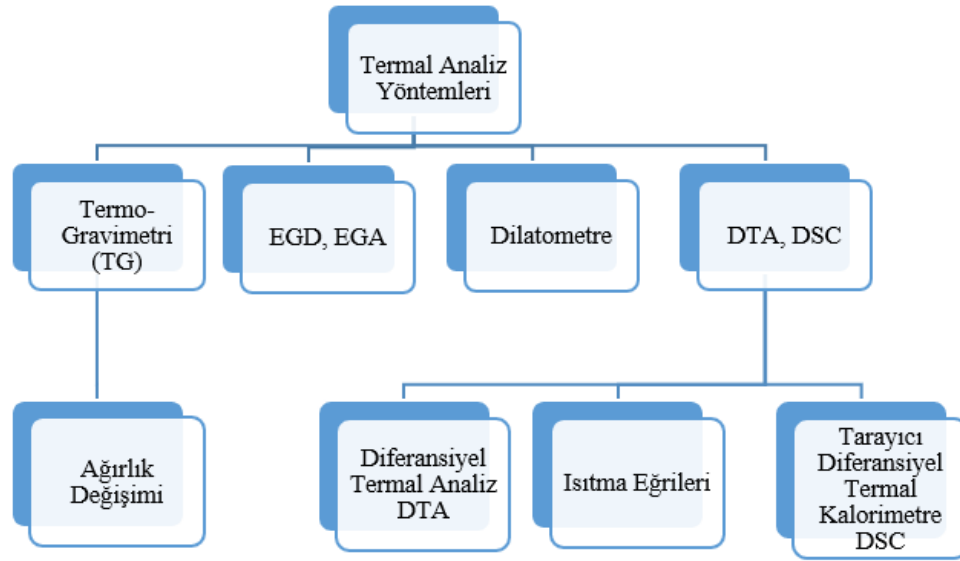
boyutsal özelliklerin takip edildiği yöntemler (dilatometri gibi), ya da ağırlık değişimlerinin takip edildiği yöntemler (TGA gibi) gösterilebilir. Termal analiz cihazından elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.33. ile Şekil 5.36. arasındaki şekillerde gösterilmiştir.

#### **4.1. Termal Analiz Yöntemleri**

Termal analiz; sıcaklık değişmesine karşı bir katı maddenin fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda özelliklerindeki değişimlerin ölçülmesi ve yorumlanmasıdır. Sıcaklığa bağlı değişkenin ne olduğuna (enerji, ağırlık, boyut vs.) bakılmaksızın ölçüm yapılır. Malzemede sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen dönüşümler:

- Faz dönüşümleri
- Ergime
- Sublimasyon
- Termal parçalanma
- Cam geçişleri
- Oksitlenme
- Redüklenme
- Boyutsal değişimlerdir.

Termal analiz yöntemleri Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 4.1. Termal analiz yöntemleri

#### 4.1.1. Termo-gravimetri (TG)

Bir maddenin değişik şartlarda kütleini koruyabilme kabiliyetini (termalstabilite) incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Termo-gravimetrinin esası, bir maddenin sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen reaksiyonların, kütleindeki değişimlerin özel bir terazide sürekli olarak tartılması yardımı ile incelenmesidir. Bu gibi cihazlara da Termo-balans denilmektedir. Kısaca, termo-gravimetrik analiz (TG), numunenin kütleindeki değişmeyi sıcaklığın fonksiyonu olarak kaydeden bir tekniktir.

#### 4.1.2. Diferansiyel termal analiz (DTA)

Bu yöntemde numune ve termal olarak inert( $\alpha$ - $Al_2O_3$ ) olan referans maddeye aynı sıcaklık programı uygulanır. İkisi arasındaki fark, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülür. Bu iki madde birlikte ısıtılır ve sıcaklık lineer bir şekilde artırılır. TG deki gibi sadece kütle kaybına bağımlı olmadığı için daha geniş bir kullanım alanı vardır.

### 4.1.3. Diferansiyel Tarayıcı kalorimetri (DSC)

Fırının içinde ısı, ileten bir plaka/levha üzerine simetrik olarak orta noktada numune ve inert bir referans malzemesi yerleştirilmiştir. Termal benzer davranışta ısı akışı fırından numuneye doğru ( $dQFS/dt$ ) ve referans malzemesi için ( $dQFR/dt$ ) mükemmel derecede eşittir, ikisi arasında ölçülebilir bir sıcaklık farkı TSR yoktur. Şayet numunede bir reaksiyon ısıya ihtiyaç duyar veya ısı açığa çıkarırsa, bir sıcaklık farkı meydana gelir. Bu ısı akışı, denge dışı durumu eşitlemeye çalışır. Tüm katı malzemelerin faz durumlarında değişikliklerin belirlenmesi için kullanılabilir. Yanma, buharlaşma ve süblimleşme entalpilerinin bulunması, kozmetik ürünlerin saflık derecesinin belirlenmesi, teknolojik önemi olan malzemelerin ısı kapasitelerinin tespit edilmesi ve camların faz dönüşüm sıcaklıklarının Tg ve cam dönüşüm entalpilerinin belirlenmesinde kullanılır. DTA ile DSC arasındaki fark, DSC, DTA'ya göre daha ayrıntılı bilgi vermekte ve sıcaklık dengelemesi yerine numunedeki enerji değişimleri göz önüne alınmaktadır.

### 4.1.4. Dilatometre (DIL)

Dilatometre, katıların sıcaklığa bağlı olarak uzama veya çekmelerin (büzülme) analitik ölçümü için kullanılan bir metottur. Farklı malzemelerin genleşme katsayısını belirlemek amacıyla uzun yıllardır kullanılan bir prosestir. İlk zamanlar proses metallerin uzama veya çekme davranışının belirlenmesi için kullanılırken son zamanlarda seramik malzemelerin sinter prosesi sırasındaki büzülmelerin incelenmesinde kullanılmaktadır. Prensip olarak bir numune çubuğunun sıcaklık değişimi esnasındaki genleşme ölçülür.

## 4.2. Karbon Eşdeğerin Bulunması

Dökme demir, teorik olarak, saf demir ve saf karbonun aşılmasıyla da elde edilebilir. Bu iki saf malzemenin alaşımlanmasıyla elde edilen bir dökme demirde ötektik kompozisyonun tam olarak %4.3'e denk gelmesi gerektiği denge faz diyagramından anlaşılır. Fakat dökümhanelerde üretilen dökme demirlerin

kompozisyonlarına baktığımızda demir ve karbona ek olarak silisyum, mangan, fosfor, kükürt, nikel ve magnezyum gibi daha birçok elementin alaşımında bulunduğunu görüyoruz. Dökme demirin ötektik noktasını değerlendirirken, kaçınılmaz olarak bu elementlerin de dikkate alınması gerekir.

Dökme demirin yapısında bulunan silisyum, fosfor, karbon elementlerinin bileşimlerindeki değişiklik, sıvılaşma ve katılaşma sıcaklıklarını ve ötektik bileşimi değiştireceğinden, mekanik özellikleri etkiler. Bu etkiyi, karbon eşdeğeri (Ceş) olarak tanımlanan bir parametre ile belirlemek mümkün olmuştur.

$$Ceş = \%C + \% \frac{\%Si + \%P}{3}$$

Bu formül ile test edilen; alaşımın ötektik, ötektik altı veya ötektik üstü kompozisyonunda olup olmadığıdır. Karbon eşdeğeri %4,25'den çok ise ötektik üstü, az ise ötektik altı, %4,25 ise ötektik yapı vardır. Ötektik altı kompozisyona sahip alaşımlarda sıvılaşma sıcaklığı bileşime bağlı olarak değişir.

Aynı karbon eşdeğerine sahip fakat farklı karbon, silisyum ve fosfor içeriğine sahip dökme demirler aynı döküm özelliklerine sahip değildir. Örneğin, karbon katılaşma sırasında çekilmeyi, karbon eşdeğerinin önleyebileceğinden iki katı daha etkili bir şekilde engeller. Silisyum ise ince kesitlerin sertleşmesinin önlenmesinde çok daha etkilidir. Fakat bu ilişki genelde dökme demirlerle ilgili tartışma söz konusu olunca kullanılır [4], [9], [26].

### 4.3. Karbon Eşdeğerin Mikroyapıya Etkisi

Karbon eşdeğeri, dökme demirlerin kompozisyonunu değerlendirmek için kullanılan bir ifadedir. Dökme demirler içerdikleri karbon miktarına göre hipoötektik ve hiperötektik olarak ikiye ayrılır. Eğer içerdiği karbon miktarı %4.3' ün altındaysa, hipoötektik, üzerindeyse hiperötektik dökme demir olarak adlandırılır ve buna bağlı olarak katılaşma sırası da değişir. Örnek olarak hipoötektik bir gri dökme demirde katılaşma östenit dendritlerinin kristallenmesiyle başlarken, hiperötektik bir gri

dökme demirde ilk olarak kristallenen fazın grafit olduğu görülür. Karbon eşdeğeri denilen ifade, dökme demirde bulunan silisyum ve fosforun kompozisyona olan etkisini belirtmek için kullanılır. Yani her ne kadar saf bir Fe-C alaşımında hipo- ve hiper- değerlendirmesi sadece karbon miktarı dikkate alınarak yapılıyor olsa da, ticari olarak üretilen dökme demirlerde bulunan silisyum ve fosfor elementleri de, bir anlamda karbon gibi davranarak, dökme demirin katılaşmasını etkilemektedir. O nedenle silisyum ve fosfor içeren dökme demirlerin hipoötektik mi yoksa hiperötektik mi olduğunu değerlendirirken sadece karbon miktarına değil, karbon eşdeğerine de bakılır ve formülü şu şekildedir:

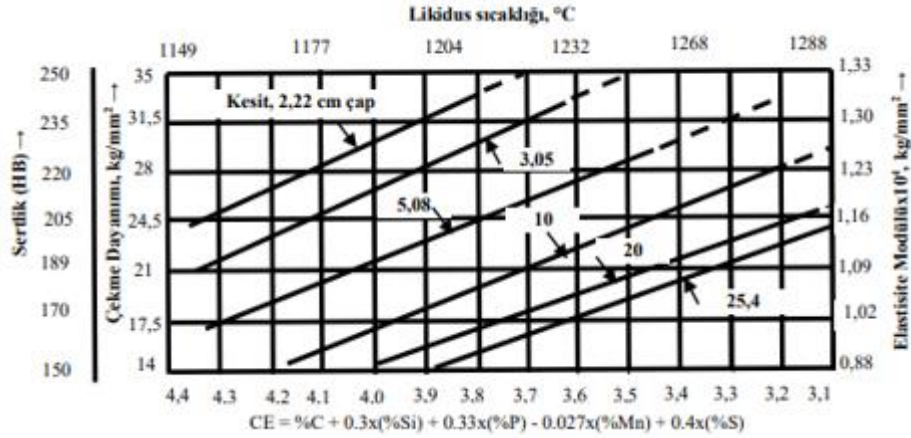
$$CE = \%C + (\%Si + \%P) / 3$$

Buradaki CE ifadesi karbon eşdeğeri anlamına gelmektedir. (carbon equivalent ya da carbon equivalent value olarak geçmektedir) Sonuç olarak eğer bir dökme demirdeki karbon miktarı, örneğin %4.1 olmasına rağmen, yani hipoötektik gibi görünüyorsa olmasına rağmen, eğer karbon eşdeğeri %4.6 ise, bu dökme demirin hiperötektik olarak katılaşacağı görülür.

#### 4.4. Karbon Eşdeğerinin Mekanik Özelliklere Etkisi

Karbon eşdeğerliliği dökme demirler için gerek yapı ve gerekse malzeme özelliklerini tanımlayan önemli bir kriterdir. Karbon eşdeğerine bağlı olarak alaşımın toplam karbon ve silisyum içeriği, alaşımın katılaşma aralığını tanımlaması yanında aynı zamanda döküm karakteristikleri ve özellikleri ile de ilgilidir. Bununla beraber, sabit karbon eşdeğerliliğine sahip fakat farklı karbon ve silisyum oranları içeren dökme demirler bulunabilmektedir. Bu tip dökme demirler aynı döküm özelliklerine sahip olmamaktadırlar. Örneğin, karbon katılaşma sırasında meydana gelen çekilmeyi önlemede, karbon eşdeğerliliği ile belirtilene nazaran iki kat daha fazla etkilidir. Silisyum ise ince kesitlerin sertleşmesini önlemede oldukça etkilidir. Kullanım özelliklerinin bazılarında benzer farklılıklar görülmesine rağmen bunlar spesifikasyonlarda karbon eşdeğerliliği ile sınırlandırılır.

Karbon ve silisyum mekanik özellikleri etkileyen başlıca elementlerdir. Karbon eşdeğerliliği ile birçok mekanik özellik arasında çeşitli ilişkiler geliştirilmiştir. Kesit kalınlığı, karbon eşdeğerliliği ve likidus sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki şematik olarak Şekil 4.2.'de verilmiştir [11].



Şekil 4.2. Lamel grafitli dökme demirlerde kesit kalınlığı, karbon eşdeğerliliği ve likidus sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki

Lamel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini etkileyen başlıca faktörler şunlardır:

- Primer (ön ötektik) katılaştan ostenit miktarı
- Ötektik tane sayısı
- A tipi grafit oluşumu
- Tamamı perlitik ana doku
- İnce perlitik doku

Bu faktörlerden ilk üçü katılma esnasında ve son ikisi katı faz dönüşüm reaksiyonu ile kontrol altına alınmaktadır. Verilen bu büyüklükler de kimyasal analiz, ergitme tekniği ve parça et kalınlığına bağlı olarak değişirler. Dökme demirin mukavemet değeri kuvvetli bir şekilde primer ostenit miktarı ile belirlenmektedir. Doymuşluk derecesi ve karbon eşdeğerliliğinin yüksek mukavemetli döküm parçalarında düşük alınmasının nedeni de budur. Ötektik reaksiyon ani ve beraberce belirli yerlerde ostenit ve grafitin büyümesi ile oluşur. Grafitin şekli ve boyutu, parça doymuşluk

derecesi ve soğuma hızı yanında alaşım elementlerinin cins ve miktarlarına bağlıdır [11].

Soğuma hızı mikroyapıyı etkilediğinden özellikler üzerinde önemli değişimler meydana getirir. Hızlı soğuma, sertliği ve çekme dayanımını artırır; ancak bunun mümkün olabilmesi için hızlı soğumanın beyaz bir yapı veya çok kötü bir grafit tipi olan D tipi grafitler meydana getirmemesi gerekir. Yavaş soğuma ile grafit lamelleri irileşir ve kaba yapılu perlit oluşur. Daha yavaş soğumada ise ferritin ortaya çıktığı görülmektedir.

Lamel grafitli dökme demirlerde karbon eşdeğerliliğinin azalmasıyla çekme dayanımının maksimum artış sınırı 310 N/mm<sup>2</sup> kadardır. Daha yüksek mukavemet elde edebilmek için alaşım elementi ilavesi gereklidir. Sertlik ve çekme dayanımı arasındaki ilişkiye grafit lamel tipinin büyük etkisi vardır. Verilen bir sertlik değeri için en yüksek çekme dayanımı, küçük A tipi grafitler bulunduğu elde edilir. Diğer yandan verilen bir sertlik değeri için D tipi grafit lamelleri ile düşük bir çekme dayanımı elde edilecektir [11], [15], [17].

#### **4.5. Aşımın Karbon Eşdeğere Etkisi**

Dökme Demirlere aşılama ilavesi tavsiye edilen, hatta istenilen kalitede döküm parça üretimi için gerekli bir uygulamadır. Lamel ve küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri ve işlenebilirlikleri mikro yapıları ile direkt olarak ilişkilidir. Hem mekanik özellikler hemde mikro yapı önemli ölçüde aşılama etkilenir. “Dökme demirlerin aşılama” sıvı metale çekirdek ilave edilerek, katılma mekanizmasını ve mikroyapısını istenilen özellikleri elde edebilmek için etkilemek anlamına gelmektedir. Çekirdekler  $\leq 4 \mu\text{m}$  boyutunda, grafit presipitasyonu için kristalleşme merkezleri işlevini gören ince parçacıklardır.

Aşılama sırasında SiO<sub>2</sub> çekirdekleri çökler ve daha sonra bu çekirdekler üzerinde grafit oluşumu ve büyümesi gerçekleşir. Ancak, SiO<sub>2</sub> çekirdeklerinin oluşabilmesi

için sıvı metal içerisinde bu çekirdeklerin oluşmasına yardımcı olacak diğer yabancı çekirdeklerinde bulunması gereklidir. Bu yabancı çekirdekler, genellikle oksijenle bağ kurma (birleşme) eğilimi yüksek olan elementler tarafından oluşturulur. Aşılama, hem grafit çökmesini (sayı, boyut, şekil açısından) hem de katılaşmayı (grit katılaşmayı teşvik etmek, ledebürite soğumayı engelleme) etkilemek için tasarlanmalıdır.

Etkin bir aşılama, hem parça genelinde homojen mekanik özellikler hemde değişik et kalınlıklarında bile homojen bir sertlik dağılımı sağlar. Aşılama ayrıca, Östenit-grafit ötektik reaksiyonu üzerindeki etkili olduğu için parça sızdırmazlığı ve besleme özelliklerine de etki eder. Aşılamanın etkinliği, aşılama öncesi sıvı metalin ergitme sırasındaki metalurjik özellikleri, kimyasal kompozisyonu, ergitme ve aşılama sıcaklıkları, sıvı metalin aşılama öncesi ve sonrası bekleme süresi gibi değişkenliklere bağlıdır. Aşılama birçok farklı aşamada uygulanabilir ancak en etkili uygulama dökümden hemen önce veya döküm sırasında yapılan aşılama değildir. Çekirdeklerin etkinliğine ve soğuma koşullarına bağlı olarak aşılama, ergitme ocağında veya bekletme ocaklarında yapılabilir ancak bu çok nadiren görülen ve önerilmeyen bir uygulamadır. En yaygın uygulamalar ergitme ocağından metal potaya aktarılırken, kalıp içerisine akan metale ve kalıp içinde uygulanan aşılama yöntemleridir.

#### **4.6. Aşımın Karbon Eşdeğere Etkisi**

Alaşımız veya düşük alaşımlı dökme demirlerde, %1,5 ila % 3 silis ve % 2 ila % 4 karbon bulunur. Yavaş ve dengeli bir soğuma şartlarında, sıvı, belli bir süre sonra ötektik kompozisyonuna erişir (% 4,3 karbon eşdeğeri) ve böylece ötektik katılaşma başlamış olur. Ötektik katılaşma sırasında ortaya çıkan karbon tamamen grafit dönüşür. Ancak dökümhane şartlarında yavaş ve dengeli soğuma şartları gerçekleşmez. Bunun sebepleri, kimyasal kompozisyondaki farklılıklar, et kalınlığı veya soğuma hızı ve döküm sıcaklıklarıdır. Laboratuvar şartları ve gerçek uygulama arasındaki bu farklılıklar sonucu, sıvı metal, ötektik reaksiyon başlamadan önce Östenit-Grafit denge sıcaklığının altındaki sıcaklıklara kadar soğur.



Aşılamanın amacı, ötektik katılaşmanın başlangıcında grafit kristalleşmesi için yeterli miktarda çekirdeğin mevcut olduğunu garanti altına almak ve bu şekilde demir karbür (sementit,  $Fe_3C$ ) oluşumunu engellemektir. Dolayısıyla aşı ilavesi, grafit kristalleşmesinin Östenit-Grafit denge sıcaklığında veya çok az altında bir sıcaklıkta (alt soğuma) gerçekleşmesini sağlayacak oranda yapılmalıdır. Bunun sağlanabilmesi durumunda; lamel grafitli dökme demirlerde eşit büyüklüklerde ve homojen dağılmış A tipi grafit, küresel grafitli dökme demirlerde ise çok sayıda, küçük ve tam yuvarlak görünümlü nodüller içeren mikro yapılar elde edilir [8], [13], [20], [21], [26].

## **BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **5.1. Materyal**

Bu çalışmada; termal analiz yöntemi ile dökme demirlerde karbon eş değerini yeri ve önemi ile mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir.

### **5.2. Yöntem**

Aşılama metalin katılaşmasını değişik şekillerde etkiler. Aşılamanın etkisi; baz metaldeki çekirdek miktarına ve aşının analizine göre değişmektedir. Kullanılacak aşığı seçerken önemli nokta dökümhanenin ihtiyacını tesbit ederek, ihtiyaca uygun aşığı seçmektir. Örneğin sadece çil problemi var ise: Telow önem kazanmaktadır. Eğer grafitleşme ile ilgili bir problem var ise; Telow ile birlikte R, GRF1 ve GRF2 değerleri de önem kazanmaktadır. Eğer ters çil problemi var ise; TS'yi arttıran bir aşığı seçilmelidir.

Aşılamanın amacı, ötektik katılaşmanın başlangıcında grafit kristalleşmesi için yeterli miktarda çekirdeğin mevcut olduğunu garanti altına almak ve bu şekilde demir karbür (sementit, Fe<sub>3</sub>C) oluşumunu engellemektir.

Aşılama katılaşmayı, onun neticesinde mikroyapı ve mekanik özellikleri etkileyeceğinden bu çalışmada aslında farklı tipteki aşıkların aynı parça üzerinde mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Doğru aşılama ile lamel grafitli dökme demirlerde Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi eşit büyüklüklerde ve homojen dağılmış A tipi grafit mikro yapılar elde edilir.



Şekil 5.1. A- tipi grafit ve gri katlaşmış lamel grafitli dökme demirin mikroyapısı (Inoculation cast iron)

Genellikle, Ferro-silis alaşımları dökümhanelerde aşılaiıcı olarak kullanılmaktadır. Ferro-silislere, aşılama etkinliğini arttırmak için, oksijen'e karşı afinitesi yüksek Kalsiyum, Alüminyum, Baryum, Zirkon, Stronsiyum ve Nadir Toprak Metalleri gibi elementler ilave edilir. Bunun sebebi, başarılı bir aşılama için, sıvı metal içinde çözülen oksijenin bağlanması gerekliliğidir. Bunun yanı sıra, bazı aşılaiıcılar, grafit çekirdeklenmesi üzerinde olumlu etkiye sahip Bizmut, Titanyum, Mangan, Kükürt ve Oksijen gibi elementler de içerir [2], [3], [5].

Tablo 5.1. Deneyde kullanılan aşılaiın kimyasal içerikleri

	<b>SB-5</b>	<b>ZM-6</b>	<b>VP-316</b>
% Si	65- 70	62- 68	63-67
% Al	1- 1,5	1- 1,5	1,5-2
% Ca	1- 1,5	1,2- 1,8	0,3-1,4
% Mn	-	3 - 4	3 - 4
% Ba	2- 2,5	-	-
% Zr	-	3 - 4	-
Boyut (mm.)	0,2- 0,7	0,2- 0,7	0,2- 0,7

3 farklı tip aşılaiın (VP-316,ZM-6,SB-5) 5 farklı oranlarda(%0,12,%0,15,%0,20, %0,25,%0,30) kullanılarak ATAS termal cihaz analiziyle karbon eşdeğeri tayin edilmiş ve her birinden çekme çubukları Şekil 5.2.'de görüldüğü gibi dökülmüştür.

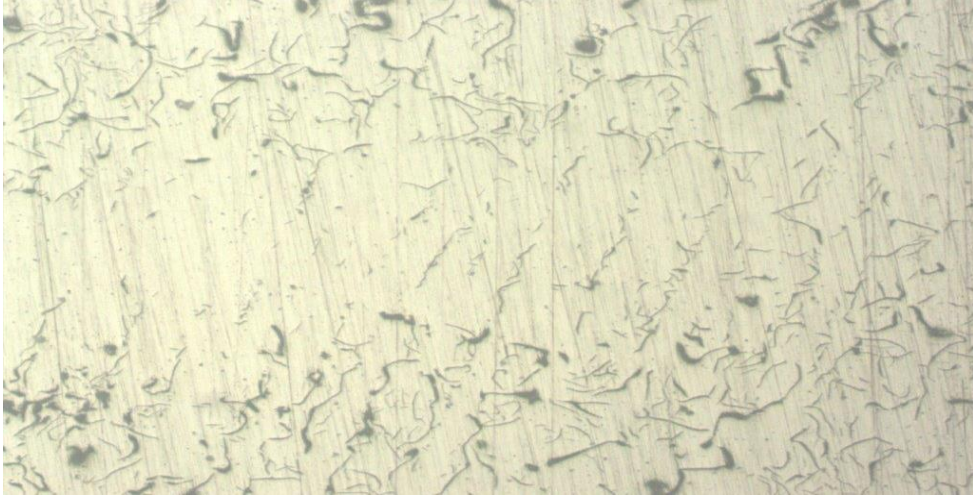


Şekil 5.1. Elde edilen çekme çubukları

Ayrıca mikroyapı incelenerek aralarındaki değişimler gözlemlenmiştir. Kullanılan optik mikroskopi Şekil 5.3.' te görülmektedir.



Şekil 5.3. Nikon marka MA100 model optik metal mikroskobu



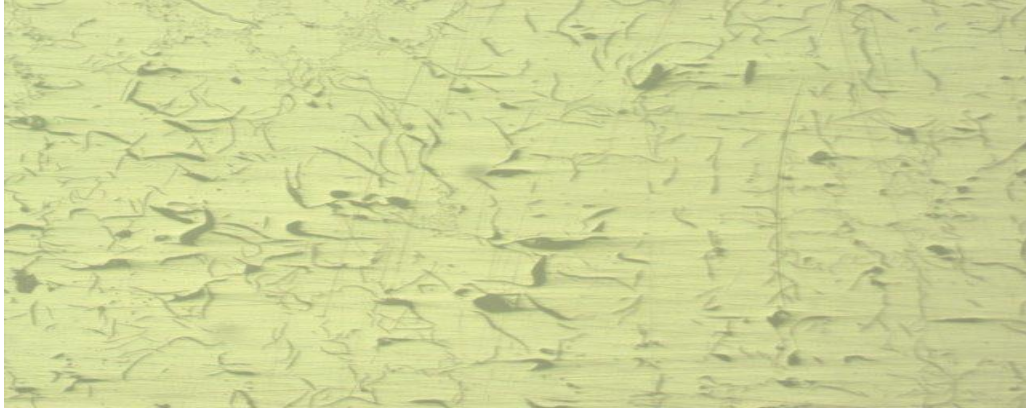
Şekil 5.4. Aşısız mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; A tipi grafitleri çok nadir görmekte birlikte genelde D ve E tiplerini görmekteyiz. Bu da bize parçanın çok sert olduğunu aynı zamanda da kırılğan olduğunu göstermektedir. VP316 %0.12 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.5.' te görülmektedir.



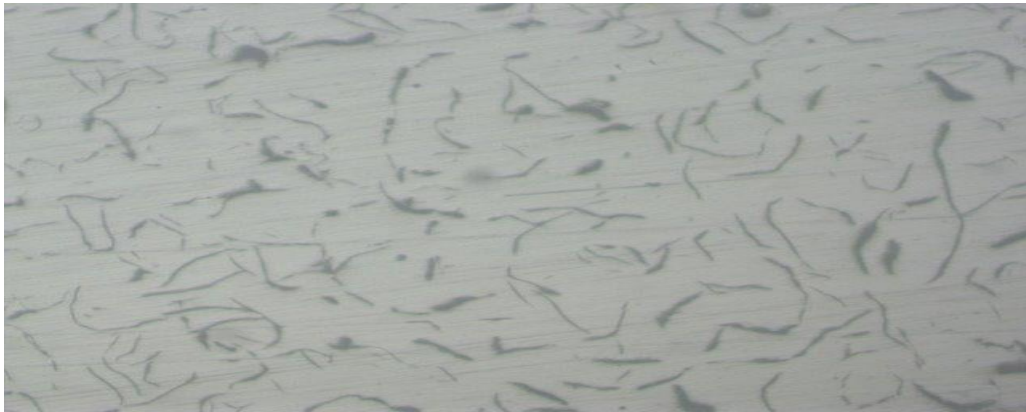
Şekil 5.5. VP316 %0.12 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda ; A tipi grafitleri görmeye başlıyoruz. Bunun yanında D tipi grafitler daha yoğun şekilde görülüyor. Bu da bize parçanın sertliğinde biraz artış göstereceğini aynı zamanda da tam istenilen bir gri dökme demir yapısı olduğunu gösteriyor. VP 316 %0.15 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.6.'da görülmektedir.



Şekil 5.6.VP 316 %0.15 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda ; A tipi grafitlerde artış görmeye başlıyoruz. Bunun yanında C tipi grafitler de görülmeye başlıyor. Bu da bize parçanın sertliğinde biraz düşüş göstereceğini söylüyor. VP 316 %0.20 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.7.'de görülmektedir.



Şekil 5.7. VP 316 %0.20 aşılı mikroyapı görüntüsü

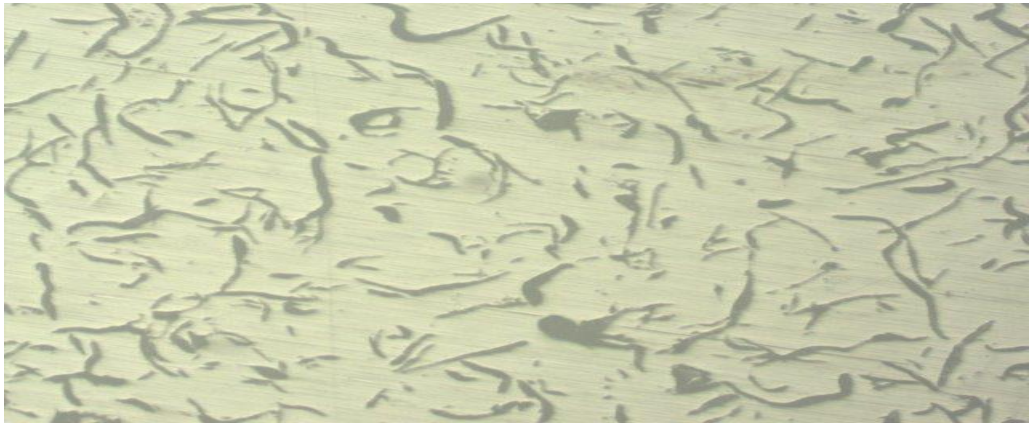
Parçanın mikroyapısına baktığımızda; VP316 %0.15 gr mikro yapısında görülen A tipi grafitlerinde azalma görülürken C tipi grafitlerde artış görülmeye başlanıyor. Buda bize parçanın sertliğinde azalma olacağını gösteriyor. VP316 %0.25 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.8.' de görülmektedir.





Şekil 5.8. VP316 %0.25 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; Aşı oranının artmasına bağlı olarak A tipi grafitlerinde azalma görülürken C tipi grafitlerinde artış görülüyor. Buda bize parçanın sertliğinde azalma yaşanacağını söylüyor. VP316 %0.30 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.9.'da görülmektedir.



Şekil 5.9. VP316 %0.30 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; yoğunluk olarak C tipi grafitler oluşmuştur. Çok az A tipi grafit görülüyor. Buda parçanın sertliğinde düşüş, yumuşaklığında artış göstermektedir. Yumuşak bir parça dökümü için gri dökme demirde optimum oran olarak kabul edilebilir. SB5 %0.12 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.10.'da görülmektedir.



Şekil 5.10. SB5 %0.12 aşılı mikroyapı görüntüsü

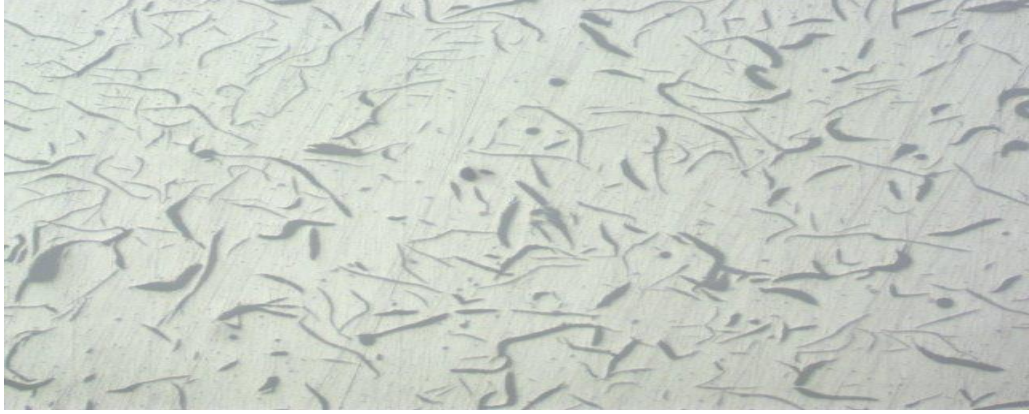
Parçanın mikroyapısına baktığımızda; Yoğun olarak A tipi grafitlerin oluştuğunu görüyoruz.Çok az denecek kadar C tipi grafitler görülse de D tipi grafitlerin oluşmaya başladığını söyleyebiliriz. Bu da parçaya biraz sertlik verdiğini yumuşamanın azaldığını göstermektedir. SB5 %0.15 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.11.'de görülmektedir.



Şekil 5.11. SB5 %0.15 aşılı mikroyapı görüntüsü

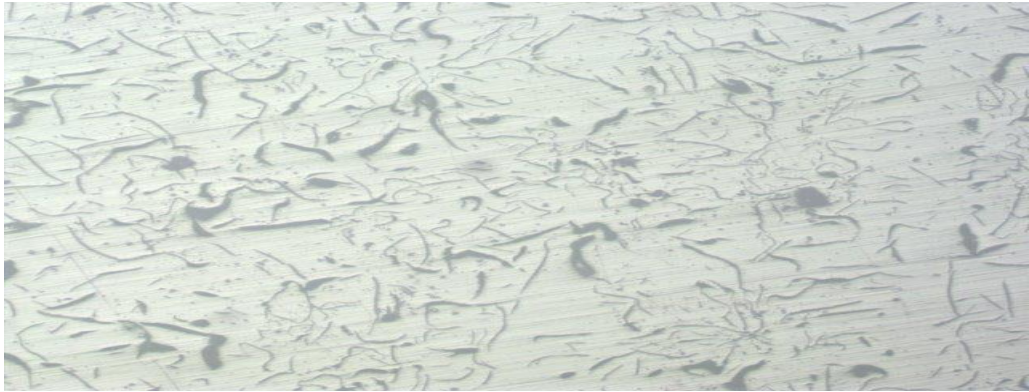
Parçanın mikroyapısına baktığımızda; SB5 %0.15 gr aşılı mikroyapılı resme nazaran yoğun olarak A tipi grafitleri görsek C tipi grafitlerin de artış olduğunu söyleyebiliriz. Aynı zamanda D tipi grafitleri de görüyoruz.Bu da parçaya biraz yumuşaklık verdiğini sertliğin düştüğünü göstermektedir. SB5 %0.20 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.12.'de görülmektedir.





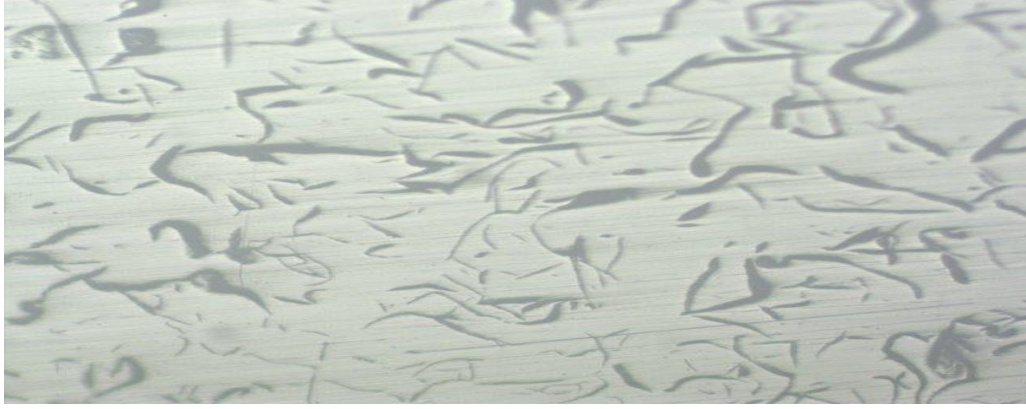
Şekil 5.12. SB5 %0.20 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; SB5 %0.12 gr ve %0.15 gr aşılara göre A tipi grafitlerinde azalma görülüyor. C tipi grafitlerinde de yoğunluk olduğunu görüyoruz. Bu da parçaya biraz yumuşaklık verdiğini sertliğin düştüğünü göstermektedir. SB5 %0.25 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.13.'de görülmektedir.



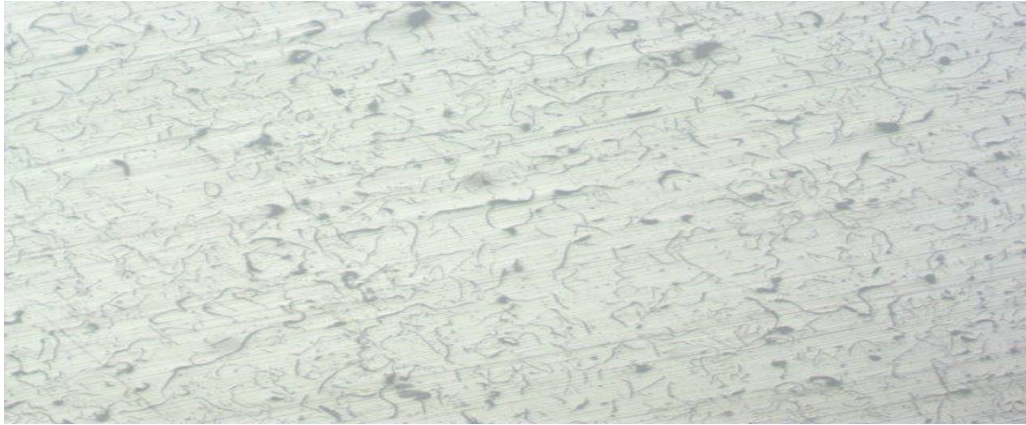
Şekil 5.13. SB5 %0.25 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; Yoğun olarak C tipi grafitlerin oluşurken , A tipi grafitlerin azaldığını görüyoruz. Bu da parçaya biraz yumuşaklık verdiğini sertliğin düştüğünü göstermektedir. SB5 %0.30 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.14.'de görülmektedir.



Şekil 5.14. SB5 %0.30 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; Aşılı miktarının artması ile A tipi grafitlerinde azalma ve C tipi grafitlerinde artış görülmeye devam ediyor. Parçanın diğer oranlarda kullanılan aşılı miktarlarına göre daha yumuşak olduğunu söyleyebiliriz. ZM6 %0.12 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.15.'de görülmektedir.



Şekil 5.15. ZM6 %0.12 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; A tipi grafitlerin yoğunlukta olduğunu söyleyebiliriz. C tipi grafitlerin oluştuğunu görüyoruz. Çok az miktarda olsa D tipi grafitlerini söylememiz mümkün. Parçanın aşısız ve SB5 %0.12; 0.15; 0.20 ; 0.25 ve VP316 %0.12; 0.15; 0.20 aşılı'ya göre yumuşak olduğunu ; fakat VP316 %0.25 ; 0.30 aşılıya göre ise sert olduğunu söyleyebiliriz. ZM6 %0.15 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.16.'da görülmektedir.



Şekil 5.16. ZM6 %0.15 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; ZM6 %0.12 gr aşılı mikroyapıya nazaran C tipi grafitlerinde artış olduğunu söyleyebiliriz. Bunun yerine A tipi grafitlerinde azalma olmuştur. Aynı zamanda D tipi grafitlerini de görebiliyoruz. Sertlikte azalma olduğunu söyleyebiliriz. ZM6 %0.20 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.17.'de görülmektedir.



Şekil 5.17. ZM6 %0.20 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; ZM6 %0.15 gr aşılı mikroyapıya nazaran A tipi grafitlerinde azalma onun yerine de C tipi grafitlerin oluştuğunu söyleyebiliriz. Buda bize parçada biraz yumuşaklık vereceğini gösteriyor. ZM6 %0.25 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.18.'de görülmektedir.





Şekil 5.18. ZM6 %0.25 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; Yoğun olarak C tipi grafitlerin oluştuğunu söyleyebiliriz. A tipi grafitlerin ise çok az olarak görmekteyiz. Buda bize parçanın sertliğinde azalma olacağını gösteriyor. ZM6 %0.30 aşılı mikroyapı görüntüsü Şekil 5.19.'da görülmektedir.



Şekil 5.19. ZM6 %0.30 aşılı mikroyapı görüntüsü

Parçanın mikroyapısına baktığımızda; ZM6 %0.25 gr aşılı mikroyapıya göre yok denecek kadar az A tipi grafit oluşmuş. Yoğun olarak C tipi grafitlerin oluştuğunu söyleyebiliriz. Buda bize parçanın yumuşak olduğunu gösterir.

Genel olarak mikroyapılara baktığımızda; optimum aşırı bulabilmek için dökümhanenin şartları (bulunduğu lokasyon, prosesi , uygulama teknikleri vb.) başta olmakla birlikte kullanılması gereken (tip aynı olsa bile ) oranların etkisinin önemini görmekteyiz. Örneğin ; Denemede kullanılan bütün aşısular için aynı şartlarda

yapılan çalışmada kullanılan miktar arttırıldığında sertliğinde düşüş gösterdiğini söyleyebiliriz.

Karbon ve silisyum gri dökme demirde ana alaşım elementleridir ve mikroyapı üzerine en büyük etkiye sahiptir. Buna karşın bütün elementler belli düzeyde mikroyapıyı etkiler. Grafit oluşumunu artıran elementler grafit kararlaştırıcı olarak adlandırılır. Silisyum kuvvetli bir kararlaştırıcıdır ve gri dökme demirde grafitleşirmeyi artıran en önemli bireysel kompozisyon faktörüdür. Grafitleşme; demirde serbest hale geçerek çökmesi işlemidir.

Gri dökme demirde silisyum miktarı ağırlıkça %1-3.5 aralığındadır. Fe-C-Si alaşımında silisyum miktarı arttırıldığında ötektik kompozisyon sola kayar. Bu ötektik kayma aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:

$$\% \text{ Ötektik karbon (Fe-C-Si alaşımı) } = 4.3 - 0.33 \times \% \text{ Si (Alaşımında)}$$

Gri dökme demirlerin pek çok özelliği karbon eşdeğerliğine (K.E) bağlıdır. Karbon eşdeğerliği dökme demirdeki karbon ve silisyum miktarı alınarak aşağıdaki eşitlikle bulunur.

$$\text{Karbon eşdeğerliği} = \% \text{ C (demirde) } + 1/3 \% \text{ Si ' '(d.demir)}$$

Buradan da anlaşılacağı gibi karbon eşdeğeri tayininde önemli iki element karbon ve silisyumdur. Bu çalışmada ocak çıkış karbon ve silis değerleri eşit olduğundan (%3,50-57 Karbon ,% 1,75-85 Silis) karbon eşdeğerine etki edecek en önemli faktör aşılama olacaktır. Ocak analizi Tablo 5.5.'de görülmektedir.

Tablo 5.2. GG 25 Standartlarında istenilen Döküm Proses şartları

	%C	% Si	% Mn	% S	% P	% Cr	% Cu	% Sn	Pota % Si
USL	3.57	1.85	0.80	0.090	Max.0.09	0.20	0.20	0.045	2.00
ASL	3.50	1.75	0.75	0.045		0.15	0.15	0.035	1.85

Tablo 5.3. Üretilen numunenin ocakta yüklenen şarja nazaran gelmesi gereken analizi  
GG25 Standartlarında Üretilen Döküm Nihai Ocak Analizi

Malzeme	Ocağa Yüklenen Kg.	C	Si	Mn	S	P	Cu	Sn
H1 Piki	1000	3,9	1,72	0,19	0,07	0,071	-	-
UÇBAŞ Hurda	900	0,94	0,25	0,34	0,005	0,017	0,16	0,01
Ç1 Piki	900	4,13	0,66	0,11	0,021	0,054	-	-
Geri Döndü	1200	3,45	2	0,15	0,01	0,02	0,09	0,009
Ocak Nihai Analizi	-	3,15	1,23	0,19	0,026	0,03	0,065	0,005

Tablo 5.4. Üretilen numunelerin ocaktaki nihai spektral analizleri.(Alyaj atıldıktan sonra)  
GG25 Standartında Üretilen Döküm Nihai Ocak Analizi

Malzeme	Ocağa Yüklenen Kg.	C	Si	Mn	S	P	Cu	Sn
H1 Piki	1000	3,9	1,72	0,19	0,07	0,071	-	-
UÇBAŞ Hurda	900	0,94	0,25	0,34	0,005	0,017	0,16	0,01
Ç1 Piki	900	4,13	0,66	0,11	0,021	0,054	-	-
Geri Döndü	1200	3,45	2	0,15	0,01	0,02	0,09	0,009
Ocak Nihai Analizi	-	3,53	1,78	0,78	0,082	0,03	0,19	0,034

Tablo 5.5. Ocak analizi

Element	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Mg	%Sn	%N
AVG	3,5369	1,7839	0,0826	0,0343	0,7805	0,0258	0,1812	0,0046	0,1892	0,0004	0,0347	0,0001

Element	%Al	%B	%Bi	%Ti	%V	%Nb	%W	%Co	%Ce	%La	%Pb	%Fe
AVG	0,0000	0,0012	0,0023	0,0142	0,0067	0,0035	0,0000	0,0038	0,0018	0,0000	0,0003	93,3169

Tablo 5.6.'da görüldüğü gibi bütün aşlar içerisinde minimum %65 Silisyum ihtiva eder.

Tablo 5.6. Bazı FeSi esaslı aşı bileşimleri

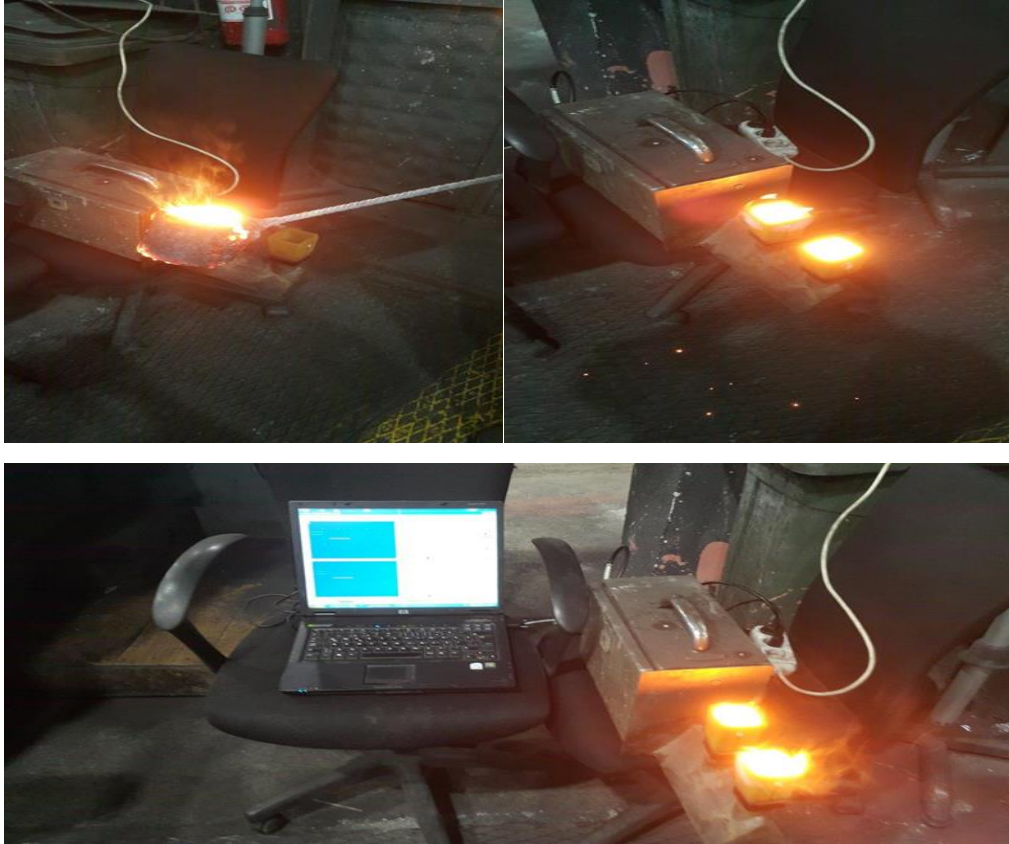
Aşı Cinsi	%Si	%Al	%Ba	%Ca	%Mn	%RE	%Sr	%Zr
<b>Döküm cinsi</b>								
<b>Fe-Si</b>	75	1.2	-	1	-	-	-	-
<b>FeSi-Sr</b>	50 veya 75	0.5 maks	-	0.1 maks	-	-	0.8	-
<b>FeSi-Ba1</b>	75	1	1	1	-	-	-	-
<b>FeSi-Ba2</b>	75	1	2.5	1.5	-	-	-	-
<b>FeSi-Zr</b>	75	1.2	-	2	-	-	-	1.5
<b>FeSi-Mn-Zr-Ba</b>	65	1.2	0.8	1.2	4.5	-	-	4.5
<b>FeSi-RE</b>	75	1	-	0.8	-	2	-	-
<b>FeSi-Sr-RE</b>	75	0.5 maks	-	0.1 maks	-	2	0.8	-
<b>FeSi-Sr-Zr</b>	75	0.5 maks	-	0.1 maks	-	-	0,8	1.2
<b>FeSi-Sr</b>	50 veya 75	x	0,1 maks	0,5 maks		x		x
<b>FeSi-Ba1</b>	75	1	1	1		x		x
<b>FeSi-Ba2</b>	75	2,5	1,5	1		x		x
<b>FeSi-Zr</b>	75	x	2	1,2		x		x
<b>FeSi-Mn-Zr-Ba</b>	65	0,8	1,2	1,2		4,5		x
<b>FeSi-RE</b>	75	x	0,8	1		x		2
<b>FeSi-Sr-RE</b>	75	x	0,1 maks	0,5 maks		x		2
<b>FeSi-Sr-Zr</b>	75	x	0,1 maks	0,5 maks		x		x

Denemede kullanılan aşuların kimyasal özellikleri Tablo 5.1’de sunulmuştur. Gri dökme demirler, karbon eşdeğeri tayininde ‘C’ ve ‘Si’ nin üçte birinin toplamının 4,3 olduğu dökme demirlerdir. Aşıdan gelecek olan ‘Si’ nin bu ötektik noktayı sola kaydıracağını biliyoruz. Bu yüzden aşılama ötektik noktayı sola kaydıracağından ve katılaşmayı yönlendirdiğinden dolayı önemli yere sahiptir. Dolayısıyla aşının tipi, miktarı ve içeriği malzemenin de mekanik özelliklerine yansıtacaktır. Aşılama ile malzemenin karbon eşdeğerinin değiştiğini ve mikro yapıda ferrit yapıcı etkisi

gösterdiğini biliyoruz. Bu araştırmada, bu etkinin hangi oranlarda nasıl olduğu araştırılmıştır.

Bu yüzden, bu çalışmada aslında aşılamanın karbon eşdeğerine etkisi ile mikroyapıdaki değişiklikler ve bununla birlikte mekanik özelliklere etkisini incelenmeye çalışılmıştır. Aşılama olarak kullanılan bütün şartlandırıcılarda %65-75 Si ihtiva eder. İçerisinde %1-4 aralarında farklı bir element değiştiğinde adında da değişiklik gösterir. Tablo 5.6.'da bazı FeSi esaslı aşı bileşimleri gösterilmiştir.

Dökme demirlerde istenilen mekanik özellik ve mikro yapı için aşılama yapılması son derece önemlidir. Bu çalışmada farklı tip ve farklı oranlarda kullanılan aşılarla termal analiz yöntemi ile karbon eşdeğerinin tayini incelenmeye ve mikro yapıya olan etkisi irdelenerek mekanik özelliklerdeki değişimler incelenmeye çalışılmıştır. Bunun için Atas marka cihaz kullanılmıştır. Cihaza uyumlu 400 gr kapasiteli 0.8 modüllü kaplar kullanılmıştır. şekil 5.20.'de Atas cihazı görölmektedir.



şekil 5.20. Kullanılan Atas cihazı



Indüksiyon ocaklarında eriyen ve analizi GG 25 olarak ayarlanan Tablo 5.4' de gösterilmiştir. Ocaktan alınan maden ile kaplara, ilk etapta %0.12 , sonrasında %0.15; 0.15; 0.20; 0.25 ve en son da %0.30 oranlarında aşılar konarak karbon eşdeğeri tayin edildi. Kullanılan quick kablar Şekil 5.21.'de görülmektedir.



Şekil 5.21. Tellür içeren quickcab

Bu çalışma esnasında her bir deneme için çekme çubukları dökülmüştür. Çekme çubukların resimleri Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.3 farklı aşı için aynı çalışma tekrar edilerek ve aşısızla karşılaştırmak için toplamda 16 veri elde edilip, karşılaştırma yapılmıştır. Aşı, malzeme tipleri ve kullanılan oranlar Tablo 5.7.'de görülmektedir.

Tablo 5.7. Deneyde kullanılan numunelerin aşı, malzeme tipleri ve kullanım miktarları

<b>Numune</b>	<b>Döküm Malzemesi</b>	<b>Kullanılan Aşı Tipi</b>	<b>Kullanılan Aşı Miktarı (%)</b>
1	GG25	AŞISIZ	-
2	GG25	VP 316	0,12
3	GG25	VP 316	0,15
4	GG25	VP 316	0,2
5	GG25	VP 316	0,25
6	GG25	VP 316	0,3
7	GG25	SB5	0,12
8	GG25	SB5	0,15
9	GG25	SB5	0,2
10	GG25	SB5	0,25
11	GG25	SB5	0,3
12	GG25	ZM6	0,12
13	GG25	ZM6	0,15
14	GG25	ZM6	0,2
15	GG25	ZM6	0,25
16	GG25	ZM6	0,3

Yapılan deney sonuçları tablo 5.8.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8. Yapılan deney sonuçları

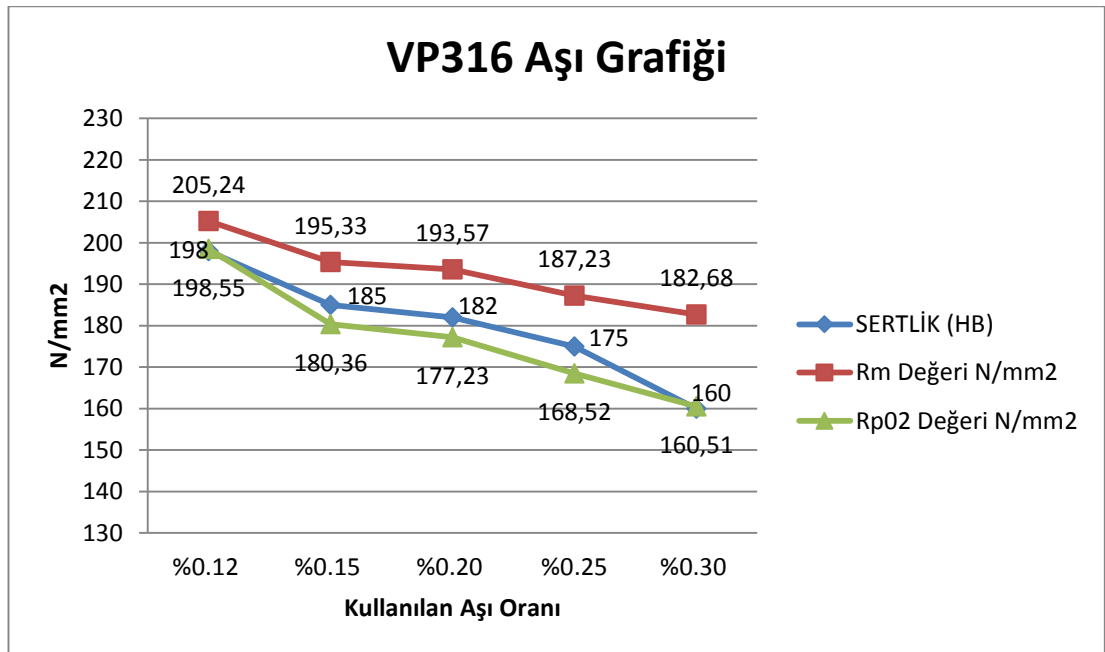
Numune No	İlave miktarı %gr	ACEL (Karbon Eşdeğerliği)	Rm Değeri N/mm <sup>2</sup>	Rp02 Değeri N/mm <sup>2</sup>	SERTLİK (HB)
1	0	4,13	206,47	185,18	207
2	0,12	3,88	205,24	198,55	198
3	0,15	4,15	195,33	180,36	185
4	0,2	3,88	193,57	177,23	182
5	0,25	3,8	187,23	168,52	175
6	0,3	4,01	182,68	160,51	160
7	0,12	3,93	203,54	190,57	195
8	0,15	4,17	198,29	175,7	190
9	0,2	3,93	211,49	189,54	188
10	0,25	4,02	188,79	165,96	180
11	0,3	4,04	180,35	152,33	175
12	0,12	3,95	192,28	177,21	178
13	0,15	3,79	172,98	155,22	166
14	0,2	3,96	184,42	165,77	158
15	0,25	3,92	160,02	139,45	150
16	0,3	4,25	152,31	130,92	147

### 5.3. Çekme Deney Raporları ve İncelenmesi

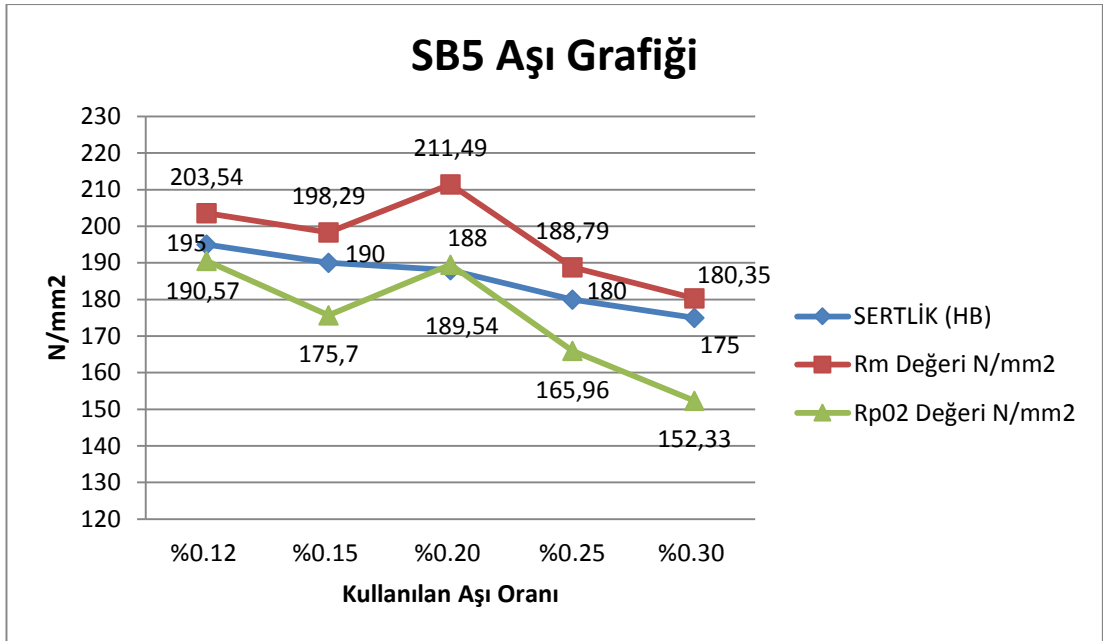
Çekme test cihazı olarak Şekil 5.22.'de görülen Alşa marka 30 ton'luk PLC-Hidrolik kontrollü çekme cihazı (son kalibrasyon tarihi 22.02.2019) kullanılmıştır. Farklı oranlarda aşı kullanılarak yapılan çekme deney sonuçları Şekil 5.23. ile Şekil 5.25. arasındaki şekillerde görülmektedir.



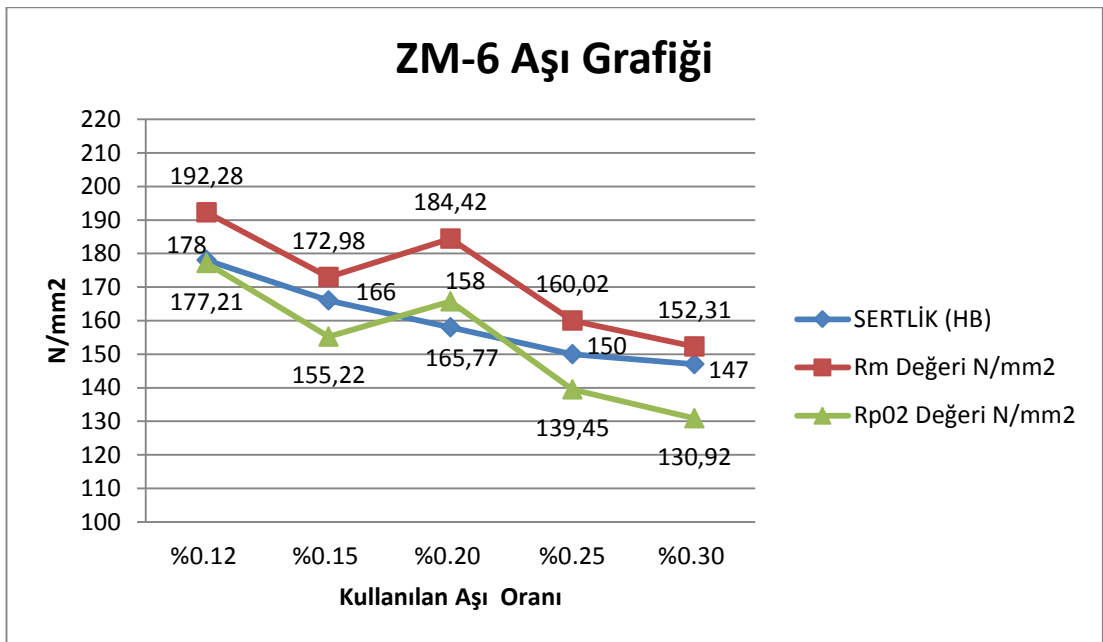
Şekil 5.22. Alşa marka 30 ton'luk PLC-Hidrolik kontrollü çekme cihazı



Şekil 5.23. Değişik oranlarda kullanılan VP316 aşısının; mekanik değerlerindeki değişimi gösteren grafik



Şekil 5.24. Değişik oranlarda kullanılan SB5 aşısının; mekanik değerlerindeki değişimi gösteren grafik



Şekil 5.25. Değişik oranlarda kullanılan ZM-6 aşısının; mekanik değerlerindeki değişimi gösteren grafik

Aşılama ile malzemelerden beklediğimiz ötektik karbürlerin oluşumunu engellemesi, sertliklerinde düşüş ve üniform grafitli (A tipi) grafitlerin oluştuğu görülmektedir.

Sertliklerine baktığımızda; genel olarak aşının malzemenin sertliğini düşürdüğünü görmekteyiz.

Aynı tip aşının (ZM6-VP316-SB5) miktarları arttırıldığında sertliklerinde düşüş görülmüştür.

Farklı tip aşının aynı oranda kullanılması halinde malzemede farklı sertlikler görülmüştür. (VP316-ZM6) (SB5-ZM6)

ZM6 aşısına baktığımızda malzemenin sertliğinde düşüş olduğunu görüyoruz. Bu bize aşının çalışmadığını (aşı sönümü) , yada diğer aşı tiplerine nazaran kalitesinin düşük olduğunu göstermektedir.

Her bir aşı; her dökümhanenin proses şartlarına göre oran ve tiplerine göre değişkenlik göstermektedir.

Buda bize aşılarda malzemenin mekaniksel özellikleri üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Araştırmada elde edilen bulgulara göre, malzemenin karbon eşdeğerinin sola kayması ile ferritik yapı oluşması ve bununla birlikte mekanik özelliklerinde düşme (sertlik düşük, dayanma gücü ve kopması düşük) görülürken, sağa kaymasıyla perlitik yapı oluşması ve buna bağlı olarak da mekanik özelliklerinde iyileşme (sertlik yüksek, dayanma gücü yüksek ve kopması yüksek) görülmüştür.

Aşı tiplerine göre bakıldığında ise; Mn esaslı VP316 aşısı ile Ba esaslı SB5 aşısı VP 316 aşısına nazaran perlit yapıcı özelliğinin fazla olması ile mekanik özelliklerinin iyileştiği görülmektedir. (ZM-6 %0.12 ile VP316 %0.12 ) Yine aynı aşının (ZM-6) SB5 karşısında aynı şeyleri söylememiz mümkün . SB5 aşısı ZM-6 aşısına nazaran perlit yapıcı özelliğinin fazla olması ile mekanik özelliklerinin iyileştiği görülmektedir. (SB5 %0.20 ile ZM-6 %0.20 )

Genel olarak oran arttıkça (%0.12,0.15,0.20,0.25,0.30) perlitte azalma, ferritte artış görülmüştür (ZM-6 %0.12,0.15,0.20,0.25,0.30) .Genel olacak Rm (Kopma) düştükçe parçanın sertliğinde de düşüş görülür. Arttıkça da sertlikte artış görülür.

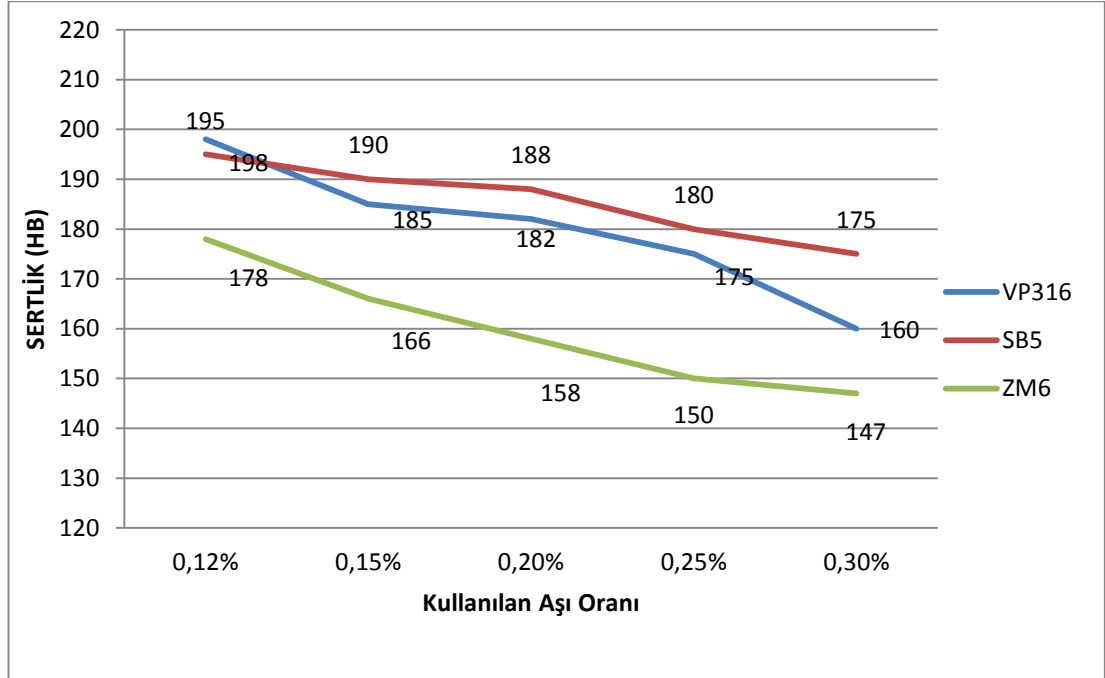
Aşılama metalin katılaşmasını değişik şekillerde etkiler. Aşılamanın etkisi; baz metaldeki çekirdek miktarına ve aşının analizine göre değişmektedir. Kullanılacak aşığı seçerken önemli nokta dökümhanenin ihtiyacını tesbit ederek, ihtiyaca uygun aşığı seçmektir. Örneğin sadece çil problemi var ise: Telow önem kazanmaktadır. Eğer grafitleşme ile ilgili bir problem var ise; Telow ile birlikte R, GRF1 ve GRF2 değerleri de önem kazanmaktadır. Eğer ters çil problemi var ise; TS'yi arttıran bir aş seçilmelidir.

#### **5.4. Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi**

Termal analiz numunelerinden alınan kesitlerden brinell sertliği ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Sertlik ölçümü ve mikroyapı incelemesi için numunelerden kesilen kesitler, zımparalanarak parlatılmıştır. Sertlik ölçümü için Şekil 5.26.'da görülen 5 mm. çelik küre çapına sahip 750 kg. yüklemeli Emcotest Duravision marka sertlik ölçme cihazı (son kalibrasyon tarihi 08.02.2019) kullanılmıştır. Elde edilen sertlik ve mekanik değerlerin karşılaştırılması Şekil 5.27. ile Şekil 5.32. arasındaki şekillerde görülmektedir.

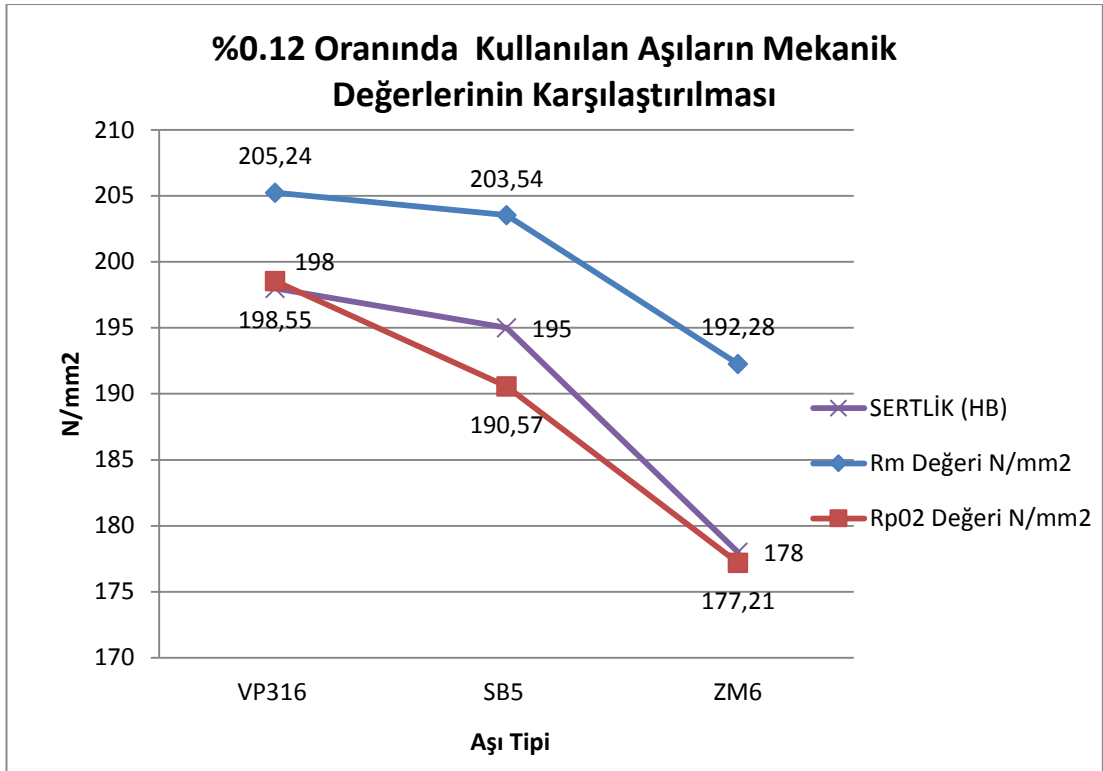


Şekil 5.26. Emcotest Duravision marka sertlik ölçme cihazı

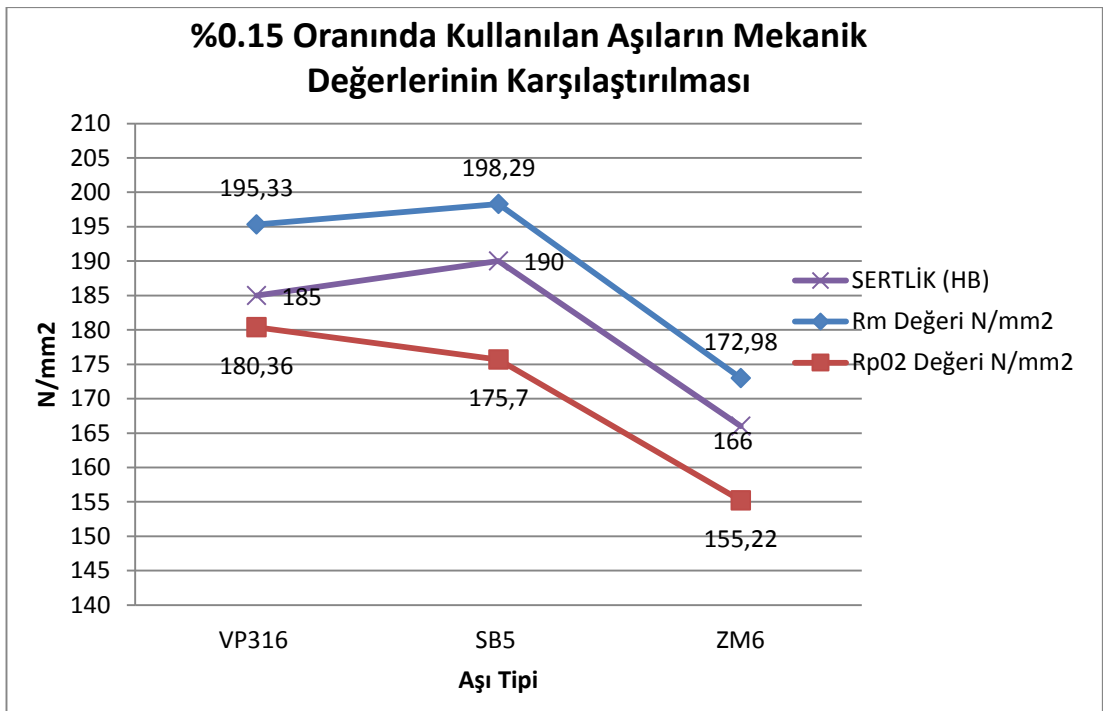


Şekil 5.27. GG25 Malzemede 3 Farklı tip aşırının değişik oranlarda kullanılarak elde edilen sertlik değerlerinin karşılaştırılması

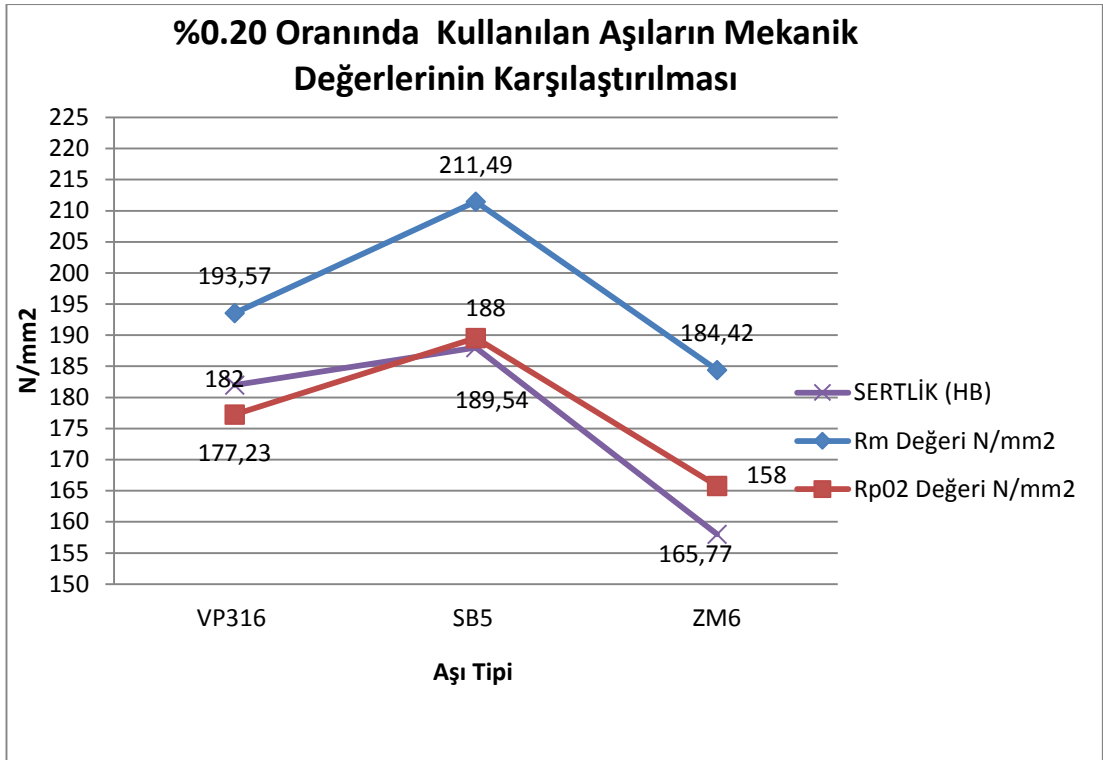




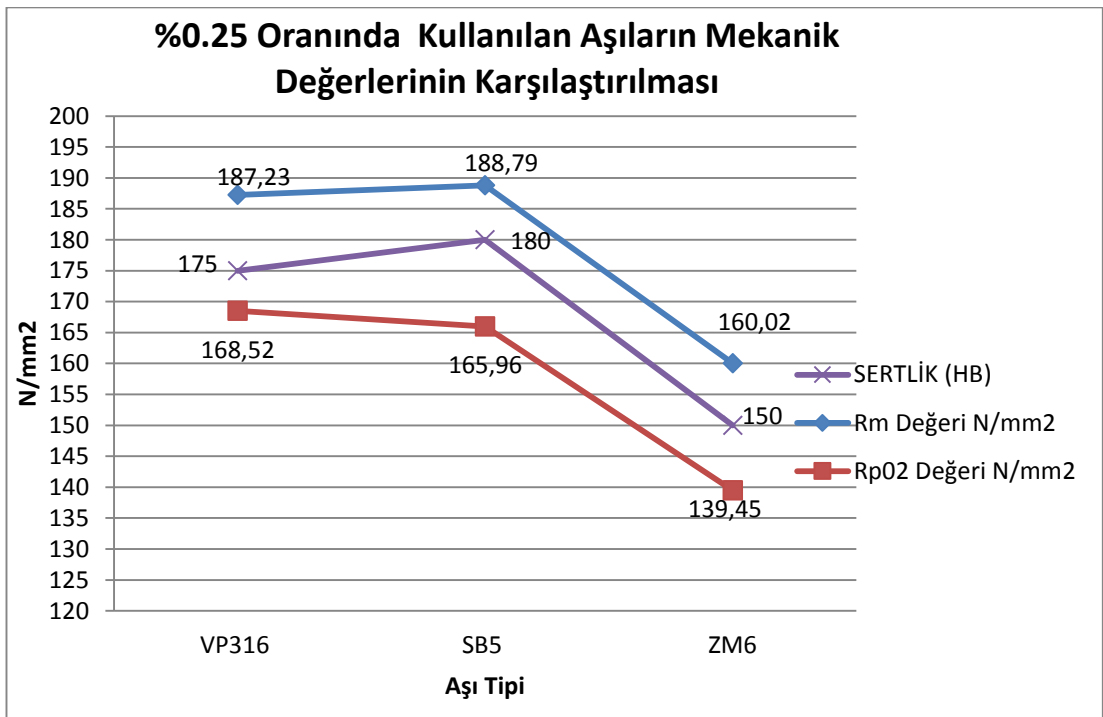
Şekil 5.28. GG25 Malzeme için ; farklı aşu tiplerinin %0.12 oranında kullanılmasının mekanik değerlere etkisinin grafiği



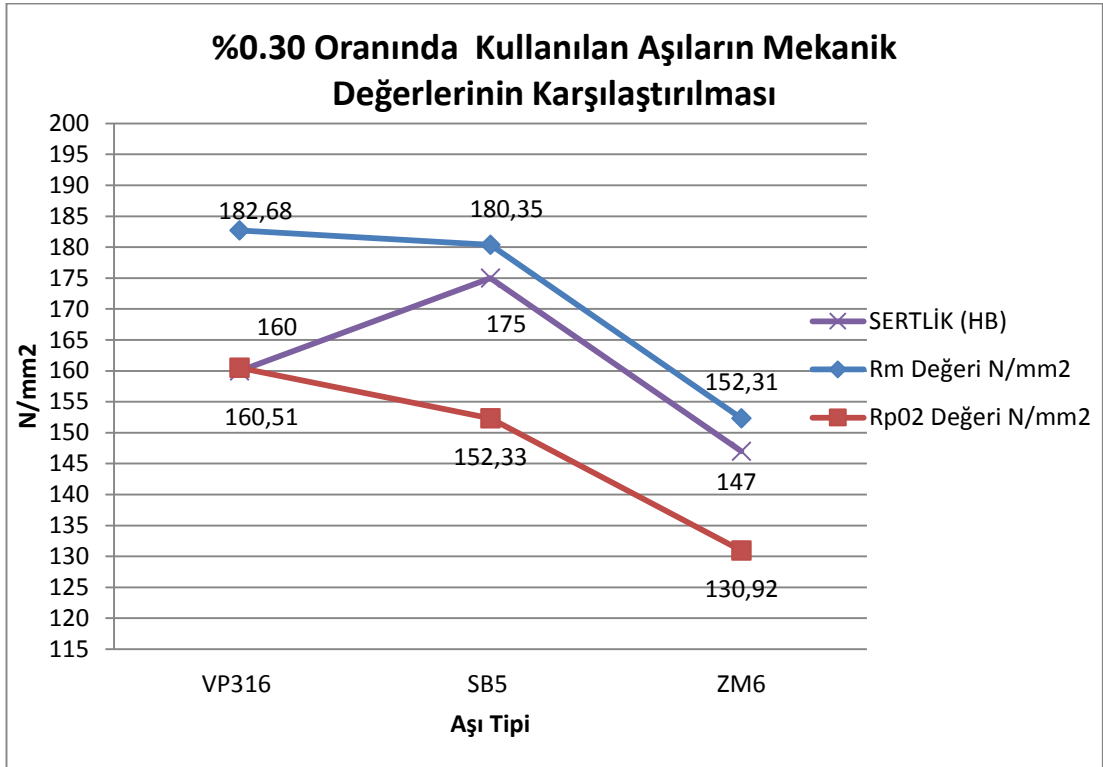
Şekil 5.29. GG25 Malzeme için ; farklı aşu tiplerinin %0.15 oranında kullanılmasının mekanik değerlere etkisinin grafiği



Şekil 5.30. GG25 Malzeme için ; farklı aşı tiplerinin %0.20 oranında kullanılmasının mekanik değerlere etkisinin grafiği



Şekil 5.31. GG25 Malzeme için ; farklı aşı tiplerinin %0.25 oranında kullanılmasının mekanik değerlere etkisinin grafiği



Şekil 5.32. GG25 Malzeme için ; farklı aşılarda kullanılması mekanik değerlere etkisinin grafiği

### 5.5. Aşılamanın Soğuma Eğrisi Üzerindeki Etkisi

- TL sıcaklığını düşürebilir
- Telow artar
- Tehigh artar
- R-değeri azalır
- Eğer hiperötektikte iseniz R değeri artabilir
- GRF 1 artar
- GRF 2 azalır
- $dT/dt_{TS}$  daha derin hale gelir.

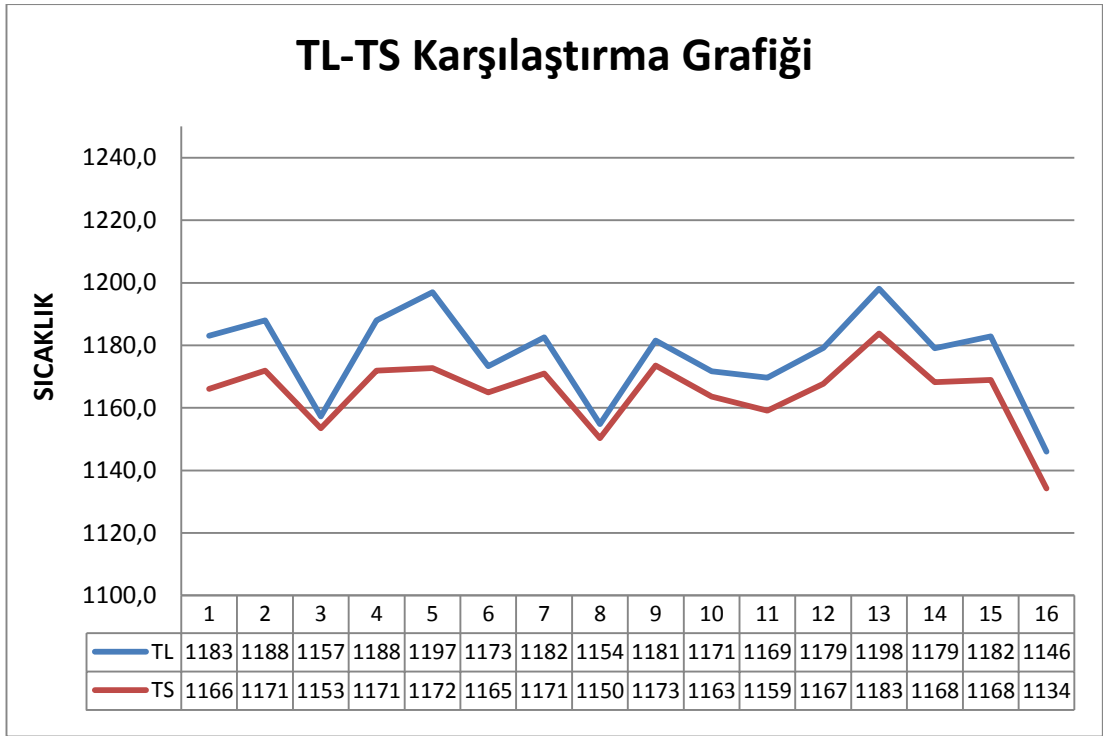
Termal analiz cihazından elde edilen sonuçlar Tablo 5.9.' da görülmektedir. Deneylerden elde edilen soğuma eğrileri Şekil 5.38. ile Şekil 5.53. arasındaki şekillerde görülmektedir.

Tablo 5.9. Termal analiz cihazından elde edilen veriler

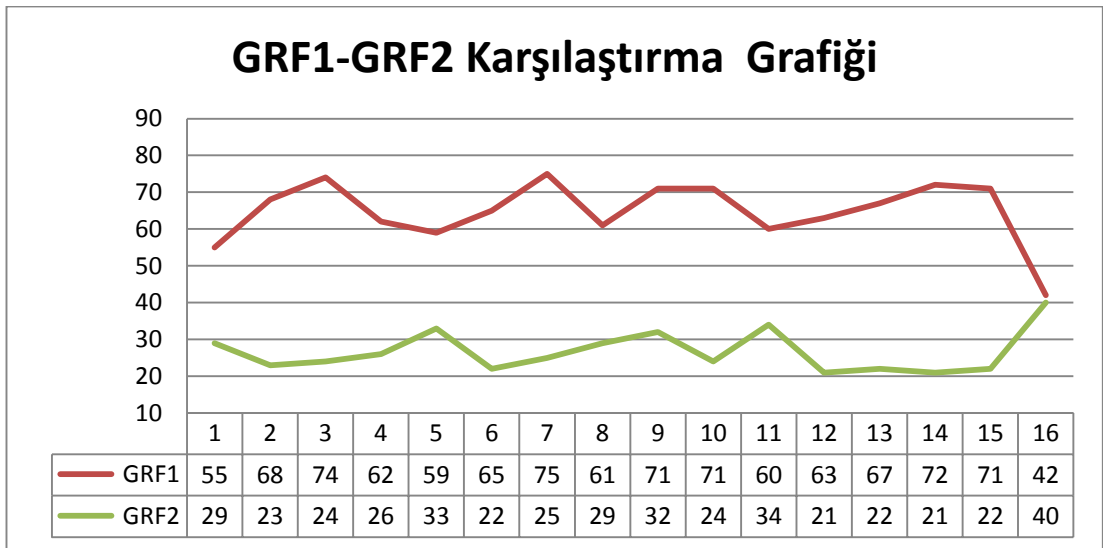
Numune N0	ACEL(Karbon Eşdeğerliği)	C	TL	dTdtES	TS	TElow	TEhigh	R	MaxRate	S1
1	4,13	3,63	1183,1	-3,62	1166,1	1137,4	1143,6	5,78	0,24	39
2	3,88	3,54	1188	-0,99	1171,9	1146,5	1150,8	4,35	0,19	41
3	4,15	3,62	1157,3	-0,41	1153,5	1146,3	1150,3	4,06	0,15	28
4	3,88	3,56	1188	-1,08	1171,9	1145,4	1150,5	5,11	0,2	39
5	3,8	3,62	1197	-1,39	1172,7	1134,8	1141,2	6,46	0,25	43
6	4,01	3,59	1173,3	-0,75	1165	1146,7	1150,6	3,93	0,15	36
7	3,93	3,56	1182,6	-0,74	1171	1150	1154	3,95	0,14	39
8	4,17	3,75	1154,8	-0,43	1150,3	1144,1	1148,6	4,53	0,16	25
9	3,93	3,56	1181,5	-0,81	1173,6	1150,5	1154,1	3,6	0,14	37
10	4,02	3,58	1171,7	-0,81	1163,6	1147,1	1151,3	4,2	0,17	34
11	4,04	3,61	1169,7	-0,87	1159,1	1141,4	1148,1	6,69	0,22	31
12	3,95	3,59	1179,2	-0,69	1167,7	1149,2	1152,7	3,53	0,13	38
13	3,79	3,62	1198,1	-1,41	1183,8	1145,8	1149,7	3,84	0,17	44
14	3,96	3,57	1179,1	-0,75	1168,2	1148,8	1152,5	3,64	0,12	38
15	3,92	3,55	1182,9	-1,02	1168,9	1144,7	1149,5	4,82	0,19	38
16	4,25	3,7	1146	-0,79	1134,2	1118,1	1125,4	7,23	0,22	30

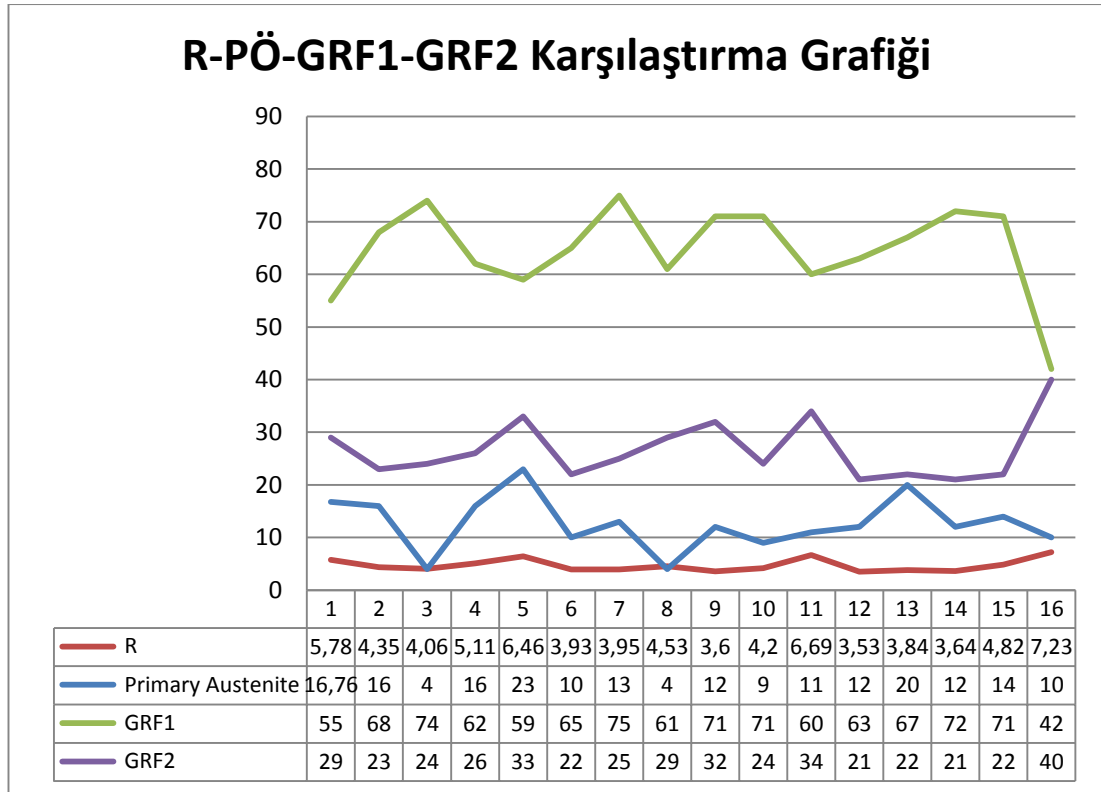
Numune No	S2	S3	GRF1	GRF2	Primary Austenite	dTdtTS	TS	Peak Temp	Metallurgical Quality	Oxidation Factor
1	29	32	55	29	16,76	-3,62	1100,4	1282,9	55	48
2	24	35	68	23	16	-4,03	1110,6	1322,2	87	41
3	26	46	74	24	4	-4	1109,6	1323,8	78	36
4	27	34	62	26	16	-3,78	1107,8	1344,7	87	44
5	24	33	59	33	23	-3,3	1098,6	1287,5	49	42
6	29	35	65	22	10	-4,19	1110,9	1272,6	89	45
7	23	38	75	25	13	-3,81	1116,3	1357,2	89	38
8	33	42	61	29	4	-3,62	1104,8	1305,3	64	44
9	23	40	71	32	12	-3,42	1112,4	1377	89	37
10	26	40	71	24	9	-3,97	1110,8	1318,2	81	39
11	31	38	60	34	11	-3,31	1102,9	1316,2	71	45
12	29	33	63	21	12	-4,27	1114	1321,3	84	47
13	24	32	67	22	20	-4,22	1110,8	1243	79	43
14	25	37	72	21	12	-4,24	1113,4	1333,6	89	40
15	24	38	71	22	14	-4,08	1110,4	1291,6	94	39
16	42	28	42	40	10	-3,08	1082,4	1369,8	30	60



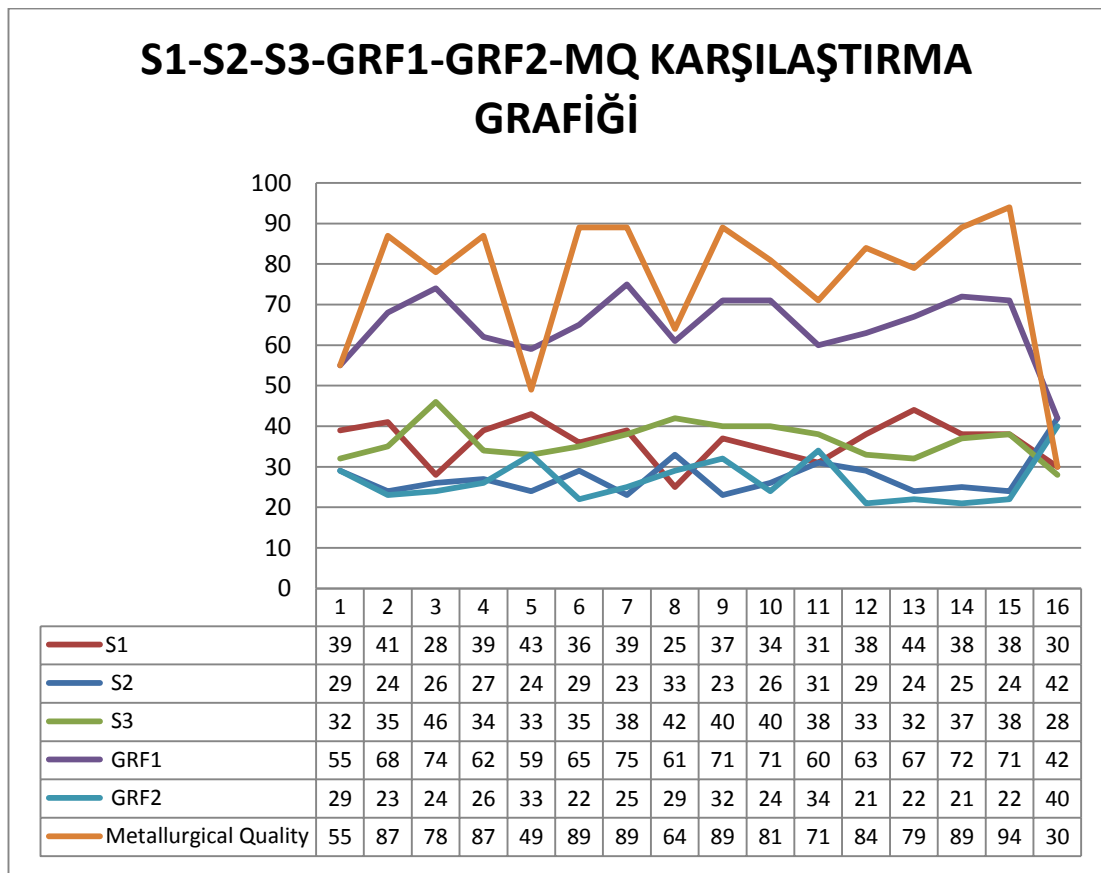
Şekil 5.33. TL-TS Karşılaştırma grafiği



Şekil 5.34. GRF1-GRF2 Karşılaştırma grafiği

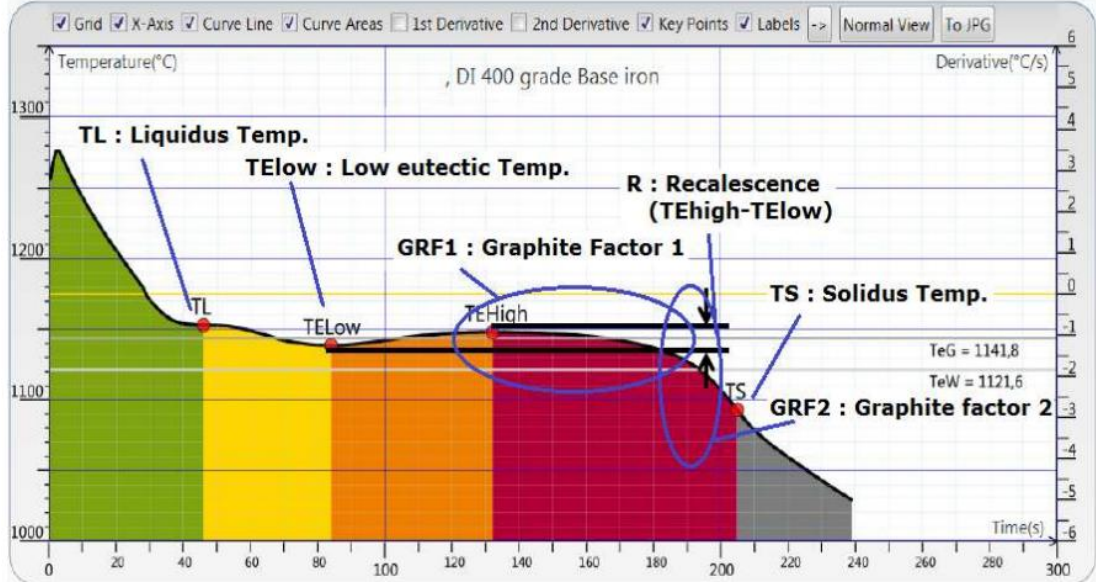


Şekil 5.35. R-PÖ-GRF1-GRF2 Karşılaştırma grafiği



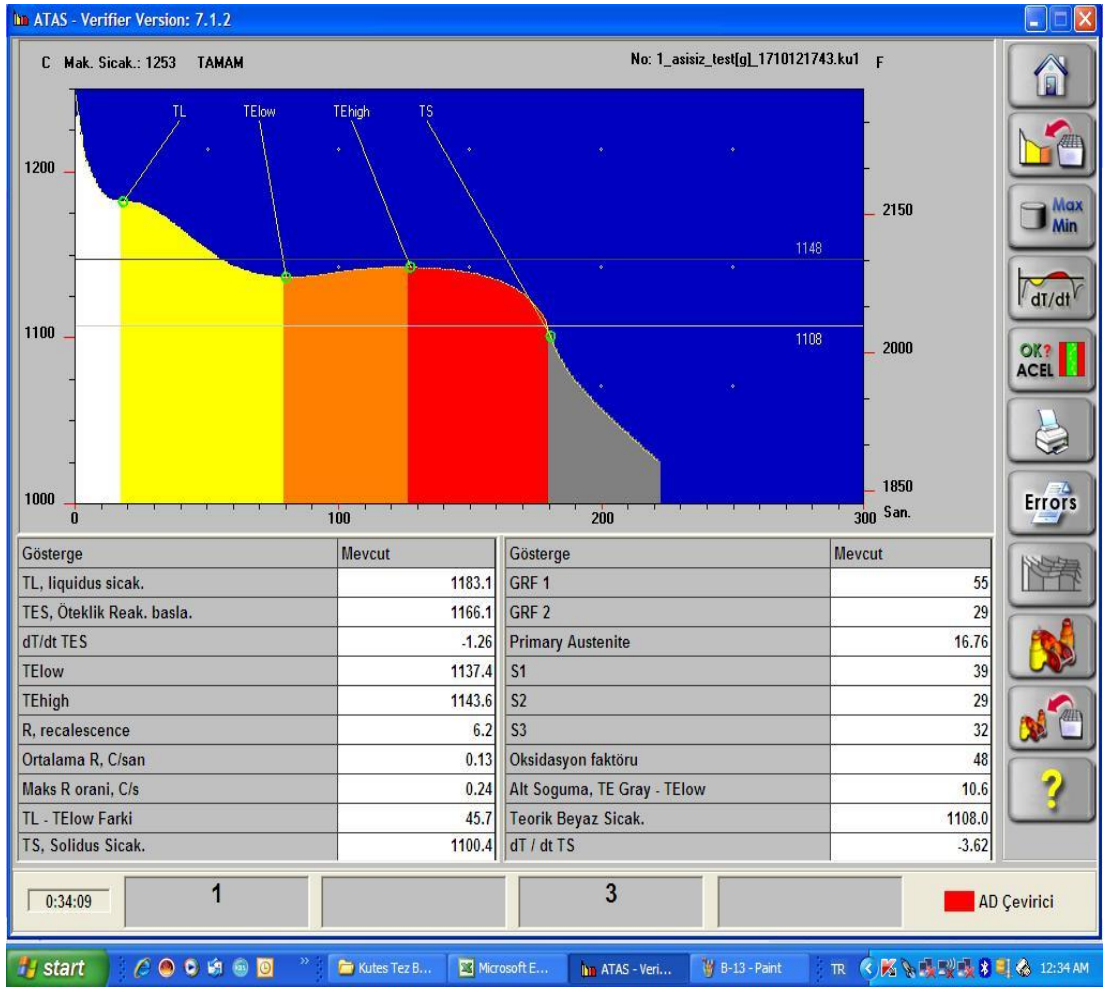
Şekil 5.36. S1-S2-S3-GRF1-GRF2-MQ Karşılaştırma grafiği

Termal Analiz programı, içerisinde termokupl bulunan numune kabına dökülen sıvı metalin, katılaşıma kadar geçen süreçte, zamana bağlı sıcaklık eğrisini çizer. Bu eğri Şekil 5.37.'de olduğu gibi görülmekte ve noktaların ne anlama geldiği aşağıda belirtilmektedir.



Şekil 5.37. Dökülen sıvı metalin zamana bağlı sıcaklık eğrisi örneği

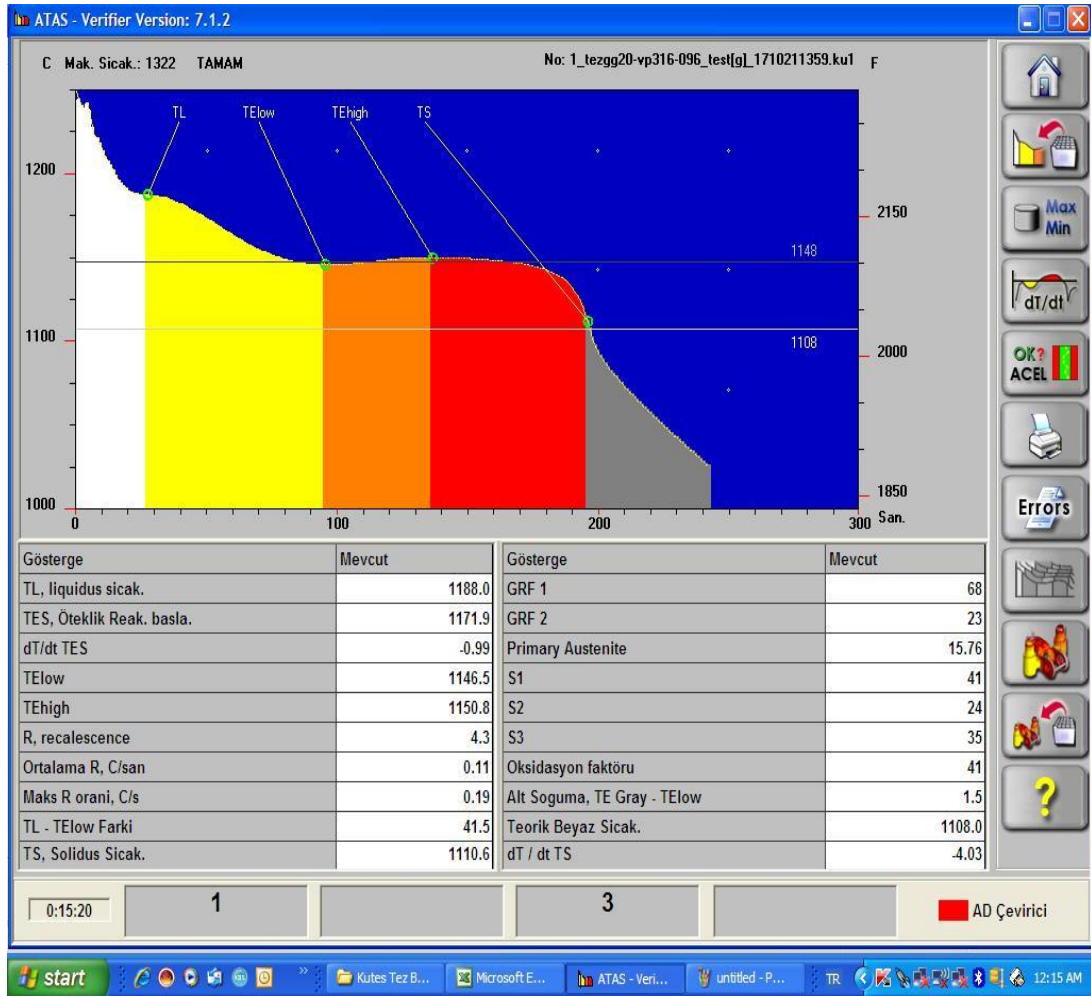
- 1.TL: Liquidus Sıcaklığı,  $f(\text{ACEL}, \text{Çözünmüş oksijen})$ , Katılaşıma başlangıç sıcaklığıdır.
- 2.Telow: Alt Ötektik Sıcaklığı. Ötektik katılaşıma Telow'a ulaşmadan önce başlar. Telow'a ulaşılan kadar besleme, besleyiciden sağlanır. Grafit genişmesi Telow sonrası başlar. (Yüksek olmalıdır)
- 3.R: Ötektik katılaşımanın ilk safhası boyunca çökelen östenit ve grafit miktarını yansıtır. (Düşük olmalıdır)
- 4.GRF 1: Ötektik katılaşımanın ikinci safhası boyunca çökelen grafit miktarını yansıtır. (Yüksek olmalıdır)
- 5.GRF 2: Isı iletkenliğini kullanarak, katılaşıma sonundaki grafit miktarı ve türü ile nodul sayısını tahmin eder. (Düşük olmalıdır.)
- 6.TS: Katılaşıma Sıcaklığı, Segregasyon ve ters çil oluşumu hakkında bilgi verir. (Yüksek olmalıdır.)



Şekil 5.38. GG25 Aşısız soğuma eğrisi

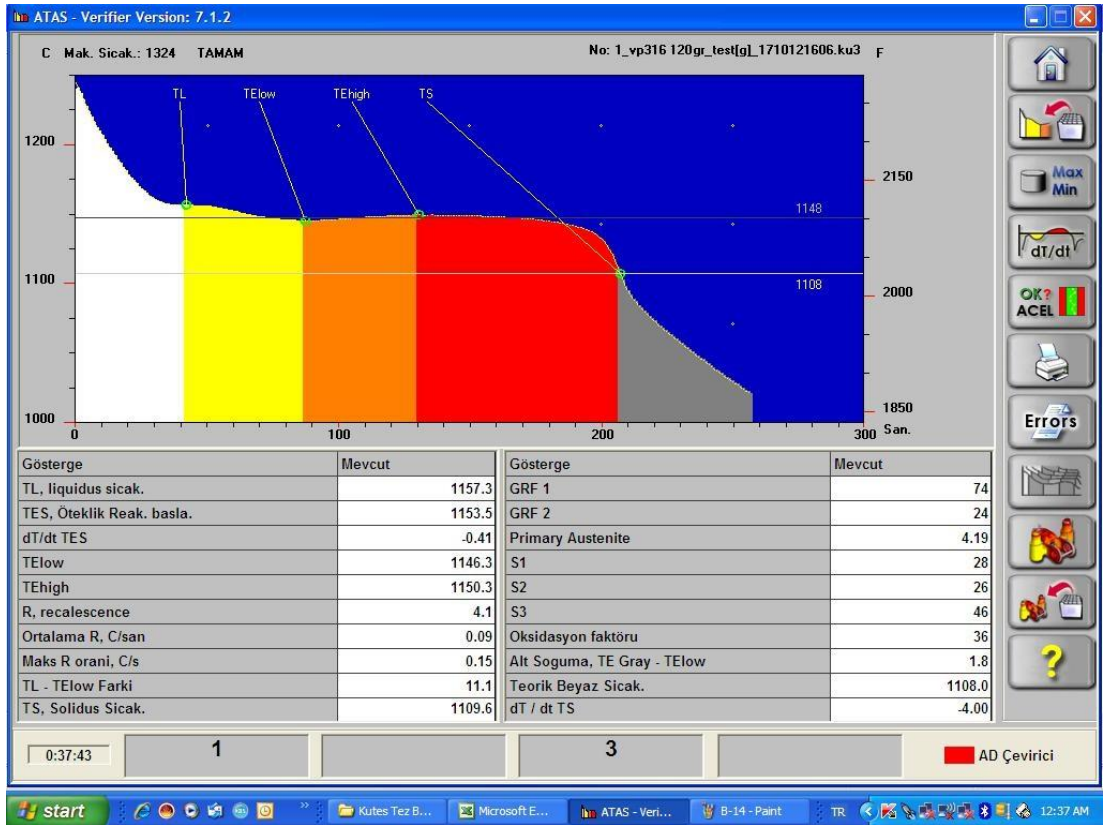
- Aşısız olduğu için TL 1183,1 ; Telow 1134,7 ve R 6,2 normal değerler. Yine aşısız olduğu için GRF1, GRF2, delta TS ve TS aşılıya göre düşük ancak normal sayılabilecek değerler olarak gözükmemektedir.





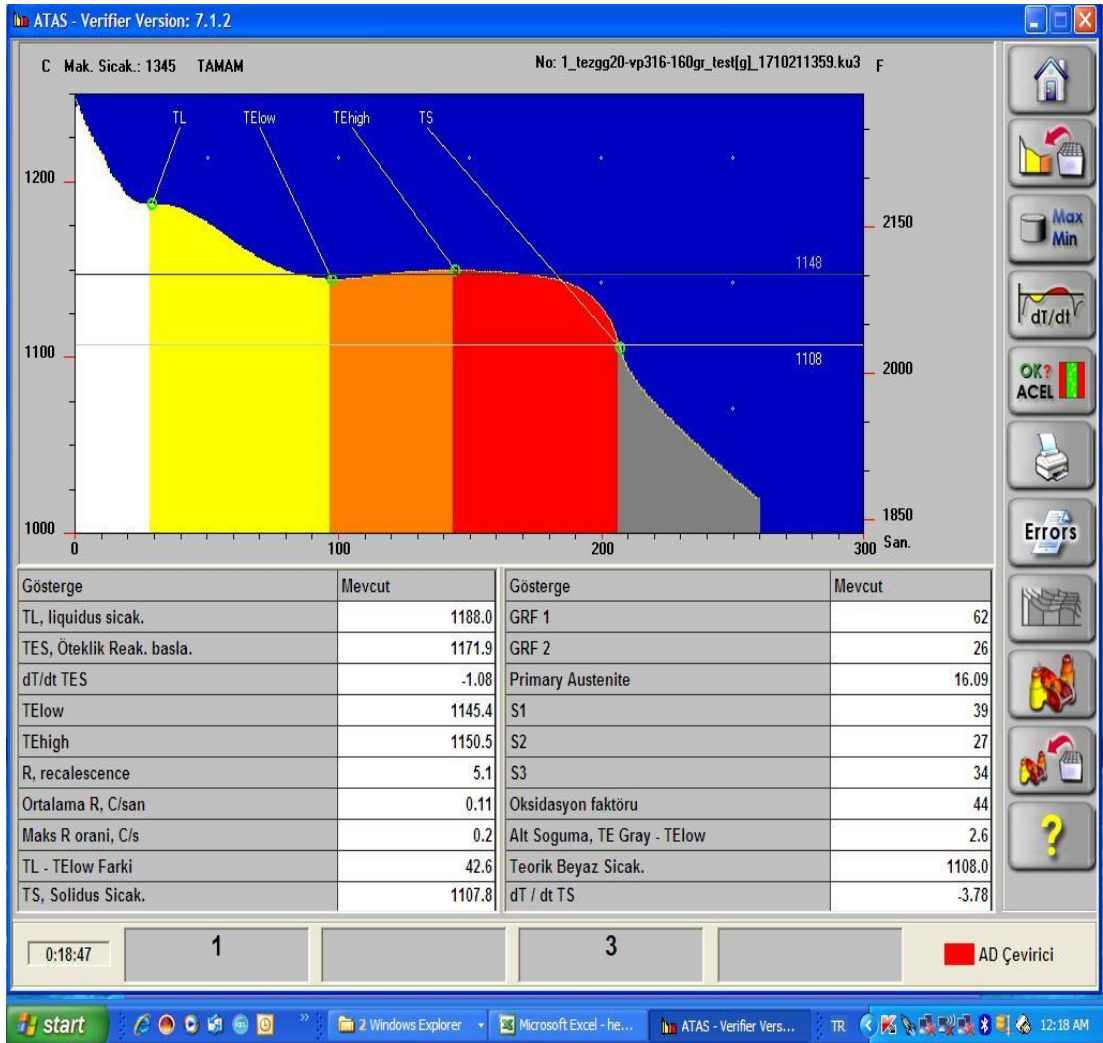
Şekil 5.39. VP316 %0.12 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1188; Primer Östenit miktarı %15,6 ve S1 alanın 41.
- TeLow değeri gayet iyi: 1146,5. R değeri de iyi: 4,3. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor: 68 ve 23.
- TS'nin türevi: - 4,03 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığı da 1110,6 derece.
- SB5 ve ZM-6 aşırı tiplerine nazaran ; %0,12 oranında kullanıldığında daha sert diyebiliriz. TL , S1 ve primer östenit yüksek .
- Gri için son derece normal ve güzel bir eğri olarak gözüküyor.



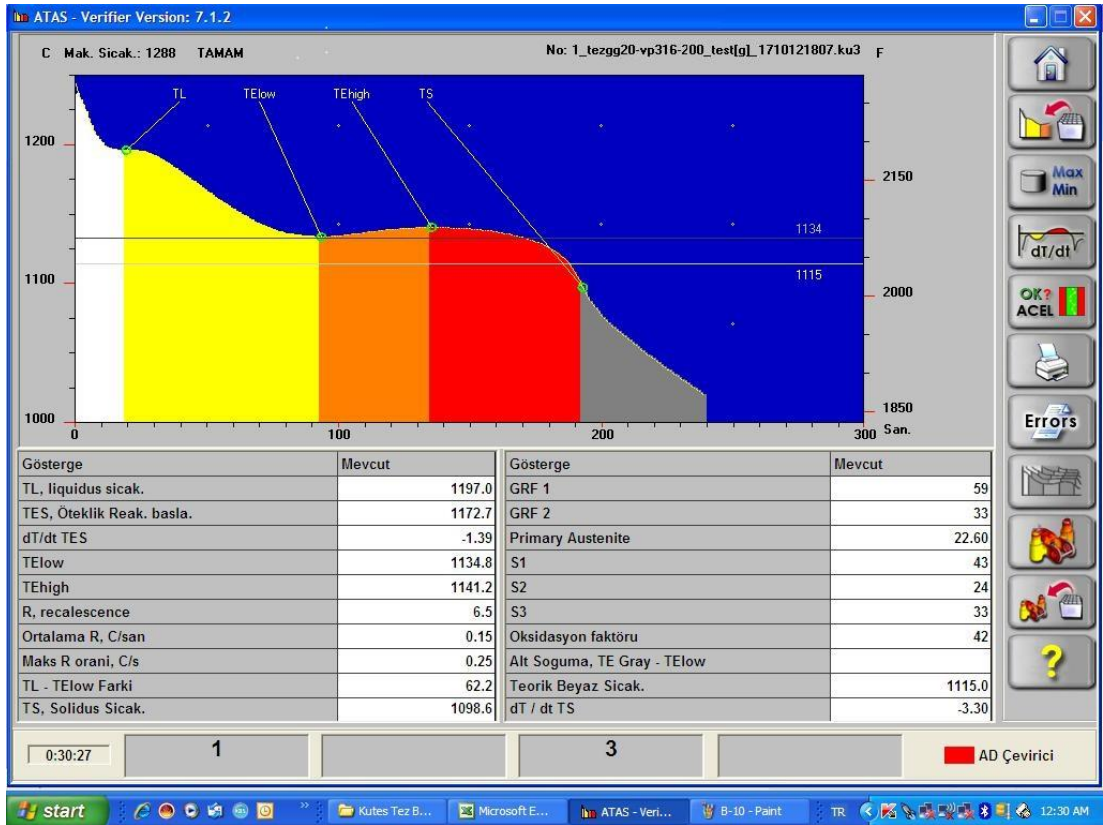
Şekil 5.40. VP316 %0.15 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1157,3; Primer Östenit miktarı %4,19 ve S1 alanın 28.
- TeLow değeri gayet iyi: 1146,3. R değeri de iyi: 4,1. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor: 74 ve 24.
- TS'nin türevi: -4,0 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığı da 1109,6 derece.
- TL , S1 ve primer östenit VP 316 %0.12 oranındaki aşırıya nazaran düşük olduğundan , daha yumuşak diyebiliriz.
- Gri için son derece normal ve güzel bir eğri olarak gözüküyor.



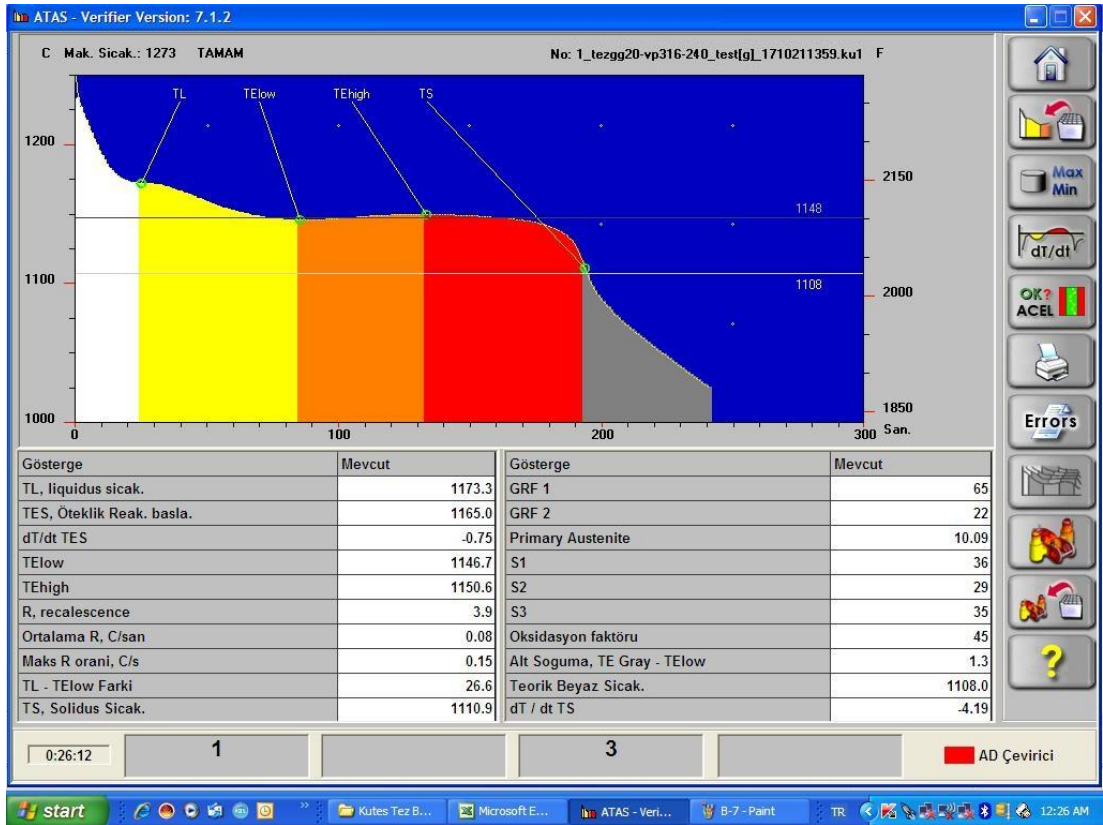
Şekil 5.41. VP316 %0.20 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1188; Primer Östenit miktarı % 16,09 ve S1 alanı 39.
- TeLow değeri gayet iyi: 1145,4 R değeri de iyi: 5,1. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor : 62 ve 26.
- TS'nin türevi : - 3,78 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığı da 1107,8 derece.
- VP316 %0.12 aşısına nazaran ; TL sıcaklıkları ve primer östenit değerleri eşit olmasına rağmen S1 alanı düşük olduğundan biraz daha yumuşak olduğunu söyleyebiliriz.
- Gri için son derece normal ve güzel bir eğri olarak gözüküyor.



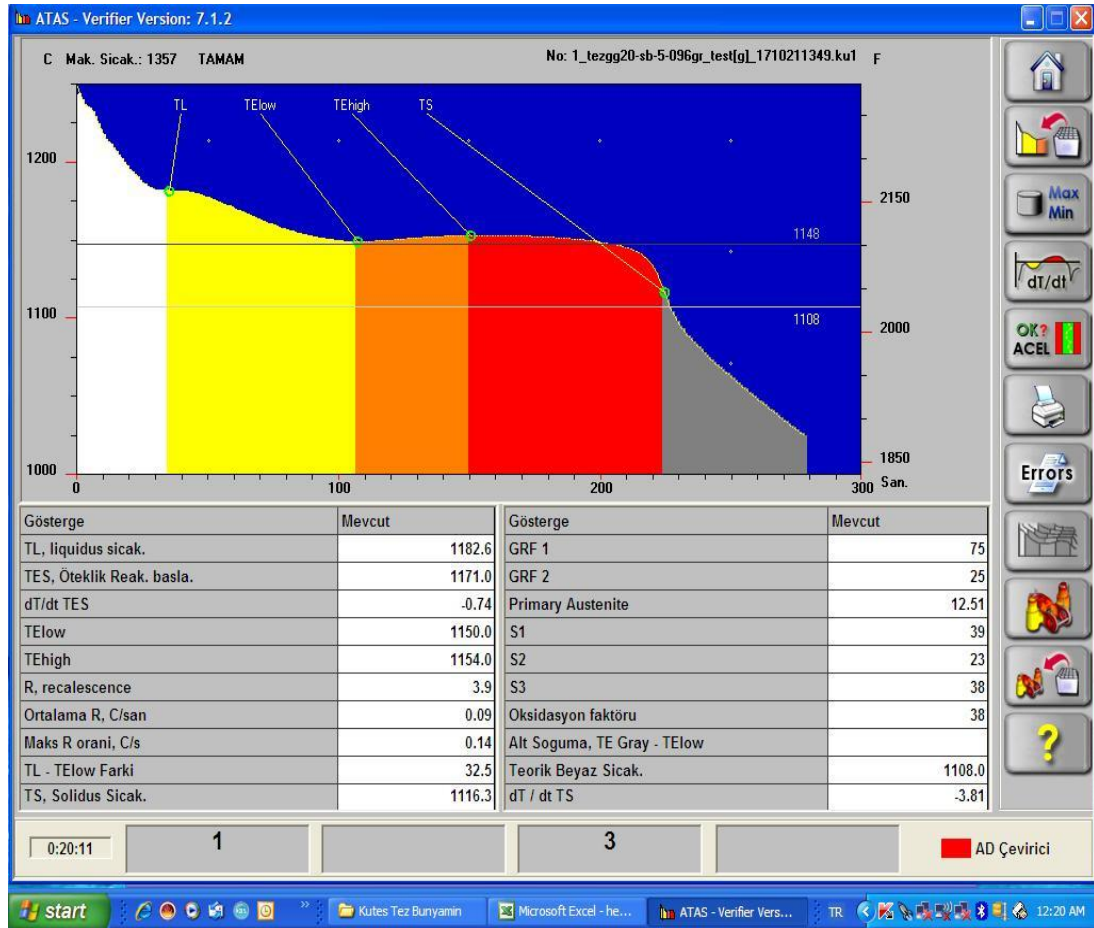
Şekil 5.42. VP316 %0.25 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1197; Primer Östenit miktarı % 22,60 ve S1 alanı 43.
- TeLow değeri gayet iyi: 1134,8 R değeri de iyi: 6,5. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor : 59 ve 33.
- TS'nin türevi : - 3,30 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığı da 1098,6 derece.
- Yukarıdaki VP316 %0.20 aşılı ; VP316 'nın %0.25 aşılı olanından daha iyi sonuçlar veriyor.
- Yani VP316 nın optimum ilave oranı %0.20 olmalı; 0,40 gram fazla gelip metali biraz bozuyor.
- Yine de gri dökme demir için güzel bir eğri olarak gözüküyor.



Şekil 5.43. VP316 %0.30 soğuma eğrisi

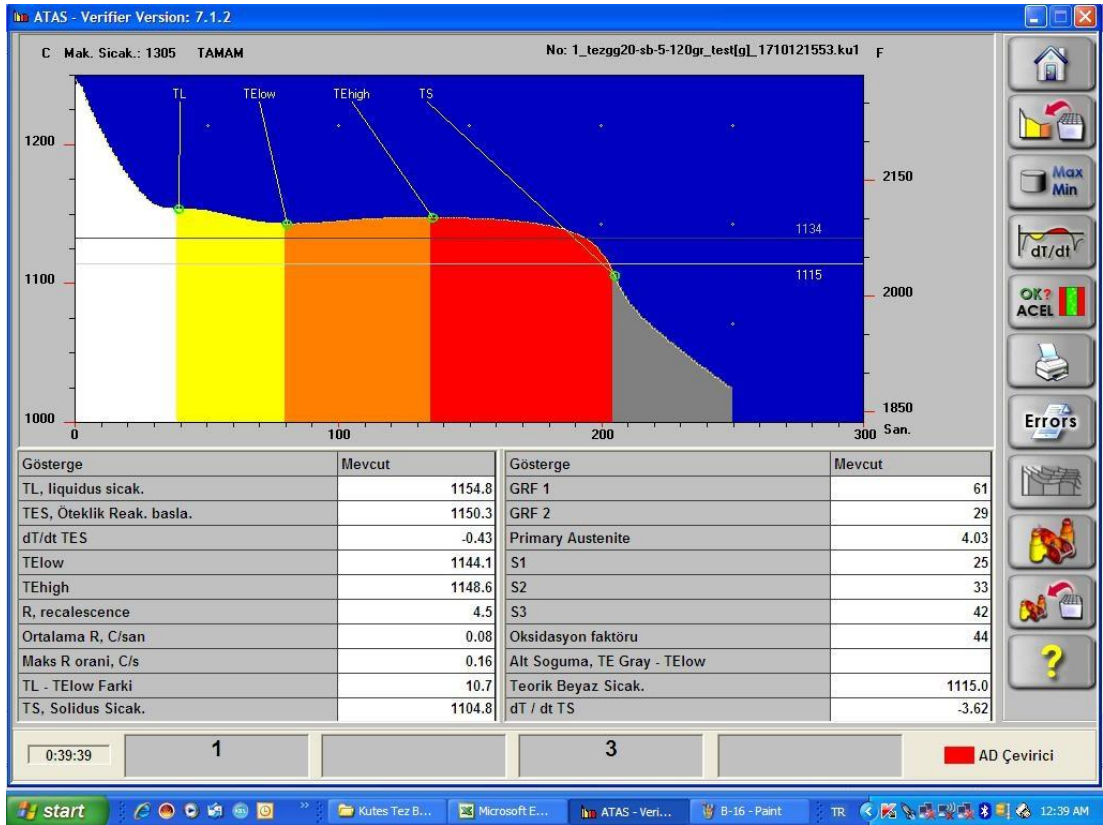
- TL sıcaklığı 1173,3; Primer Östenit miktarı % 10,90 ve S1 alanın 36.
- TeLow değeri gayet iyi: 1146,7 R değeri de iyi: 3,9. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor : 65 ve 22.
- TS'nin türü : - 4,19 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığı da 1110,9 derece.
- Gri için son derece normal ve güzel bir eğri olarak gözüküyor.VP316 %0.25 aşısına nazaran daha yumuşak olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 5.44. SB5 %0.12 soğuma eğrisi

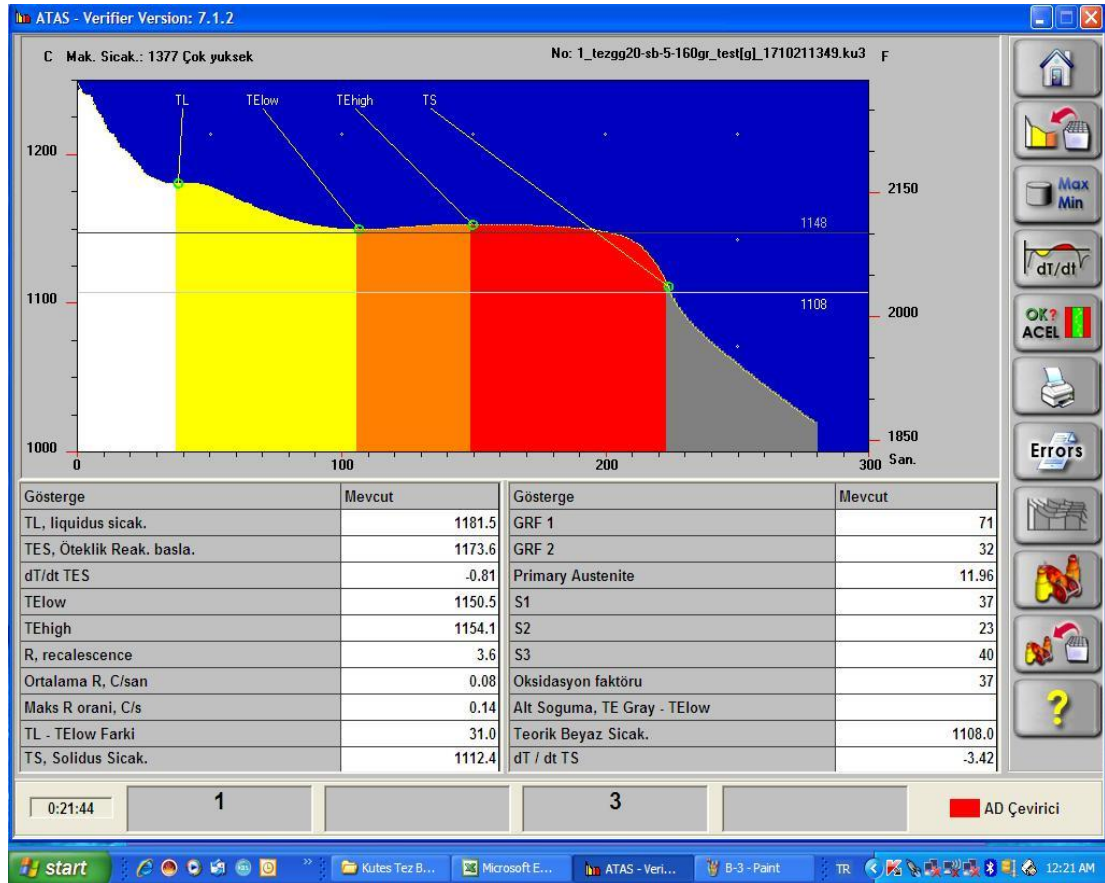
- TL sıcaklığı 1182,6; Primer Östenit miktarı % 12,51 ve S1 alanı 39.
- TeLow değeri gayet iyi: 1150.R değeri de yine iyi 3,9. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor :75 ve 25.
- TS'nin türevi : - 3,81 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığın da 1116,3 derece.
- VP316 %0.12 aşılıya nazaran primer östenit düşük.
- VP316 %0.12 aşılıya göre yumuşak diyebilirken , VP316 %0.25 ve %0.30 aşılıdan daha sert diyebiliriz.





Şekil 5.45. SB5 %0.15 soğuma eğrisi

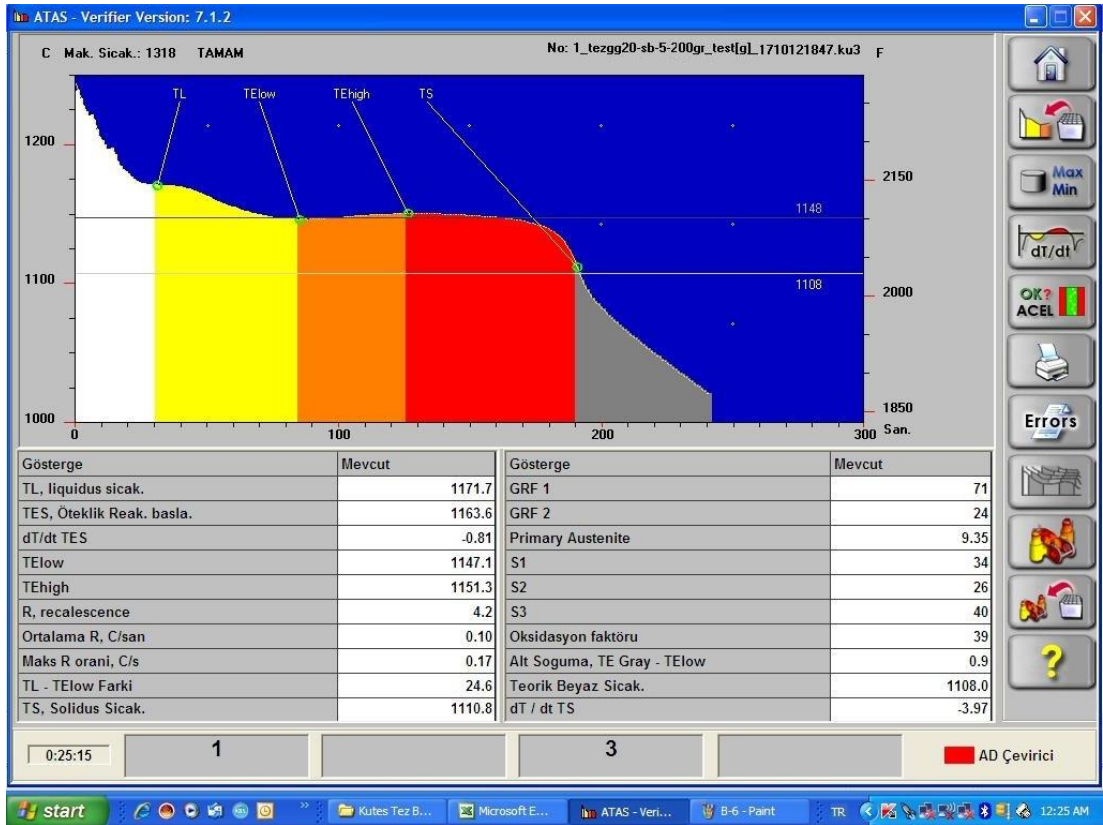
- TL sıcaklığı 1154,8; Primer Östenit miktarı % 4,03 ve S1 alanı 25.
- TeLow değeri gayet iyi: 1144,1. R değeri de iyi 4,5. Grafit Faktörü 1 iyi gözüküyor: 61; grafit faktörü 2 fena değil 29.
- TS'nin türevi : - 3,62. TS sıcaklığı da 1104,8 derece.
- Bu metal VP316 %0.12 aşya göre biraz daha yumuşak; TL'si , primer östenit miktarı ve S1 alanı daha düşük.
- TElow; R, GRF 1 daha iyi ancak grafitin şekli ve tipini gösteren GRF2 ve Delta TS(32 ve -3,42) VP316 %0.12 aşya göre biraz daha kötü ancak halen gayet iyi bir metal olarak nitelendirebiliriz.



Şekil 5.46. SB5 %0.20 soğuma eğrisi

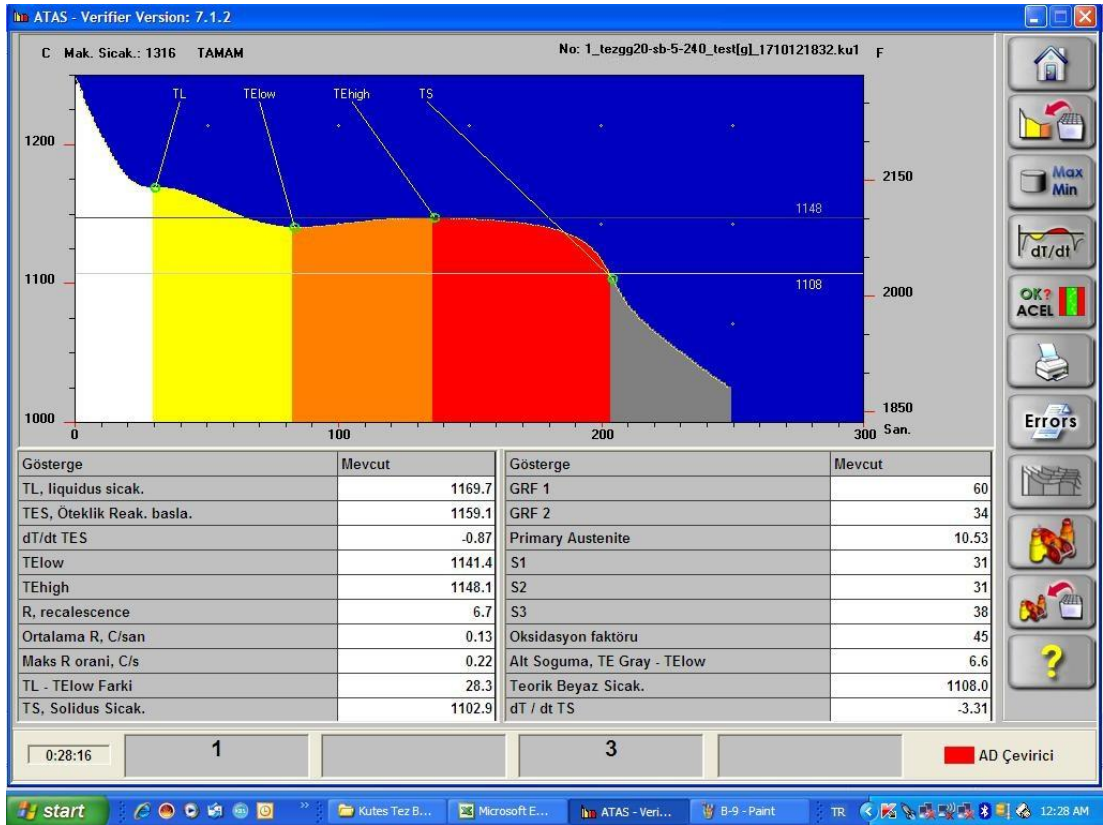
- TL sıcaklığı 1181,5; Primer Östenit miktarı % 11,96 ve S1 alanı 37.
- TeLow değeri gayet iyi: 1150,5. R değeri de iyi 3,6. Grafit Faktörü 1 iyi gözüküyor: 71; grafit faktörü 2 fena değil 32.
- TS'nin türevi : - 3,42. TS sıcaklığın da 1112,4 derece.
- Yukarıdaki SB5 %0.15 aşılı ; SB5 'in %0.20 aşılı olanından daha iyi sonuçlar veriyor.
- Yani SB5'in optimum ilave oranı %0.15 olmalı; 0,40 gram fazla gelip metali biraz bozuyor.
- Yine de gri dökme demir için güzel bir eğri olarak değerlendirilebilir.





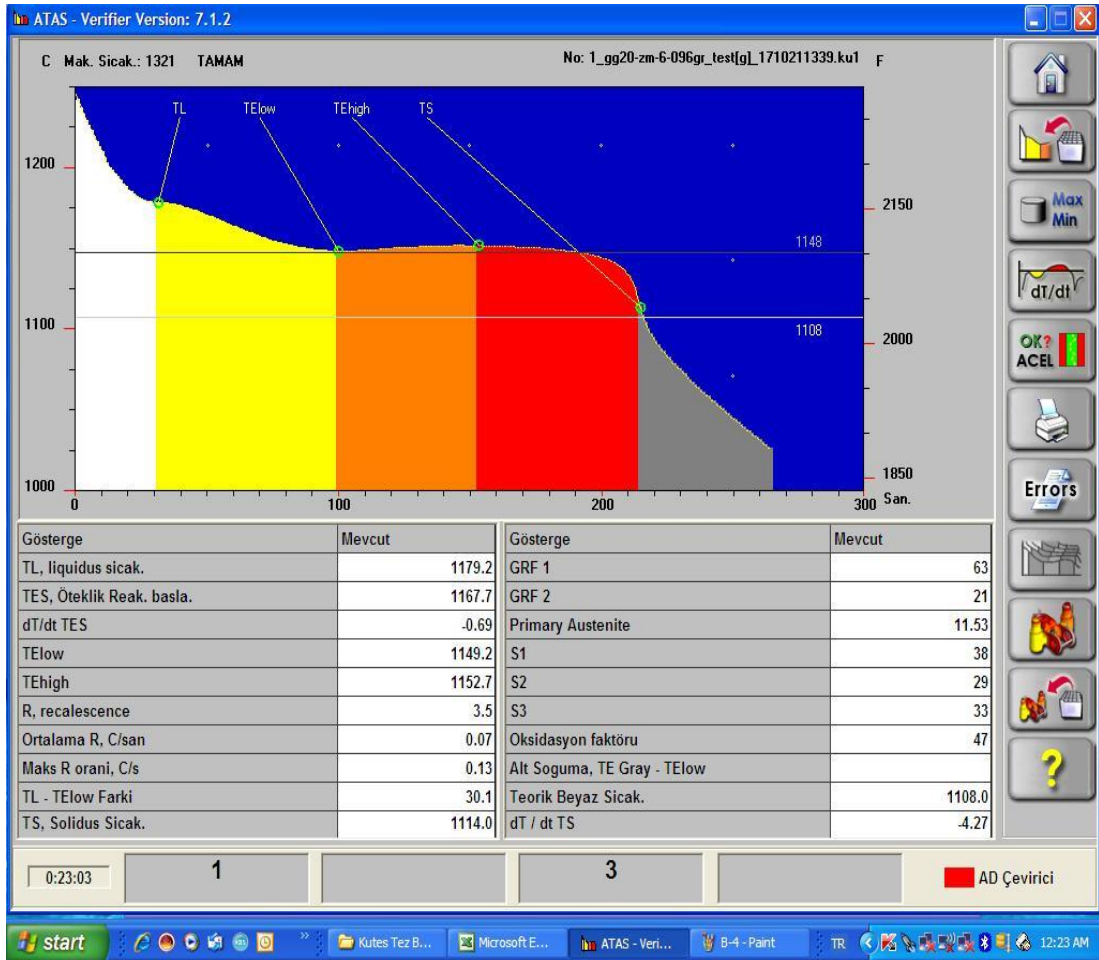
Şekil 5.47. SB5 %0.25 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1171,7; Primer Östenit miktarı % 9,35 ve S1 alanı 34.
- TeLow değeri gayet iyi: 1147,1. R değeri de yine iyi 4,2. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor : 71 ve 24.
- TS'nin türevi : - 3,97 ile en yüksek. TS sıcaklığın da 1110,8 derece.
- Gri için son derece normal ve güzel bir eğri olarak gözüküyor.SB5 %0.20 aşısına nazaran daha yumuşak olduğunu söyleyebiliriz.



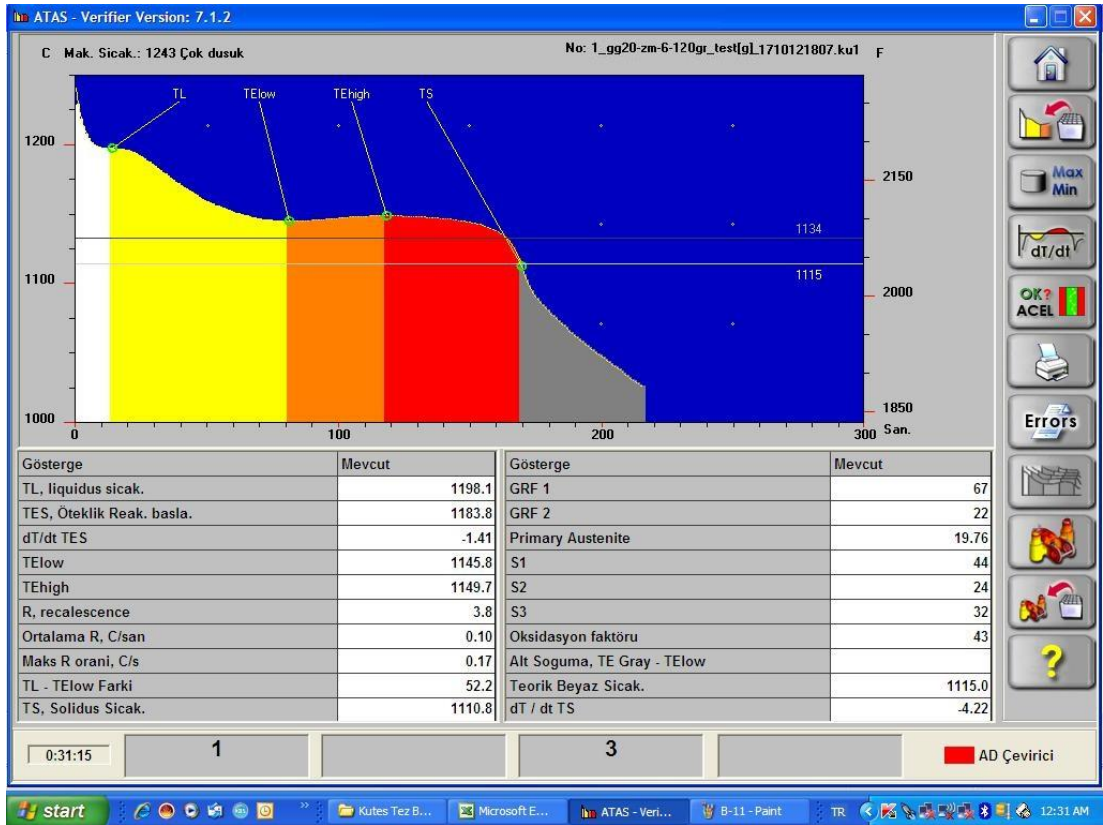
Şekil 5.48. SB5 %0.30 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1169,7; Primer Östenit miktarı % 10,53 ve S1 alanı 31.
- TeLow değeri gayet iyi: 1141,4. R değeri de yine iyi 6,7. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor : 60 ve 34.
- TS'nin türevi : - 3,31. TS sıcaklığın da 1102,9 derece.
- VP316 %0.12 aşılıya nazaran primer östenit düşük.
- VP316 %0.12 aşılıya göre yumuşak diyebilirken , VP316 %0.30 aşılıdan daha sert diyebiliriz.



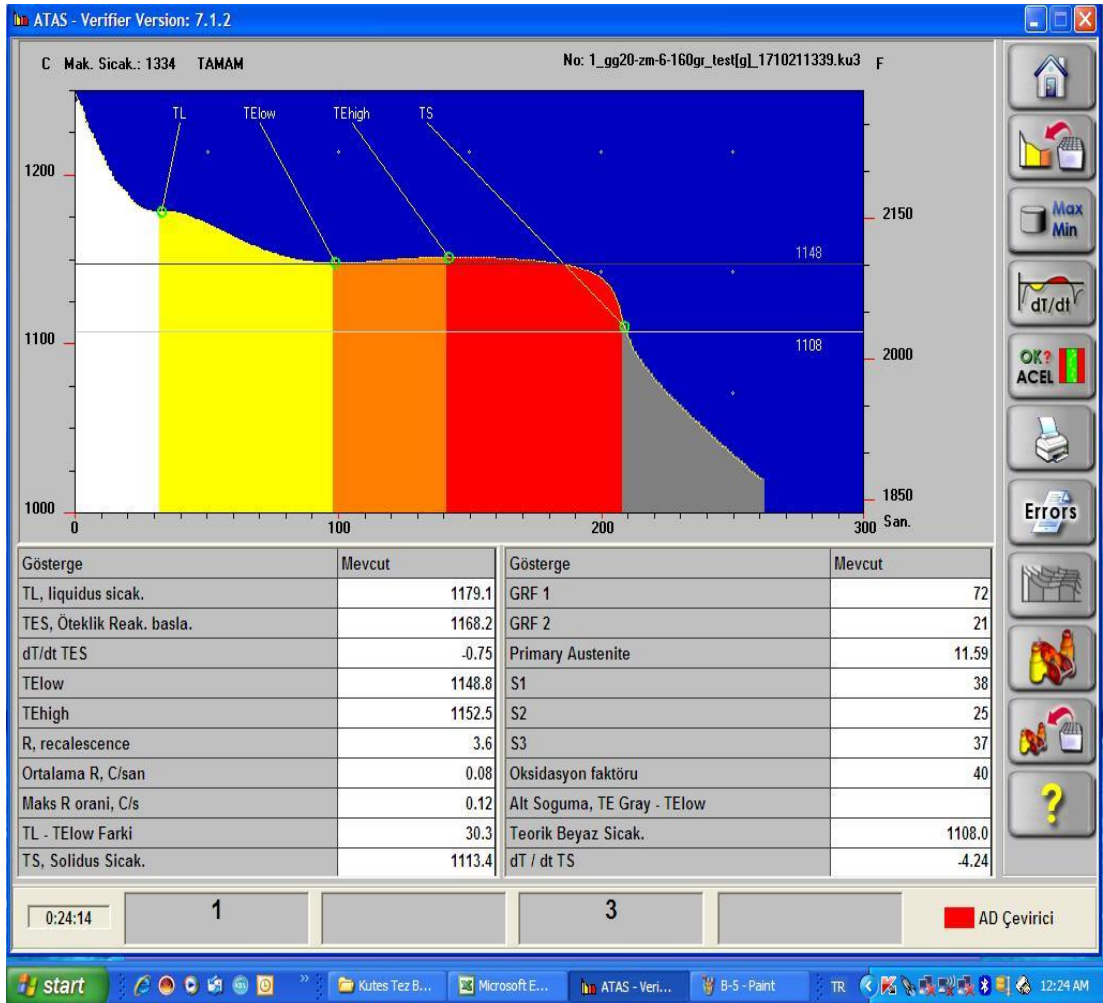
Şekil 5.49. ZM6 %0.12 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1179,2; Primer Östenit miktarı % 11,53 ve S1 alanı 38.
- TeLow değeri gayet iyi: 1149,2. R değeri de yine iyi 3,5. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor : 63 ve 21.
- TS'nin türevi : - 4,27 ile en yüksek. TS sıcaklığın da 1114 derece.
- Yukarıdaki SB-5'in %0.20 lik oranına göre çok benzer sonuçlar var. Ancak TS'nin türevini en çok yükseltmesi dikkat çekici (Grafitin şekli ve tipi açısından). Buna karşılık grafit miktarını belirten GRF1 değeri en iyi SB-5 de gözüküyor.
- Genel olarak; Primer östenit ve S1 değerleri için SB5 daha düşük değerler vermesi nedeni ile daha iyi diyebiliriz.



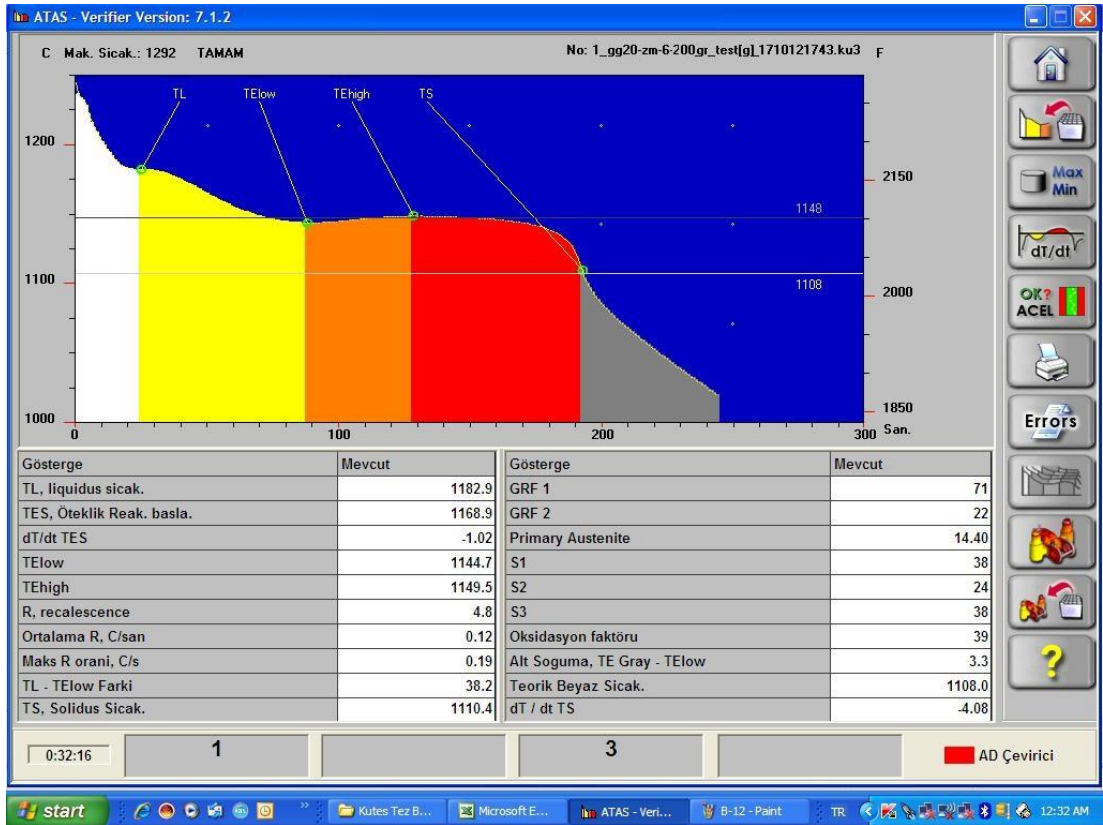
Şekil 5.50. ZM6 %0.15 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1198,1 ; Primer Östenit miktarı % 19,76 ve S1 alanı 44.
- TeLow değeri gayet iyi: 1145,8 R değeri de iyi: 3,8. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor: 67 ve 22.
- TS'nin türevi: - 4,22 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığı da 1110,8 derece.
- Yukarıdaki ZM-6 %0.12 aşılı ; ZM-6 'nın %0.15 aşılı olanından daha iyi sonuçlar veriyor.
- Yani ZM-6'nın optimum ilave oranı %0.12 olmalı; 0,24 gram fazla gelip metali biraz bozuyor.
- Yine de gri dökme demir için güzel bir eğri olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5.51. ZM6 %0.20 soğuma eğrisi

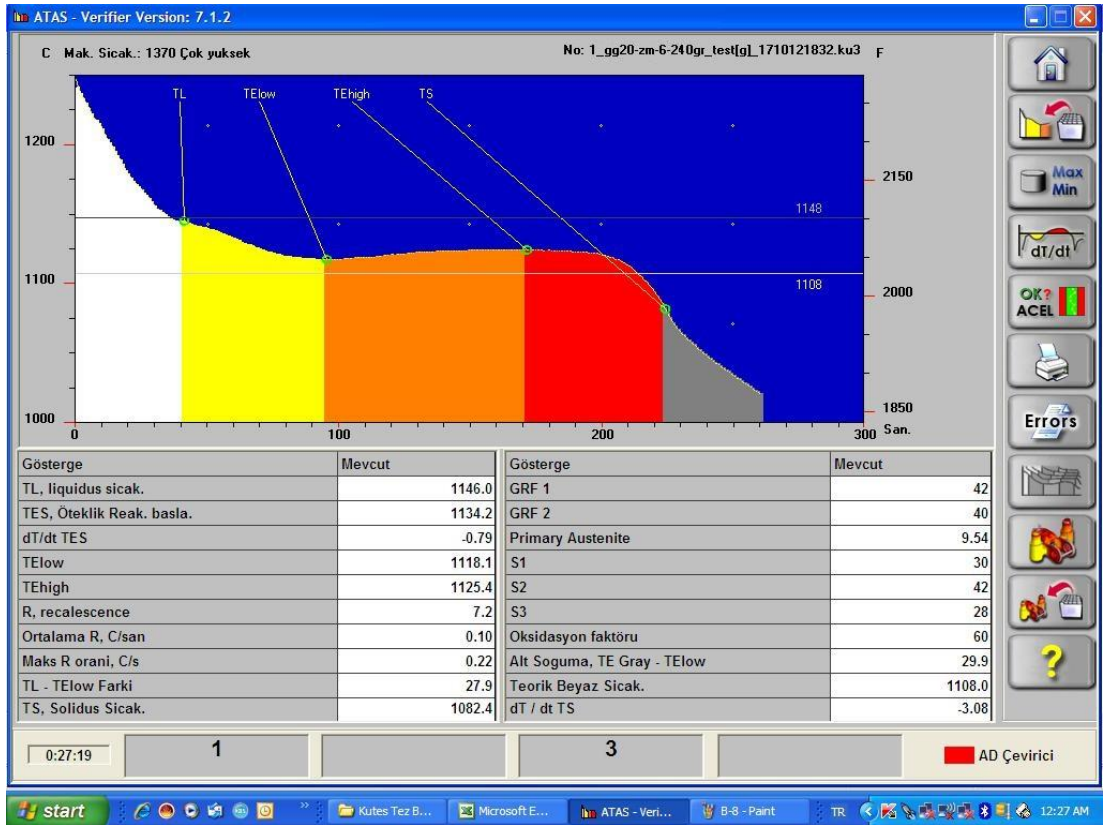
- TL sıcaklığı 1179,1 ; Primer Östenit miktarı % 11,59 ve S1 alanı 38.
- TeLow değeri gayet iyi: 1148,8 R değeri de iyi: 3,6. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüktüyor: 72 ve 21.
- TS'nin türevi: - 4,24 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığı da 1113,4 derece.
- Gri için son derece normal ve güzel bir eğri olarak gözüktüyor.
- TS'nin türevini en çok yükseltmesi dikkat çekici (Grafitin şekli ve tipi açısından).
- Grafit miktarını belirten GRF1 değeri ZM6 %0.12 aşığına göre daha iyi diyebiliriz.
- Primer östenit ve S1 değerleri SB ve VP316 aşılara göre daha yüksek değerler vermesi nedeni ile daha kötü gibi duruyor diyebiliriz.



Şekil 5.52. ZM6 %0.25 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1182,9; Primer Östenit miktarı % 14,40 ve S1 alanı 38.
- TeLow değeri gayet iyi: 1144,7 R değeri de iyi: 4,8. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor: 71 ve 22.
- TS'nin türevi: - 4,08 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığı da 1110,4 derece.
- VP 316 %0.25 aşılıya göre daha düşük S1 alanı ve primer östenit miktarı olduğundan daha yumuşak diyebiliriz.
- S1 alanı ve TL sıcaklıkları aynı olmasına rağmen primer östenitin yüksek olmasından dolayı ZM6 %0.20 aşılıya göre daha yumuşak diyebiliriz.
- Gri için son derece normal ve güzel bir eğri olarak gözüküyor.





Şekil 5.53. ZM6 %0.30 soğuma eğrisi

- TL sıcaklığı 1146; Primer Östenit miktarı % 9,54 ve S1 alanı 30.
- TeLow değeri gayet iyi: 1118,1 R değeri de iyi: 7,2. Grafit Faktörü 1 ve 2 de iyi gözüküyor: 42 ve 40.
- TS'nin türevi: - 3,08 bu da iyi bir değer. TS sıcaklığı da 1082,4 derece.
- Bütün aşı tipleri ve kullanım oranlarıyla karşılaştırıldığında düşük S1 alanı , primer östenit ve TL sıcaklıklarını verdiğiinden , en yumuşak parça diyebiliriz.
- Gri için son derece normal ve güzel bir eğri olarak gözüküyor.

## KAYNAKLAR

- [1] Sağlam, D., Dökme demirlerin aşınma özellikleri. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [2] Cevher, Ö., Dökme demirlerde sert faz oluşumunun önlenmesi ve giderilmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [3] I. Chakrabarty, Alloy Cast Irons and Their Engineering Applications. Elsevier Ltd., Varanasi, India, 2018.
- [4] T. Alp, A. Wazzan, F. Yilmaz, Microstructure-property relationships in cast irons, Arab. J. Sci., vol. 30, no. 2, pp. 163–175, 2005.
- [5] K. B. Rundman, F. Iacoviello, Cast Irons, Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng., no. July 2015, pp. 1–11, 2016.
- [6] J. M. Borrajo, R. A. Martínez, R. E. Boeri, J. A. Sikora, Shape and Count of Free Graphite Particles in Thin Wall Ductile Iron Castings., ISIJ Int., vol. 42, no. 3, pp. 257–263, 2008.
- [7] P. David, J. Massone, R. Boeri, J. Sikora, Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron-Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution, ISIJ Int., vol. 44, no. 7, pp. 1180–1187, 2008.
- [8] A. de A. Vicente, J. R. Sartori Moreno, T. F. de A. Santos, D. C. R. Espinosa, and J. A. S. Tenório, Nucleation and growth of graphite particles in ductile cast iron, J. Alloys Compd., vol. 775, pp. 1230–1234, 2019.
- [9] Köroğlu, M., Aşılmalı tane büyüklüğü ve miktarının gri dökme demirde mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 1989.
- [10] Özel A., Ertürk S.Ö., Yıldız E., Aydın C., Kumruoğlu L.C., Dökme Demirlerde Termal Analiz Yöntemiyle Besleyicisiz Döküm Limitlerinin Belirlenmesi, 13th International Materials Symposium, Denizli, 2010 .
- [11] Tan, E., Dökme Demirden İmal Edilen Hadde Merdanelerinin Aşınma Davranışına Bakır Katkı Oranının Etkisi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2005.



- [12] L. R. R. da Silva, R. S. Ruzzi, V. C. Teles, W. F. Sales, W. L. Guesser, and A. R. Machado, Analysis of the coefficient of friction at the workpiece-tool interface in milling of high strength compacted graphite cast irons, *Wear*, vol. 426–427, no. January, pp. 1646–1657, 2019.
- [13] J. O. Choi, J. Y. Kim, C. O. Choi, J. K. Kim, P. K. Rohatgi, Effect of rare earth element on microstructure formation and mechanical properties of thin wall ductile iron castings, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 383, no. 2, pp. 323–333, 2004.
- [14] R. L. Nadal, A. S. Roca, H. D. C. Fals, E. J. Zoqui, Mechanical properties of thixoformed hypoeutectic gray cast iron, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 226, pp. 146–156, 2015.
- [15] Akgül, B., Gri Dökme Demirde Kalayın(Sn) Mikroyapıya Ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- [16] Baydoğan, M., GGG-60 sınıfı küresel grafitli dökme demirde östemperlenme ısıtılmasının çekme, yorulma ve aşınma özelliklerine etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 1996.
- [17] Avcı, Y., Kompakt Grafitli Dökme Demirlerin Döküm Yöntemlerinin Tanımlanması, Metalografik ve Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2005.
- [18] A. Vadiraj, G. Balachandran, M. Kamaraj, B. Gopalakrishna, K. Prabhakara Rao, Studies on mechanical and wear properties of alloyed hypereutectic gray cast irons in the as-cast pearlitic and austempered conditions, *Mater. Des.*, vol. 31, no. 2, pp. 951–955, 2010.
- [19] R. Ghasemi, L. Elmquist, E. Ghassemali, K. Salomonsson, A. E. W. Jarfors, Abrasion resistance of lamellar graphite iron: Interaction between microstructure and abrasive particles, *Tribol. Int.*, vol. 120, no. 2017, pp. 465–475, 2018.
- [20] R. C. Dommarco, M. E. Sousa, and J. A. Sikora, Abrasion resistance of high nodule count ductile iron with different matrix microstructures, *Wear*, vol. 257, no. 11, pp. 1185–1192, 2004.
- [21] Bazdar M., Abbası H.R., Yaghtın A.H., Rassızadehghani J., Effect of Sulfur on Graphite Aspect Ratio and Tensile Properties in Compacted Graphite Irons, *Elsevier Journal of materials Processing Technology*, syf.1701-1705, 2009.
- [22] Myint A. M. M. T. Z., Lwin B. K. T., Study on the Effect of Weight Percentage Variation and Size Variation of Magnesium Ferrosilicon Added, Gating System Design and Reaction Chamber Design on Inmold Process, *Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 36, syf. 2070-3740, 2008.

- [23] S. Boonmee, K. Worakhut, Thermal analysis system for iron melt quality control, *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 3, pp. 9497–9505, 2018.
- [24] N. K. Vedel-Smith, J. Rasmussen, and N. S. Tiedje, Thermal distortion of disc-shaped ductile iron castings in vertically parted moulds, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 217, pp. 262–271, 2015.
- [25] Hossain, A., Alaşım elementlerinin gri dökme demir mikro yapısı ve mekanik özelliklerine etkisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 1989.
- [26] Özel, A., GGG 40-80 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Östemperleme Isıl İşleminin Darbe Direnci ve Geçiş Sıcaklığına Darbe Etkisinin İncelenmesi,, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 1994.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Bünyamin KURT, 03.02.1988'de Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bursa'da tamamladı. 2006 yılında Bursa Çınar Lisesi'nden mezun oldu. 2006 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü 2010 yılında bitirdi. 2011 yılında Aydın Nazilli ilçesinde Jandarma olarak askerliğini tamamladı. 2012 yılında yine Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2011 Aralık ayında girmiş olduğu Kutes Döküm firmasında Üretim Müdürü olarak halen çalışmaya devam etmektedir.