

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CGI MALZEMEYE AİT MALZEME MODELİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK
YOLLA GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selçuk KESER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı

ARALIK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CGI MALZEMEYE AİT MALZEME MODELİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK
YOLLA GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Selçuk KESER
(503111312)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa BAKKAL

ARALIK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111312 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Selçuk KESER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “CGI MALZEMEYE AİT MALZEME MODELİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK YOLLA GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mustafa BAKKAL**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Haydar LİVATYALI**

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ

İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Aralık 2015**
Savunma Tarihi : **30 Aralık 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim sayesinde yakından tanıma ve çalışma fırsatı yakaladığım, teorik bilgisi, pratik becerisi ve deneyimlerinin harmanlanmış bütünüyle desteğini bir an olsun benden esirgemeyen değerli saygıdeğer hocam, tez danışmanım Doç. Dr. Mustafa BAKKAL'a, harcadığı zamanı, verdiği emeği ve paylaştığı tecrübeleri için sonsuz teşekkür ederim.

Fikir, öneri ve yol göstericiliğiyle yüksek lisans hayatım boyunca yardımlarını eksik etmeyen ve çalışma sürecimin keyifli hale gelmesinde payı büyük olan değerli hocalarım Doç. Dr. Turgut Gülmez, Prof. Dr. Haydar Livatyalı'ya,

Büyük bir sabırla sorularımı cevaplayan, destek olan, kıymetli hocalarım; Ar. Gör. Ali Taner KUZU başta olmak üzere Ar. Gör. Umut KARAGÜZEL, Ar. Gör. Raşid Ahmed YILDIZ'a,

Güler yüzünü, desteğini her zaman hissettiğim ve aynı laboratuvarı paylaşma şansına sahip olduğum yakın dostum Kaveh Rahimzadeh BERENJI'ya,

Motivasyonlarını samimiyetle eksik etmeyen Endüstri Mühendisi Nazmiye Gizem BACAKSIZLAR'a, Serdar ERBAY ve Gıda Müh. Su KILIÇ'a, İnş. Yük. Müh. Babak VAHEDDOOST'a,

Deney analizlerimi gerçekleştiren BAM Federal Institute for Materials Research and Testing Laboratuvarına, Dr. Werner Daum'a, Tel Erezyon yöntemiyle parçalarımı kesen Aydeniz Kalıp Sanayi'ye ve Mehmet Aydeniz'e, verilerin bir kısmını bizimle paylaşan Sn. Tolga Çakmak'a, basma numunesini hazırlamamda bana yardımcı olan İTÜ Makine Fakültesi teknisyenlerine, basma deney cihazını kullanma fırsatı bulduğum Yıldız Teknik Üniversitesi Bilim Merkezi'ne,

Maddi manevi yardımlarını esirgemeyen tüm kurum ve kuruluşlara; eğitim hayatım boyunca kahrımızı çeken, öğrencinin hep yanında olan İstanbul Teknik Üniversitesi'ne, İTÜ çalışanlarına, üç yıl Araştırma Görevliliği yaptığım İstanbul Bilgi Üniversitesi'ne, Prof.Dr. Doğan Güneş'e, Yrd. Doç. M.Fazıl Serincan'a, bir an olsun desteğini esirgemeyen ve komünitesiyle her zaman yanımda olan çalışma arkadaşlarıma; ATÖLYE İstanbul'a,

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca manevi desteğini esirgemeyen, gerek iş gerek okul hayatımda tecrübeleriyle yol gösterici olan ve sürekli öğrenme hevesi aşıl原因an kıymetli büyüğüm, hocam Prof. Dr. İ. Halil GÜZELBEY'e,

Bu süreci benimle ilk derecede paylaşan, manevi ve maddi katkılarıyla her zaman yanımda olan, hayat boyu ilham ve moral kaynağım sevgili annem Sevinç KESER, emek ve saygının önemini küçücük bir çocukken öğreten ve aşıl原因an, güleryüzün sıcaklığını her daim tattıran, her kararımda yanımda olan biricik babam Ahmet KESER'e, hayata dair her daim mantıklı ve objektif yorumlarıyla sevgisi ve

dostluğuyla ablam Esra KESER başta olmak üzere, mesafe tanımadan ilgiyle, samimiyetle yanımda olan tüm dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2015

Selçuk Keser
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|------|
| ÖNSÖZ..... | vii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| KISALTMALAR..... | xi |
| SEMBOLLER | xiii |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | xv |
| ŞEKİL LİSTESİ | xvii |
| ÖZET..... | xix |
| SUMMARY | xxi |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. TEORİK BİLGİLER..... | 3 |
| 2.1 Dökme Demirler..... | 3 |
| 2.1.1 Kır Dökme Demir | 3 |
| 2.1.2 Küresel Grafitli Dökme Demir | 4 |
| 2.1.3 Vermiküler Grafitli Dökme Demir | 4 |
| 2.1.3.1 Kırılma Tokluğu..... | 6 |
| 2.1.3.2 Isıl İletkenlik | 7 |
| 2.1.3.3 Talaş Biçimi | 9 |
| 2.1.3.4 Üretim Yöntemleri | 10 |
| 2.1.3.5 Mikro Yapısı | 11 |
| 2.1.3.6 Mekanik ve Fiziksel Özellikler | 13 |
| 2.1.3.7 İşlenebilirlik | 14 |
| 3. KONUyla İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR..... | 15 |
| 3.1 Literatür Taraması | 15 |
| 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... | 23 |
| 4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz ve Malzemeler | 23 |
| 4.2 Yarı Statik Çekme Deneyi..... | 23 |
| 4.3 Split Hopkinson Pressure Bar Deneyi | 25 |
| 4.3.1 Test 182 (P1) Kodlu Deney Numunesi | 26 |
| 4.3.2 Test 184 (P2) Kodlu Deney Numunesi | 27 |
| 4.3.3 Test 187 (P3) Kodlu Deney Numunesi | 28 |
| 4.3.4 Test 190 (P4) Kodlu Deney Numunesi | 29 |
| 4.4 Johnson-Cook Parametrelerinin VGDD Malzeme İçin Bulunması | 30 |
| 4.4.1 SHPB deneyi neticesinde alınan değerler | 32 |
| 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER..... | 33 |
| 5.1 Yarı Statik Deney Sonuçlarını Kullanarak A, B ve n parametrelerinin bulunması | 33 |
| 5.2 Yüksek Hızda Birim Şekil Değiştirme Değerini de Hesaba Katarak C Parametresinin Bulunması..... | 34 |
| 5.3 Farklı Sıcaklık Değerleriyle m parametresinin bulunması..... | 35 |
| 5.4 Basma Deneyi ile Parametrelerin Yeniden Hesaplanması..... | 37 |
| 6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER | 39 |

| | |
|------------------------|----|
| KAYNAKLAR | 41 |
| ÖZGEÇMİŞ | 49 |

KISALTMALAR

| | |
|--------------|--|
| AFS | : American Foundrymen's Society |
| BCIRA | : British Cast Iron Research Association |
| CGI | : Compacted Graphite Cast Iron |
| EDM | : Electro Discharge Machining |
| GCI | : Gray Cast Iron |
| GJV | : Gusseisen mit Vermiculargraphit |
| KDD | : Kır Dökme Demir |
| KGDD | : Küresel Grafitli Dökme Demir |
| LM | : Light Microscopy |
| NDI | : Nodular Ductile Iron |
| SEM | : Scanning Electron Microscopy |
| SHPB | : Split Hopkinson Pressure Bar Test |
| VGDD | : Vermiküler Grafitli Dökme Demir |

SEMBOLLER

| | |
|----------------------|---|
| $\dot{\epsilon}$ | : Şekil değiştirme hızı |
| $\dot{\epsilon}_0$ | : Referans şekil değiştirme hızı (s^{-1}) |
| ϵ_p | : Plastik şekil değiştirme |
| σ | : Gerilme (N/m^2) |
| A | : Akma gerilmesi (N/m^2) |
| B | : Sertleşme modülü |
| C | : Şekil değiştirme hızı katsayısı |
| m | : Isıl yumuşama |
| n | : Sertleşme üsteli |
| K | : Dayanım Katsayısı |
| °K | : Derece Kelvin |
| T | : Sıcaklık (°K) |
| T_R | : Referans Sıcaklık (°K) |
| T_M | : Erime Sıcaklığı (°K) |

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Çizelge 2.1 : Farklı sıcaklık değerlerinde dökme demirlerin ısı iletkenliği..... | 8 |
| Çizelge 2.2 : Vermiküler grafitli dökme demirin sınıflandırılması..... | 12 |
| Çizelge 2.3 : Küreselliğe bağlı olarak GJV 450 (VGDD) için tipik özellikler..... | 12 |
| Çizelge 2.4 : Farklı tip dökme demirlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması... | 13 |
| Çizelge 2.5 : VGDD derecelerinin karşılaştırılması (ASTM 0842)..... | 13 |
| Çizelge 3.1 : VGDD standartları..... | 16 |
| Çizelge 4.1 : Farklı deney koşullarında numuneye uygulanan deformasyon hızı..... | 23 |
| Çizelge 4.2 : SHPB deneyine ait numune boyutları..... | 32 |
| Çizelge 4.3 : 4 farklı VGDD numunesi için adyabatik Johnson-Cook parametreleri.. | 32 |
| Çizelge 5.1 : C değerinin bulunması için farklı birim şekil değişimi hızlarında, VGDD'ye ait değerler..... | 35 |
| Çizelge 5.2 : Farklı sıcaklık değerlerinde VGDD'nin özellikleri..... | 35 |
| Çizelge 5.3 : VGDD için Johnson-Cook parametreleri..... | 36 |
| Çizelge 5.4 : VGDD için basma deneyi kullanarak elde edilen JC parametreleri..... | 38 |
| Çizelge 6.1 : VGDD için JC parametrelerinin karşılaştırılması..... | 39 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1 : Bazı dökme demirlerin ferritik değerlere göre, dinamik kırılma tokluğunun (K_{JD}) grafitin şeklinin etkisi..... | 7 |
| Şekil 2.2 : Bazı dökme demirlerin perlitik değerlere göre, kırılma tokluğunun (K_{JD}) grafitin şeklinin etkisi..... | 7 |
| Şekil 2.3 : Çeşitli dökme demirlere ait ısıl iletkenlikler; kır dökme demir, vermiküler grafitli dökme demir ve küresel grafitli dökme demir..... | 8 |
| Şekil 2.4 : Üç farklı oda sıcaklığındaki dökme demirin Elastiklik Modülü ile Isıl İletkenlik arasındaki ilişkisi..... | 9 |
| Şekil 2.5 : EN-GJL-250 (a), EN-GJS-600 (b) and EN-GJV-400 (CGI) dökme demirlerine ait LM ve SEM mikrografikleri..... | 11 |
| Şekil 3.1 : Titanyum miktarının VGDD'nin işlenebilirliğine etkisi..... | 17 |
| Şekil 4.1 : Farklı sıcaklıklarda VGDD malzemesinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği..... | 24 |
| Şekil 4.2 : Farklı sıcaklıklarda VGDD malzemesinin gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme grafiği..... | 25 |
| Şekil 4.3 : Split Hopkinson Pressure Bar deney düzeneği, BAM Federal Enstitüsü... | 25 |
| Şekil 4.4 : SPHB deney düzeneğine numune yerleştirilmesi..... | 25 |
| Şekil 4.5 : Soldaki: Deformasyona uğramamış numune (5x6mm), sağdaki: deforme olmuş numune..... | 26 |
| Şekil 4.6 : Soldaki: Deformasyona uğramamış numune (5x6mm), sağdaki: deforme olmuş numune, üst bakış..... | 26 |
| Şekil 4.7 : 2200 s ⁻¹ hızında gerilme – birim şekil değiştirme grafiği..... | 26 |
| Şekil 4.8 : Soldan sağa: deformasyona uğramamış numune (5x6 mm), deforme numune, bakır vuruş şekillendirici (pulseshaper) 5x0,2 mm)..... | 27 |
| Şekil 4.9 : Soldan sağa: deformasyona uğramamış numune (5x6 mm), deforme numune, bakır vuruş şekillendirici (pulseshaper) 5x0,2 mm)..... | 27 |
| Şekil 4.10 : 2000 s ⁻¹ hızında gerilme – birim şekil değiştirme grafiği..... | 27 |
| Şekil 4.11 : Soldaki: deformasyona uğramamış numune (7x9 mm), sağdaki deforme numune..... | 28 |
| Şekil 4.12 : Soldaki: deformasyona uğramamış numune (7x9 mm), sağdaki deforme numune (üst bakış)..... | 28 |
| Şekil 4.13 : 1550 s ⁻¹ hızında gerilme – birim şekil değiştirme grafiği..... | 28 |
| Şekil 4.14 : Soldaki: deformasyona uğramamış numune (7x9 mm), sağdaki deforme numune..... | 29 |
| Şekil 4.15 : Soldaki: deforme numune, sağdaki: Bakır vuruş şekillendirici 5x0,2 mm | 29 |
| Şekil 4.16 : 1530 s ⁻¹ hızında gerilme – birim şekil değiştirme grafiği..... | 29 |
| Şekil 4.17 : Vermiküler grafitli dökme demirin JC Parametrelerinin hesaplanması için yapılan işlemlerin akış şeması..... | 30 |
| Şekil 5.1 : Farklı Sıcaklıklarda VGDD malzemesine ait gerilme – birim şekil değiştirme grafiği..... | 33 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.2 : VGDD'ye ait logaritmik gerilme – birim şekil değişimi grafiği..... | 34 |
| Şekil 5.3 : C değerinin bulunması..... | 35 |
| Şekil 5.4 : JC Parametrelerinden m'nin bulunması..... | 36 |
| Şekil 5.5 : $1s^{-1}$ hızında VGDD basma deneyi Gerçek gerilme – Gerçek birim şekil değişimi grafiği..... | 37 |
| Şekil 5.6 : $\ln(\sigma - A) - \ln \epsilon$ Grafiği..... | 38 |
| Şekil 5.7 : $[(\sigma_{dinamik}/\sigma_{statik})-1] - \ln \epsilon$ grafiği..... | 38 |
| Şekil 6.1 : Metaller için tipik n değerleri; 0,10-0,50..... | 40 |

CGI MALZEMEYE AİT MALZEME MODELİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK YOLLA GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Otomotiv endüstrisi başta olmak üzere birçok alanda önemi artan vermiküler grafitli dökme demir, İngilizce bilinen adıyla Compact Graphite Cast Iron (CGI), daha iyi mekanik özelliklere ve yüksek ısı iletimine sahip olması sayesinde geliştirilmesi her geçen gün daha da önem taşıyan motor bloklarında daha ince cidarlı yapıların önünü açmakta ve araçları daha hafif, daha yüksek performanslı kılmaktadır. Özellikleri bakımından dökülebilirliği, işlenebilirliği, sönüm becerisi ve ısıl iletkenliği yüksek olan yapraksı grafit yapıları kır dökme demir (KDD) ile daha iyi mekanik özelliklere sahip olan ve küresel grafit yapısına sahip olan küresel grafitli dökme demirin seçilmesi konusunda karar verilemeyen durumlarda bu iki malzemenin de özelliklerini barındıran bir ara forma ihtiyaç duyulmuştur. Aslında keşfedilmesi KDD ile aynı zamana, yani 1940'lara dayanan ama son yıllarda büyük ilgi gören VGDD bu arzı karşılayacak kapasitede olduğunu göstermiş fakat işlenebilirliğinde bazı sorunlar barındırmasıyla; üzerinde biraz daha çalışma gerektirmiştir. Dizel motorlarında daha fazla performans, daha az emisyon ve daha verimli yanmanın sağlanması için motor bloklarında oluşan yanma basıncının artırılması gerekliliğinden ötürü VGDD malzemenin işlenebilirlik problemi akademik makalelere konu oluşturmuş ve bu alanda çalışmalara, iyileştirmelere ihtiyaç duyulmuştur. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte malzemelerin modelleme süreçleri de iyileşmiştir. Deneysel olarak malzemelerin yüksek sıcaklık koşullarında ve yüksek deformasyon hızlarında davranışlarını incelemek hem daha çok zaman hem de daha çok maddi harcamalara neden olmaktadır. Bu çalışma sayesinde bilgisayar simülasyonlarında kullanılmak üzere vermiküler grafitli dökme demire ait Johnson-Cook parametreleri elde edilip literatüre katılmıştır.

Bu yüksek lisans tezinde CGI malzemenin Johnson-Cook malzeme modeline ait olan parametreleri hesaplanarak malzeme modelinin deneysel ve analitik yolla geliştirilmesi sağlanmıştır. 20, 300, 400, 500 ve 700 °C derece sıcaklık koşullarında yapılan yarı statik (quasi static test) çekme deneylerinden alınan veriler ile yüksek birim şekil değiştirme hızındaki değerleri alabilmek için uygulanan Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) testi numuneleri de hazırlandıktan sonra 1530, 1550, 2000 ve 2200 s⁻¹ hızlarında testler yapıp, bu sonuçlar kullanılarak bulunan A, B, C, n ve m parametreleri elde edilmiş olup sonlu elemanlar yöntemi ile ortogonal kesme simülasyonlarında kullanılmaya hazır hale getirilmiş, plastik şekil değiştirmenin, birim şekil değiştirme hızının ve sıcaklık değişiminin gerilme üzerindeki etkilerinin bir formülde görülmesi sağlanmıştır. 20 °C sıcaklık ve yarı statik koşullarında yapılan çekme deneyi sayesinde akma dayanımı anlamına da gelen A parametresi bulunduktan sonra, aynı değerlerden yola çıkılarak B ve n parametreleri de bulunmuştur. Daha sonrasında yüksek deformasyon hızlarında yapılan SHPB testi ile C parametresi de

elde edilmiş ve farklı sıcaklıklarda yapılan statik deneyler sayesinde de en son m parametresi elde edilmiştir. Ortaya çıkan neticeyi daha da iyileştirmek adına $1s^{-1}$ deformasyon hızında basma deneyi yapılarak bulunmuş olan parametreler iyileştirilmiş ve mekanik özellikleri bakımından aralarında bulunan Kır Dökme Demire ve Küresel Grafitli Dökme Demire ait Johnson-Cook parametreleri ile karşılaştırılmıştır.

IMPROVING THE MATERIAL MODEL OF CGI IN EXPERIMENTAL AND ANALYTIC WAYS

SUMMARY

After understanding the presence of dislocations, humankind has started to use metals as an industrial material. Cast irons are preferred due to its competitive low prices compared to other materials in most industries, ease of accessibility and their wide range of achievable mechanical and physical properties as well. Cast Irons, generally, consist of an iron matrix (such as pearlite, ferrite, etc.), graphite and some other additives. Some graphite morphology types are flaky, compact or nodular, mostly effected on the mechanical and physical properties. Some of cast irons which are frequently used in industries; grey cast iron (GCI) which has flaky graphite phases, nodular cast iron (NCI) which has nodular graphite phases and compact graphite iron (CGI) which has both flaky and nodular graphite phases, it's called compacted graphite phases. Compacted Graphite Iron, which is also known as CGI or Vermicular Graphite Iron, is a form of cast iron in which the shape of the graphite particles is between that grey iron where the graphite is in flake and ductile iron where the graphite is in spheres. The worm-like compacted-graphite shape provides physical properties between grey and ductile irons. In order to flaky graphite morphology, Grey Cast Iron has a good damping capacity and preferred by castability, machinability, and heat conductivity features. In order to nodular graphite morphology, Nodular Cast Iron has a better mechanical properties. In most applications of automotive industry, thermal conductivity is the main reason for the material selection especially for internal combustion engine components and brake systems. Due to combining good mechanical and physical properties with thermal conductivity, Cast Irons have been used for cylinder heads, brakes, pistons, and disks.

Although the CGI was explored in 1940s, which was nearly same with the Grey Cast Iron's exploration; it has taken great attention in recent years with meeting the supply. However, because of some problems in its machinability, it requires to have more research. The increasing burn pressure of diesel engines is required to achieve better performance, less emission and more productive burn. Due to these requirements, machinability problems of the CGI has studied by the academia. CGI is the proper material providing for the needs of automotive industries.

In recent years, there has been a great deal of effort for studying behaviour of materials at high strain rate and high temperature conditions. In the literature, there are some type of finite element methods. Many different constitutive models exist to describing material's behaviour in plastic region. Most common constitutive material models are Zerilli-Armstrong, Bodner-Partom and Johnson-Cook (JC). JC is the simplest material model in order to determine the parameter easier than the others and consider the equivalent stress as a function of plastic strain, strain rate and temperature. Johnson-Cook material model is used to describe material's behaviour in the plastic region over large strains, at high strain rates and at high temperatures. The flow stress has three main parts; first bracket is elasto-plastic term, second bracket is viscosity term, and third part is thermal softening term. Johnson and Cook presented the flow stress in a formula; $\sigma = (A + B\varepsilon^n)[1 + C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)][1 - ((T - T_{Room})/(T_{melt} - T_{Room}))^m]$ where σ is the flow stress of material, ε is the plastic strain, $\dot{\varepsilon}$ is the strain rate, $\dot{\varepsilon}_0$ is the reference strain rate, T is the temperature of the material, T_{melt} is the melting point of the material and T_{Room} is the room temperature. The empirical constants are as follows: A is the yield stress, B is the pre-exponential factor, C is the strain rate factor, n is the work-hardening exponent and m is the thermal-softening exponent.

Commercial finite element softwares support some constitutive material models, and one of them is Johnson-Cook. In a real life application, material modelling is too expensive and takes so much time. Various researchers have conducted some tests to find Johnson-Cook parameters; A, B, n, C, and m. By using these parameters many ortogonal cutting tests can be conducted and no necessary to prepare samples, no necessary to use machines and no necessary a heater units, no sensors, no measuring devices.

In this thesis, at first, it is decided to use compacted graphite cast iron as a materials in order to best appropriate material for automobile industries especially engine blocks. There are many sources and information about gray cast irons and nodular cast irons. In order to compacted graphite cast iron's mechanical and physical properties between gray cast iron and nodular cast iron, it is easier to compare the data after finding parameters. There are available the johnson-cook parameters of gray cast iron and nodular cast iron in the literature. For determining the johnson-cook parameters, it is done a quasi-static tensile test at 20 °C. In the true stress-true strain graph, the yield point gives the A parameter. In order to determine the A parameter, test's graph should supply the yield point. However, it is necessary the data between yield point and ultimate tensile strength determining B and n parameters. After subtracting the yield point value from stress datas, draws a log-log graphs and that graphs give the B and n parameters. In order to determine C parameter, it is necessary to conduct high strain rate tests, so Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Tests conducted at 1530, 1550, 2000 and 2200 s⁻¹ strain rates. To determine the C parameter, first and third brackets are not necessary, so they were eliminated by dividing quasi-static flow stress and high strain rate stress. In order to determine m parameters, in addition to 20 °C quasi-static test, it is conducted at 300, 400, 500, and 700 °C quasi-static tests. In addition, for determining m parameter, first and second brackets of Johnson-Cook flow stress formula are not necessary. Being eliminated them by dividing reference temperature flow stress and high temperature flow stress formula. The m parameter determined with the slope of drawn the graph.

Due to pearlitic structure, CGI is a brittle material, so determining a better solution, it has conducted compression tests at 1 s^{-1} strain-rates and $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ conditions. Thus a wider plastic region data obtained. In order to redetermine of Johnson-Cook parameters, being used the quasi-static compression test datas and were taken average then finalized CGI's JC parameters.

1. GİRİŞ

Endüstrinin gelişmesi ile birlikte sanayide kullanılan malzemeler sürekli değişim göstermiştir. Özellikle otomotiv endüstrisi düşünüldüğünde içten yanmalı motorların kullanıldığı malzemeler de bu değişimden nasibini almıştır. Ucuz ve ulaşılabilir olmasının yanı sıra yüksek sıcaklık ve basınca da dayanıklı olduğundan dolayı dökme demirler bu alanda başı çekmektedirler. Tabi ki otomotiv endüstrisinin de gelişmesi ve taşıt performanslarının artması için daha hafif motor, daha yüksek sıcaklığa ve basınca dayanıklı motor blokları ihtiyacını doğurmuş ve bu alanda yapılan araştırmalar sıklıkla kullanılan dökme demirlerin alternatiflerini ortaya çıkarmıştır. İhtiyaç duyulan özellikleri karşılayan en optimize malzeme seçimi için malzemeleri birbirinden ayıran özellikleri bilmek gerekir. Bütün demir alaşımları temel dayanım ve sertlik özelliklerini içerdikleri grafitin metalik yapısına göre almaktadırlar [01]. Mesela kır dökme demir yapraksı yapısıyla fevkalade sönümlenme kapasitesine sahip olup dökülebilirliği, işlenebilirliği ve ısıl iletkenliğinin yüksek olmasıyla tercih edilmektedir. Küresel grafitli dökme demir ise küresel grafit yapısı sayesinde daha iyi mekanik özelliklere sahip olup kırılmaya karşı daha dirençlidir. Bu özelliklerin hiçbirinden vazgeçemeyen otomobil endüstrisi kır dökme demirin keşfedildiği yıllarda patenti alınan ama son yıllarda ilgi duyulan solucan şekilli grafit yapısına sahip vermiküler grafitli dökme demiri kullanmaya başlamıştır. Hem yapraksı hem de küresel grafit yapısını içerisinde bulundurduğundan dolayı daha yüksek dayanıma sahip olan VGDD titanyum içeriğinden dolayı da işlenebilirliği zor bir malzemedir. Kır dökme demire kıyasla artırılmış dayanımıyla VGDD daha yüksek silindir basıncına izin verir ve böylece daha iyi yakıt ekonomisini ve yüksek güç çıkışını mümkün kılar [02]. VGDD malzeme özellikleri açısından kır dökme demir ile küresel grafitli dökme demir arasında bulunduğundan dolayı iki malzemenin de özelliklerini barındırır. Sahip olduğu mükemmel dayanım, süneklilik, aşınma direnci gibi mekanik özellikleri sayesinde sanayide motor bloklarının, motor kapaklarının yapımında, krank shaftı, fren disk, egzoz manifoldları ve debriyaj parçalarında tercih edilmektedirler.

VGDD malzemesinin yapısındaki grafit partiküllerinin daha kalın ve kısa olmasından dolayı matris ile bu partiküllerin arasında büyük oranda yapışma meydana gelir bununla beraber grafitlerin oval uçlu geometrisi sayesinde çentik etkisi azalır ve bu da yüksek çekme mukavemeti sağlar. VGDD sağladığı avantajlarının yanında malzemenin mikroyapısına bağlı bir işlenebilirlik problemini de barındırmaktadır. Yüksek hızda ve sıcaklıkta işlenen VGDD malzemesinin Sonlu Elemanlar Modellemesini çıkartmak için en uygun model Johnson-Cook malzeme modelidir. JC malzeme modeli akma gerilmesini birim şekil değiştirme, birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklık cinsinden veren A, B, C, n ve m parametrelerini içeren bir denklemdir. Denklemdaki parametreleri elde edebilmek için yarı statik ve yüksek birim şekil değiştirme hızlarında testler yapılması gerekir. A parametresi yarı statik test ile elde edilen akma noktasıdır, pekleşme modülü anlamına gelen B ve pekleşme üsteli anlamına gelen n parametreleri de yine bu testlerin sonuçları ile elde edilmektedir. Son olarak şekil değiştirme hızı katsayısı olan C parametresini bulabilmek için Split Hopkinson Pressure Bar yöntemini kullanarak yüksek birim şekil değiştirme hızlarında deneyler gerçekleştirilmektedir. Farklı sıcaklıklarda yapılan yarı statik deneyler sayesinde termal yumuşama katsayısı olan m üsteli de belirlenebilmektedir.

Johnson-Cook parametreleri sonlu elemanlar analizi yapılabilen bazı programlarda kullanılabilir, örneğin Deform programının 2D Machining isimli alt programında modelleme esnasında girilerek kullanılabilir ve talaş açısının 0 olduğu ortogonal kesme durumu için talaşlı imalat modellemesi yapılabilir. Bu çalışma VGDD malzemenin Yarı statik ve yüksek birim şekil değiştirme hızındaki verilerin kullanılması ile Johnson-Cook parametrelerini literatüre kazandıracaktır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1 Dökme Demirler

Dökme demirler, %2'den fazla karbon içeriği barındıran demir-karbon alaşımlarıdır. Yapısındaki ana alaşım elementleri Carbon (C) ve Silisyum (Si) elementleridir ve yüzdeleri 2,1 - 4 ile 1 - 3 aralığında değişmektedir. Daha düşük karbon içeriği olan demir alaşımları çelik olarak adlandırılırlar. Düşük erime noktası, iyi akışkanlık, dökülebilirlik, harikulade işlenebilirlik, deformasyona karşı dayanım ve aşınma dayanımı dökme demirleri bir mühendislik malzemesi haline getirmiş ve geniş ölçüde uygulama alanına kavuşturmuştur. Borular, makineler, silindir kafalar, silindir bloklar ve vites kutuları gibi otomotiv sanayisindeki parçalar için dökme demir vazgeçilmez bir malzemedir [03]. Dökme demirlerin mekanik özellikleri sahip oldukları mikroyapının tipine bağlı olduğu kadar bu mikroyapıları oluşturan fazların da şekline ve dağılımına bağlıdır. Mikroyapı üzerinde önemli bir etkisi olan fazlardan biri serbest karbon, yani; grafitlerdir. Grafitlerin şekli ve miktarı dökme demirlerin mukavemeti ile sünekliğini etkilemektedir. Yani dökme demirler parlatılmış yüzlerindeki grafit karakteristiğine göre sınıflandırılabilirler. Dökme demirlerin özelliklerini geliştirmek amacıyla tavlama, temperleme, östenitleme ve menevişleme ısı işlemleri uygulanarak anayapı içerisinde istenilen mikroyapılar oluşturulabilir [04]. Matrislerinde mevcut olan grafit morfolojilerine göre dökme demir sınıflandırma yapıldığında ilk 3 genel dökme tipi; kır dökme demir ya da yapraksı grafitli dökme demir (GDD), sünek dökme demir ya da küresel grafitli dökme demir (KGDD) ve vermiküler grafitli dökme demir (VGDD) olur.

2.1.1 Kır Dökme Demir

Serbest karbonların grafit yaprakları şeklinde oluşturduğu demir-karbon-silisyum alaşımlarına kır dökme demir denir [04]. Kır dökme demir, kalıba dökülen ergimiş demirin yavaş bir şekilde soğumasıyla elde edilir. Döküm soğurken malzeme içerisindeki karbon grafit yaprakları şeklinde çökler [05]. Metal matrisinde gömülü olan grafit fazının kırılma yüzeyinde aldığı gri renkten dolayı malzeme kır dökme

demir olarak adlandırılır [06]. Yapraksı grafit kır dökme demire (işlenebilirlik gibi) benzersiz özellikler katar ve üstün aşınma direnci, kırılma direnci ve iyi derecede titreşim sönümlemesine de sahiptir [07].

Kır dökme demirin otomotiv endüstrisinde tercih edildiği yerler; motor bloğu, fren diski, kampana, yağ pompalama çubuğu, su pompası pervanesi, denge parçası, krank kepi, manifold, vantilatör kasnağı, fren diski, su pompası gövdesi ve volan [08].

2.1.2 Küresel Grafitli Dökme Demir

Grafitin küreselleştirilmesi magnezyum veya seryumun ergiyik metale katılması ile yapılabilmektedir. Grafitin küresel olması için malzeme içerisinde en az %0.035 Mg bulunması gerekmektedir [04]. Kır dökme demirlerdeki silisyum, küresel dökme demir üretebilmek için olabilecek en düşük seviyelerde olmalıdır, çünkü Si yapraklarını büyütür.

Küresel grafitli dökme demir her ne kadar kimyasal kompozisyonu kır dökme demirin aynısı olsa da mukavemet ve süneklik özellikleri çelikle benzerdir fakat üretim şekli farklıdır. Kır dökme demirler yapraksı grafit yapısı ile çatlak oluşturma özelliğine sahiptir, bu da kır dökme demirin mukavemetini, tokluğunu ve sünekliğini düşüren ana etkidir. Yapraksı değil de küresel yapıda olduğu zaman ise yüksek mukavemet ve süneklik sağlar. Böylece dökme çeliklerin mukavemet ve süneklik özellikleri, dökme demirlerin düşük maliyet, aşınma direnci ve uygulanan kuvveti emme özellikleri birleşmiş olur [04].

Küresel grafitli dökme demir bazen nodüler demir olarak da adlandırılır. Küresel grafitli dökme demirin otomotiv endüstrisinde tercih edildiği yerler; motor taşıyıcı, şanzıman taşıyıcı, diferansiyel gövdesi ve çanı, porya, kam mili, yardımcı şaft kayıcısı, distribütör dişlisi, kompresör taşıyıcı, egzoz manifoldu, ön aks taşıyıcısı, tekerle poryası, diferansiyel taşıyıcı [08].

2.1.3 Vermiküler Grafitli Dökme Demir

Kompak Grafitli dökme demir olarak da adlandırılan vermiküler grafitli dökme demirin (VGDD) grafit yapısı solucan şeklinde olup, kısa ve yuvarlak kenarlıdır. Vermiküler grafitli dökme demir, küresel grafitli dökme demir imal edilirken tonaj

farkından, yani; magnezyum ve seryum eksikliğinden dolayı kazara meydana gelmiş ve düşük değerli demir olarak tanımlanmıştır [09].

Kasıtlı olarak ilk Estes ve Scheidewind tarafından 1955 yılında bulunmuştur. Her ne kadar Britanya'daki (BCIRA, British Cast Iron Research Association) dökme demir araştırma kuruluşundan Morrogh ve Williams ile ilişkilendirilse [10] de ilk patenti 1948 yılında Milis ve diğ. küresel grafitli dökme demir ve vermiküler grafitli dökme demir ile almıştır [11]. Ergimiş yetersiz küresel dökme demir içerisine düşük yüzdede Magnezyum (veya Kalsiyum) eklenmesiyle döküm katılaştığında grafit oluşması sağlanmıştır. Sonralarda Morrogh ve Williams'ın çalışmasında kullandığı mişmetal ile (%49 Seryum içeren bir alaşımın düşük Sülfür demire eklenmesiyle) küresel ve vermiküler grafitli dökme demir üretilmiştir.

VGDD egzoz manifoldu, hidrolik yataklar, fren diskleri gibi yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Karakteristik yapısı ve fiziksel özelliklerinden dolayı ideal kullanım alanı motor malzemeleridir. Bugün bazı kamyon motorlarının komponentleri VGDD malzemesi ile üretilmektedir;

- Scania V8 (16.4 L), silindir bloğu
- Navistar (12.4 L), silindir bloğu
- MAN (12.4 L), silindir bloğu
- Hyundai (12.3 L), silindir kafası
- Ford-Otosan (9.0 L), silindir bloğu ve silindir kafası
- DAF (12.9 L), silindir bloğu ve silindir kafası [12].

VGDD'nin dayanımı soğuma oranı ile hassastır, böylece ayrımların büyüklüğü malzemenin özellikleri konusunda önemli bir rol oynamaktadır. VGDD'nin dayanımı ayrımların büyüklüğünün artışı azaltacaktır. Soğuma kapasitesinin artışı perlitik yapıyı ve grafitin küresellik yüzdesini artıracaktır. Yapıksı grafit formu ile benzer davranışlar sergileyecek fakat yapıksı grafit demire nazaran VGDD'nin duvar kalınlığının az olması çekme dayanımını hassaslaştıracaktır [13, 14].

VGDD'nin yapraksı grafit dökme demir'e kıyasla avantajları [15];

- Eş karbonlu yapıda ve aynı matris koşullarında daha yüksek çekme dayanımı,
- Sertlik oranına göre daha yüksek dayanım,
- Daha iyi kırılma direnci sağlamak için daha yüksek süneklik ve tokluk,
- Daha yüksek dayanımlı grafit-matris arayüzü

Küresel grafitli dökme demire nazaran VGDD'nin sağladığı avantajlar;

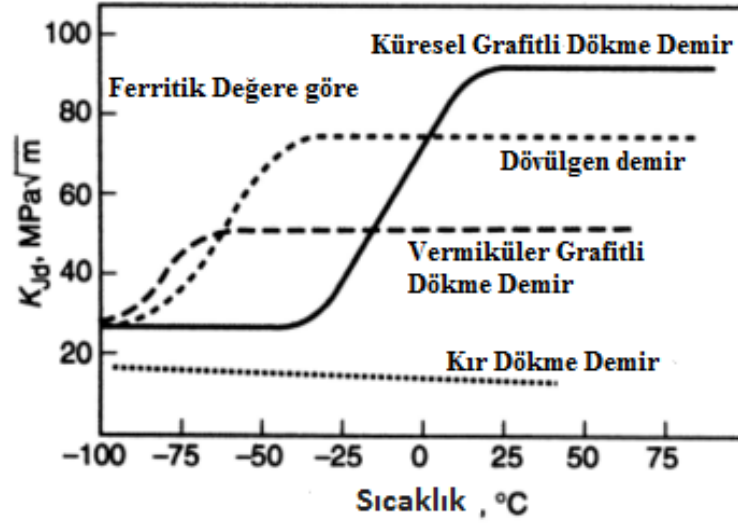
- Daha düşük ısıl genleşme katsayısı,
- Daha yüksek ısı iletimi ve ısıl şoka karşı daha fazla direnç,
- Yüksek sönümlenme kapasitesi,
- Daha iyi dökülebilirlik,
- Geliştirilmiş işlenebilirlik.

2.1.3.1 Kırılma Tokluğu

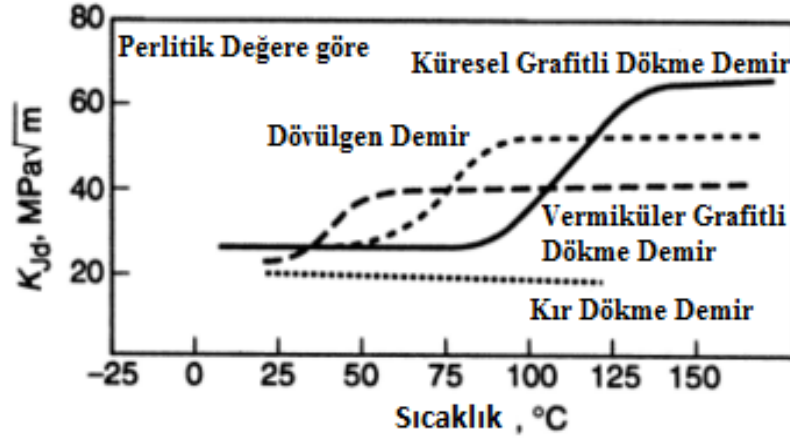
Grafit dökme demirin kırılma tokluğu grafitin tipinden, matrisinin tipinden ve grafit ile matrisin etkileşiminden belirlenir. Sayısız kombinasyon ihtimalinden dolayı çok değişken ve geniş bir aralıkta kırılma tokluğu beklenir.

Yapraksı dökme demirin kırılma tokluğu aralığı 11-19 MPa m^{1/2} dir. [16]. Yapraksı dökme demirle alakalı bir gözlem de sünek-kırılgan geçiş sıcaklığı oda sıcaklığının üzerinde olması. Böylece normal veya normal altı sıcaklıklarda kırılma tokluğunun sıcaklıktan bağımsız olduğu gözlenir.

Küresel grafitli dökme demirin çelikvari mekanik davranışından dolayı, bu demirin kırılma tokluğu çok defa çalışılmıştır. Kırılma tokluğu 450 MPa akma dayanımında 25MPa m^{1/2} ile 370 MPa akma dayanımındaki demirde 60 MPa m^{1/2} değerleri arasındadır [16]. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de demirlerin sıcaklıklara göre kırılma tokluğu değerleri verilmiştir.



Şekil 2.1 : Bazı dökme demirlerin ferritik değerlere göre, dinamik kırılma tokluğunun (K_{JD}) grafitin şeklinin etkisi [17].



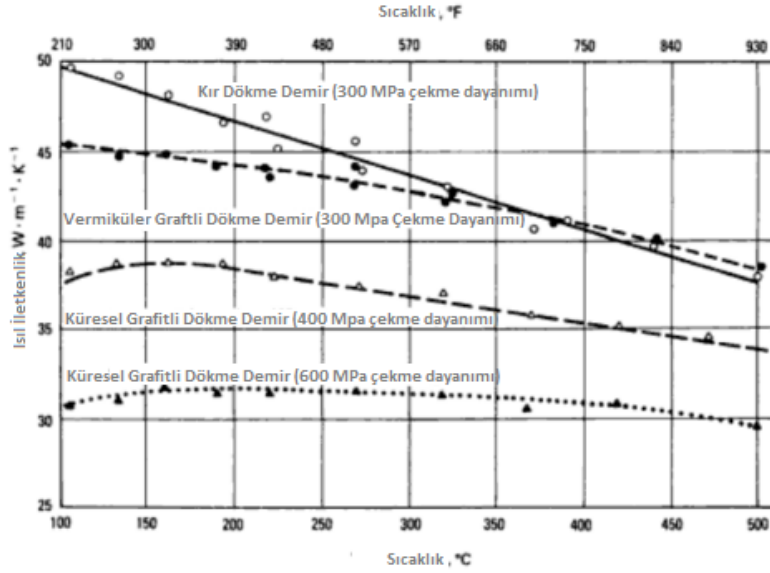
Şekil 2.2 : Bazı dökme demirlerin perlitik değerlere göre, kırılma tokluğunun (K_{JD}) grafitin şeklinin etkisi [17].

2.1.3.2 Isıl İletkenlik

Kır dökme demir her zaman küresel dökme demire nazaran daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir (Çizelge 2.1). Sıcaklık artırıldığında ve alaşım elementleri dahil edildiğinde kır dökme demir için ısı iletkenlik düşer (Şekil 2.3). Vermiküler grafitli dökme demir kendi sınıfında değerlendirildiğinde daha yüksek ferrit içeriğinden dolayı çekme dayanımını az olan CGI 350 malzemesi CGI 450'den daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir [18].

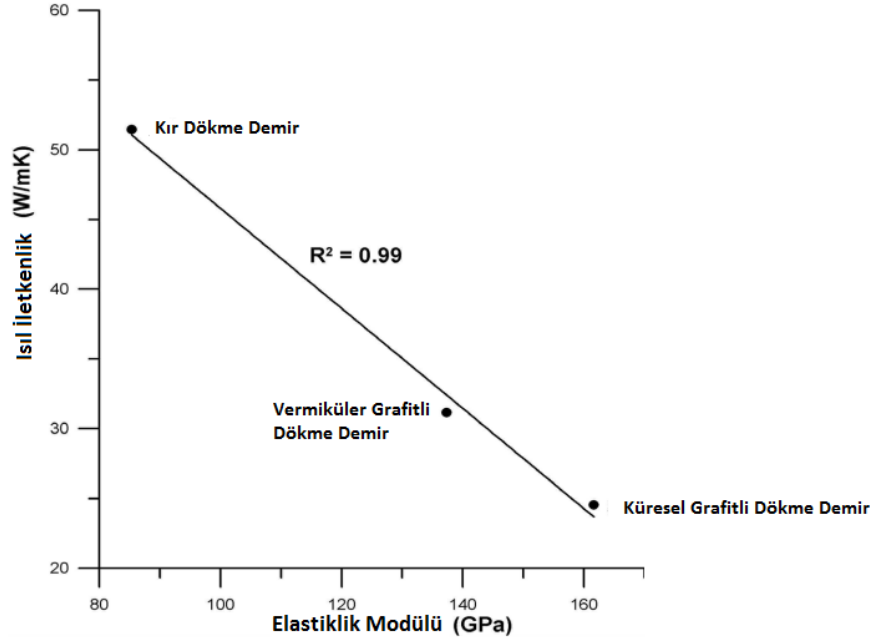
Çizelge 2.1 : Farklı sıcaklık değerlerinde dökme demirlerin ısı iletkenliği [19]

| Grafit Şekli | Eşdeğer karbon | Isıl İletkenlik, W/m-K | | | | |
|--------------|----------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 100 °C | 200 °C | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
| Yapraksı | 3,8 | 50,24 | 48,99 | 45,22 | 41,87 | 38,52 |
| | 4,8 | 53,39 | 50,66 | 47,31 | 43,12 | 38,94 |
| Vermiküler | 3,9 | 38,10 | 41,0 | 39,40 | 37,30 | 35,20 |
| | 4,1 | 43,54 | 43,12 | 40,19 | 37,68 | 35,17 |
| Küresel | 4,2 | 32,34 | 34,75 | 33,08 | 31,40 | 29,31 |



Şekil 2.3 : Çeşitli dökme demirlere ait ısı iletkenlikler; kır dökme demir, vermiküler grafitli dökme demir ve küresel grafitli dökme demir [20]

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi ısı iletkenlik ve elastiklik modülü ters orantılıdır. Dolayısıyla özellikler arasından hangisine daha çok ihtiyaç varsa ona göre optimizasyon yapılması gerekmektedir.



Şekil 2.4 : Üç farklı oda sıcaklığındaki dökme demirin Elastiklik Modülü ile Isıl İletkenliği arasındaki ilişkisi [21]

2.1.3.3 Talaş Biçimi

Dawson ve diğ. vermiküler grafitli dökme demirin işlenebilirliğinin değişkenlerini şu şekilde sınırlandırmıştır ;

- Grafit şeklinin etkileri;
- Perlit etkisi;
- Kimyasal elementlerin etkisi (Sb, Mn, Si, S, Ti, Cr);
- Dahili Etkiler [22]

Dökme demirin talaş biçiminin sebebi direkt olarak matriste bulunan düşük mekanik dayanım, süreksizlik üretme ve gerilme konsantrasyonu etkisi olarak bilinen grafitin durumudur, böylece malzeme kaldırma işlemine kolaylık sağlar.

Küresel grafitli dökme demir için kalıcı birim şekil değişimi daha geniş ve malzemeyi daha küçük yırtmaktadır [23]. Vermiküler grafitli dökme demirin talaş davranışı küresel ve kır dökme demirin davranışlarının arasında yer almaktadır [24].

2.1.3.4 Üretim Yöntemleri

Küresel grafitli dökme demirde de olduğu gibi, vermiküler grafitli dökme demir üretiminde sıvı metaldeki oksijen ve kükürt seviyelerini azaltmak amacıyla sıvı metalin magnezyum işleminden geçirilmesi gerekmektedir. Vermiküler yapı, küresel ve yapraksı yapı arasında bir geçiş formu olduğundan dolayı elde edilmesi için sıvıya eklenen magnezyum miktarının azaltılması gerekmektedir. Bu işlemin çok dikkatli bir şekilde yapıldığı durumlarda; magnezyumun gereğinden az eklenmesi ya da işlem sonrasında uzun bir süre beklenmesi ile yapıda grafit yapraklarının ortaya çıkmasına neden olunur. Bu da dökme demirin mukavemetinin %25 azalmasına neden olmaktadır. Dökümhaneler, bu sebeple, magnezyum miktarını gereğinden fazla tutup, yapraksı grafit yerine yapıda bir miktar küre bulunmasını tercih edebiliyor. Bu tercih basit geometrilerde uygulanabilir olsa da karmaşık geometrilerde yapraksı grafit oluşturmadan küre miktarını da düşük tutarak vermiküler üretmek süreç kontrolünde sağlam bir hakimiyet gerektirmektedir [25].

Şimdilerde geliştirmeler ve iyileştirmeler neticesinde üretim teknikleri ve kalite kontrol VGDD için bayağı yaygınlaşmış olsa da farklı üretim şekilleri de aşağıdaki gibi mevcuttur;

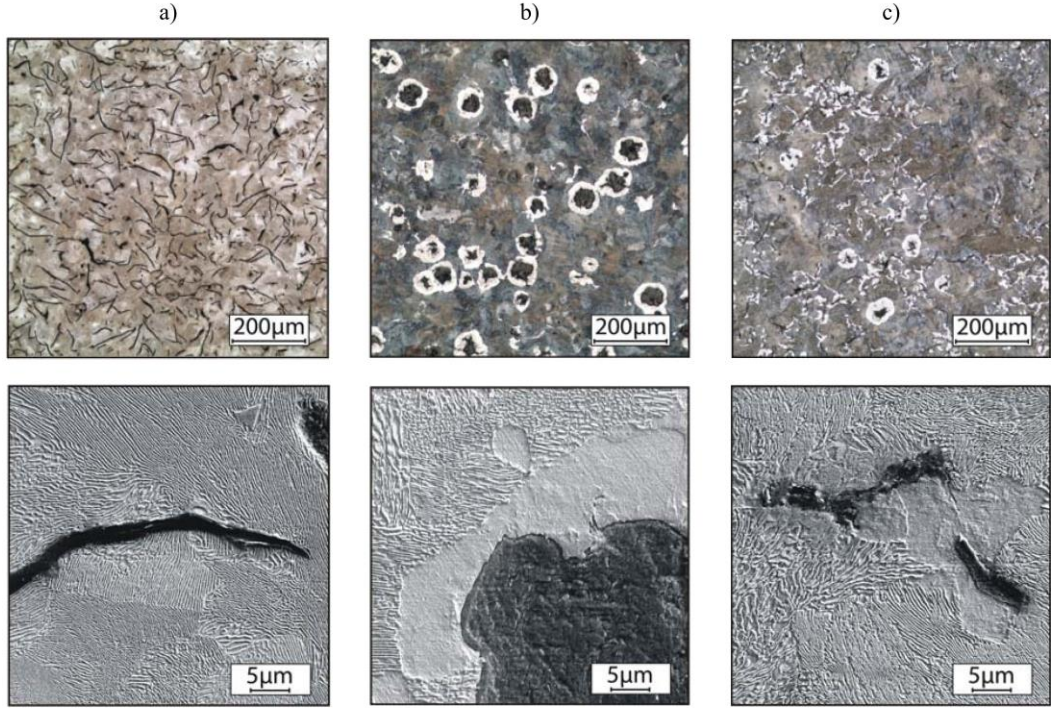
- Geniş Sülfürsüzleştirme
- Nitrojen içeriğini kontrol etme
- Kontrollü işlem
- Kombine işlem
- Zr, Pb, Sn gibi elementlerle işlem
- Gaz üfleli Mg işlemi [26].

VGDD üretiminde dengesinin çok önemli olduğu 5 parametre şöyledir;

- Sülfür içeriği
- Oksijen içeriği
- Aktif magnezyum
- Çekirdek durumu
- Soğuma oranı

2.1.3.5 Mikro Yapısı

Vermiküler dökme demirin tipik mikro yapısı Şekil 2.5'teki gibidir. Grafit şekilleri yapraksılıkla küresellik arasında bulunmaktadır. Grafit parçacıklarının kalınlığı ve yuvarlaklığı yapraksı grafitin metal matrisli yüzeyi ile karşılaştırıldığında düşük gerilme yoğunluğuna neden olur. Eğer iki şeklin arasında yer alırsa mekanik özelliklerinin de kır dökme demir ile küresel dökme demir arasında olması beklenir.



Şekil 2.5 : EN-GJL-250 (a), EN-GJS-600 (b) and EN-GJV-400 (CGI) dökme demirlerine ait LM ve SEM mikrografikleri [27]

Vermiküler grafitli dökme demirler grafitlerinin uzunluk ile kalınlık oranına göre Çizelge 2.2'deki gibi sınıflandırılırlar. Grafitin vermicülerliği ve nodularitesi (küreselliği) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir [28].

$$\% \text{vermicülerlik} = 1 - \% \text{küresellik} \quad (2.1)$$

$$\% \text{küresellik} = \frac{I \text{ ve II tipindeki grafit partiküllerinin sayısı}}{I, II, III \text{ ve IV tipindeki grafit partiküllerinin sayısı}} \quad (2.2)$$

Çizelge 2.2 : Vermiküler grafitli dökme demirin sınıflandırılması [29].

| Vermiküler Grafit Tipi | Grafitin Boyutsal Karakteristiği | | | VGDD'nin Mekanik Özellikleri | | | Notlar |
|---------------------------|--|---|------|------------------------------|------------------|----------------|-----------------------------|
| | Maksimum uzunluk (l) μm | Maksimum kalınlık (t) μm | l/t | Çekme Dayanımı MPa | Uzama yüzdesi | Sertlik BHN | |
| Tip I | 20 | 10 | 2-4 | 300-450 | 2-5 | 150-240 | ASTM-D formuna benzer |
| Tip II | 150 | 50 | 2-5 | 300-500 | 3-9 | 150-240 | ASTM-M formuna benzer |
| Tip III | 150 | 20 | 3-10 | 300-450 | 1-3.5 | 150-250 | ASTM-P formuna benzer |

Grafit partiküllerinin kısa, kalın ve yuvarlak kenarlı gibi farklılıklarının olması demir matrisi ile grafit arasındaki yapının gücünü belirler [30]. Küreselliğin mekanik özelliklere etkisi Çizelge 2.3'te ifade edilmiştir;

Çizelge 2.3 : Küreselliğe bağlı olarak GJV 450 (VGDD) için tipik özellikler [01]

| Özellik (25 ⁰ C) | % Küresellik | | | | |
|-----------------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 30 | 50 | 70 | 90 |
| Çekme Dayanımı (MPa) | 465 | 520 | 590 | 640 | 700 |
| Akma Dayanımı (MPa) | 350 | 370 | 390 | 420 | 470 |
| Elastiklik Modülü (GPa) | 145 | 150 | 155 | 155 | 160 |
| Uzama (%) | 1-2 | 1-3 | 2-4 | 2-5 | 3-6 |
| Isıl İletkenlik (W/m-K) | 36 | 33 | 31 | 28 | 25 |

2.1.3.6 Mekanik ve Fiziksel Özellikler

VGDD'nin ısı ve titreşim giderme karakteristiği sfero (küresel) dökme demir ile kır dökme demir arasındadır (Çizelge 2.4). Metal yorgunluğuna karşı direnci kır dökme demirin iki mislidir [31]. Dökme demir ile kıyaslandığında çekme gerilimi, yorulma gerilimi, elastiklik modülü daha gelişmiş olması gibi avantajlarından dolayı tercih sebebidir. VGDD'nin yüksek mukavemet ve malzeme özellikleri, motor bloklarının daha dayanıklı, daha hafif, daha iyi ölçüsel toleranslı, gürültü, titreşim, sertlik özellikleri ile üretilmesi anlamını taşımaktadır. Ayrıca VGDD, kır dökme demire nazaran daha az paslanma ve aşınma özelliklerine sahiptir [32].

Çizelge 2.4 : Farklı tip dökme demirlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [33].

| Özellik | Kır DD | Vermiküler DD | Küresel DD |
|-----------------------|--------|---------------|------------|
| Çekme Dayanımı | %55 | %100 | %155 |
| Akma Dayanımı | - | %100 | %155 |
| Elastiklik Modülü | %75 | %100 | %110 |
| Yorulma Dayanımı | %55 | %100 | %125 |
| Sertlik | %85 | %100 | %115 |
| Sönümlenme Kapasitesi | %285 | %100 | %65 |
| Isıl İletkenlik | %130 | %100 | %75 |

Vermiküler grafitli dökme demir bazı yerlerde GJV ismiyle de anılmaktadır [34]. VGDD (CGI, GJV) malzemesinin 250, 300, 350, 400 ve 450 dereceleri Çizelge 2.5'te görüldüğü gibi çekme dayanımları ile ilgilidir. En düşük dayanıma sahip olan ferritik ve en yüksek dayanıma sahip olan ise perlitiktir.

Çizelge 2.5 : VGDD derecelerinin karşılaştırılması (ASTM 0842) [07]

| Derece | Min. Çekme Dayanımı | Min. %0,2 Akma Dayanımı | %Uzama (50mm'deki) | Brinell Sertliği |
|---------|---------------------|-------------------------|--------------------|------------------|
| GJV 250 | 250 MPa | 175 MPa | 3,0 | 179 Maks. |
| GJV 300 | 300 MPa | 210 MPa | 1,5 | 143-207 |
| GJV 350 | 350 MPa | 245 MPa | 1,0 | 163-229 |
| GJV 400 | 400 MPa | 280 MPa | 1,0 | 197-255 |
| GJV 450 | 450 MPa | 315 MPa | 1,0 | 207-269 |

2.1.3.7 İşlenebilirlik

Talaş kaldırma işlemi elastik ve plastik şekil değiştirme prensibine dayanan, iş parçası ile takım arasındaki sürtünme, ısının ortaya çıkışı, talaşın kırılması, işlenen parçanın yüzeyinin sertleşmesi, kesici takımın aşınması gibi mekanik durumların meydana geldiği karmaşık, fiziksel bir olaydır [35]. Talaşlı imalatta işlenebilirliğin iyileştirilmesi ve kesici takımların kesme performanslarının artırılması pek çok araştırmanın konusu olmuş, geleneksel malzemelere nazaran daha üstün özelliklere sahip, yüksek performanslı malzemelerin ve alaşımların geliştirilmesi, araştırmacıları bu yeni malzemelerin işlenebilirlik problemlerine yöneltmişlerdir [36]. İşlenebilirlik malzemelerin bir iç özelliği değil aksine iş parçasının mekanik özellikleri, soğutma sıvısı ve işleme koşulları arasındaki bir ilişkinin neticesidir. Dökme demirlerin işlenebilirliği ise dökülen malzemenin döküm şekline ve dökülen malzemenin mikroyapısına bağlıdır.

VGDD malzemesinin işlenebilirliği üzerine pek çalışma olmaması ve sadece son yıllarda rağbet görmesi diğer demirlere kıyasla daha kötü işlenebilirliğe sahip olması ve bu konuda bir uğraşa layık görülmemesinden kaynaklıdır. Fakat son yıllarda, VGDD malzemesinin üzerine yapılan döküm iyileştirme çalışmaları ile bu ilgisizlik azalmış ve dikkatleri VGDD'nin üstüne çekmeyi başarmıştır. İlave edilen alaşım elementleri ve uygulanan ısıl işlemler sayesinde diğer türleri de (CGI 350, CGI 450, CGI 550...vb) bu iyileştirmeden nasibini almıştır [37]

3. KONUYLA İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

3.1 Literatür Taraması

Pul grafit yapıya sahip olan dökme demir ailesinin en eski ferdi kır dökme demirdir. Çekme dayanımı her ne kadar vasat olsa da yüksek basma dayanımı ve sönümleme kapasitesi vardır. Vermiküler grafitli dökme demir üretmek adına yapılan ilk girişim 1947 yılında Morrogh ve Williams tarafından yapılmıştır [38]. Bu tarihten itibaren küresel grafitli dökme demir, yüksek dayanımı ve uzama kabiliyeti ile çoğu çelik bileşiklerinin yerini almıştır [26]. Mikroyapılardaki grafik partiküllerinin farklı şekilleri, büyüklüğü ve büyüme mekanizmaları farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip dökme demirleri oluşturmaktadır. Küresel grafitli dökme demir ve vermiküler grafitli dökme demir ilk 1949 yılında patentlenmiştir. Fakat, İmalat Endüstrisinde kıymetlenen KGDD'ye nazaran VGDD zamanla merak uyandırmıştır. VGDD kazara imal edilmiş olup karakteristiği bakımından kır dökme demir ile küresel grafitli dökme demirin arasında yer almaktadır. Yüksek mekanik özellikleri, ısıl sönümleme karakteristikleri VGDD'nin seçilmesinde önemli faktörlerdir [39] [40]. VGDD'denin mikroyapısındaki grafit şeklini tanımlarken "vermiküler" terimi kullanılmaktadır. Fakat "vermiküler" dökme demirin üç boyutlu yapısını anlatmak için daha çok tercih edilen bir terimdir. Dahası "vermiküler" solucan şeklindeki grafit yapısını tanımlar ve daha düşük sülfür içeriğinden dolayı diğer demirlerden farklıdır [06]. Bu özellikler VGDD'nin daha düşük ağırlıklı malzeme oluşu ve daha fazla güç absorbe etmesi sayesinde motor imalatında ideal hale getirmiştir. Montajlanmış bir otomobil motoru VGDD sayesinde yaklaşık %9 daha hafiftir. Sadece motor bloğunun ağırlığının %22'sini azaltmıştır. Bu sayede boydan %15, en ve yükseklikten de %5 kısalma sağlanmıştır. Bu da VGDD'nin otomotiv endüstrisinde neden tercih sebebi olduğunu gayet iyi açıklar [41]. Bu iyi özelliklerinin yanı sıra dökümle imalatında bazı sorunları bulunmakta olup, üretimde riski sifıra indirilememekte ve sıkı proses kontrolü, geliştirilmiş kontrol ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Küresel grafitli dökme demir kadar güçlü olmamasına karşın, kır dökme demire göre %75 daha güçlü ve %75 daha serttir. Termal iletkenlik ve sönümleme kapasitesi de kır dökme

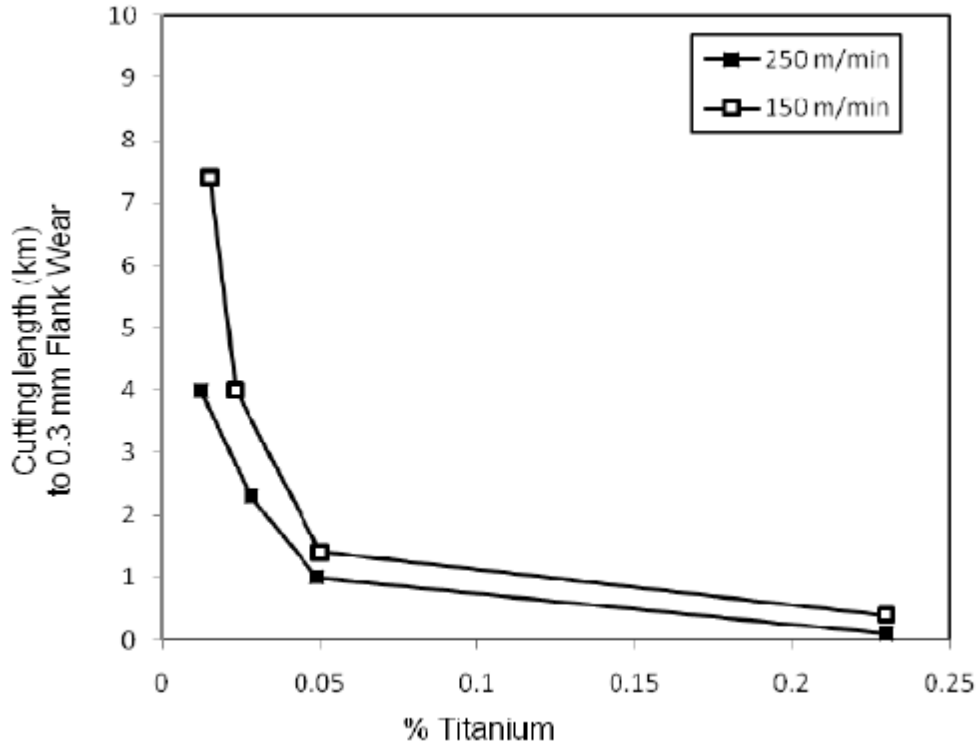
demire nazaran %80 ile %60 mertebelerindedir. Yükseltilmiş sıcaklıklarda Alüminyuma nazaran 5 kat daha yorulma direncine sahip olup ve kır dökme demirden 2 kat daha fazla yorulma direncine sahiptir [40]. Farklı derecelerdeki VGDD standartları birkaç uluslararası organizasyon ve ülke tarafından keşfedilip yayınlanmıştır (Çizelge 3.1). Bu standartlar genelde Çizelge 2.3'te görüldüğü gibi küresellik yüzdesi ve mekanik özelliklerine göre yapılmaktadır [41].

Çizelge 3.1 : VGDD standartları [41]

| Ülke | Yayıncı | Sayı | Yıl |
|--------------|---------|-----------|------|
| Uluslararası | ISO | ISO 16112 | 2006 |
| Uluslararası | SAE | J 1887 | 2002 |
| Almanya | VDG | W 50 | 2002 |
| ABD | ASTM | A 842-85 | 1997 |
| Çin | JB | 4403-87 | 1987 |
| Romanya | STAS | 12443-86 | 1986 |

Vermiküler grafitli dökme demir geniş anlamda sanayide lokomotif, otomobil ve gemicilik sektörlerinde kullanılmaktadır. Mekanik ve termal özelliklerinin uygun kombinasyonu olan vermiküler dökme demir son gelişmeler ve üretim teknikleriyle kır dökme demir ve alüminyumun yerini alacağı benziyor. Fakat düşük işlenebilirlik becerisi VGDD'nin tercih sebebine bir engel olarak görüldüğü de bir gerçek. VGDD üretimi konusunda bazı yöntemler artık üreticiler tarafından benimsenmiştir. En basit yöntemlerden biri metalde Magnezyumu belirli bir aralıkta tutabilmek için uygulanan işlemdir. Fakat işlem sadece bununla da kalmaz, çoğu dökümcü Mg iyileştirmenin yanısıra metalin kimyasının ve ısı işlemin de önemli olduğunu bilmektedir. Diğer yöntem ise ergimiş metale Titanyum ile yapılan işlemdir. Bu işlem bir çok uygulamada optimum faydalar sağlamıştır. Titanyum işlemi her ne kadar VGDD üretiminde tekrar tekrar güvenli sonuçlar verse de önemle bilinmesi gereken gerçek şudur ki; Titanyum güçlü bir karbür ve Nitrokarbür oluşumu eğilimi gösterir. TiC ve kompleks Ti Nitrokarbürler kesici takımın ömrünü azaltan çok sert fazlara neden olabilirler. Zayıf işlenebilirliğin sebeplerinden biri kır dökme demire kıyasla imalat sırasında takım-talaş yüzeyinde oluşan koruyucu Mangan Sülfür (MnS) yağlama tabakasının eksikliğidir [01, 42]. Kır dökme demirin özellikle yüksek kesme hızlarındaki işlenebilirliği sırasında tipik takım aşınmasını azaltan MnS katmanı oluşumu görülür ve yoğunlaşır. Fakat vermiküler tipteki grafit fazı üretimi için Sülfür yüzdesi azaltılmalı ve yapraksı grafit fazından kaçınılmalıdır. Böylece Mangan Sülfür (MnS)

katmanı vermiküler grafit fazı oluşması için gereken Sülfür yüzdesi minimize edilir. Vermiküler tipte grafit fazı oluşturmak için dikkat edilmesi gerekli olan bir diğer element de Titanyumdur (Ti). %0,1 ile %0,25 Titanyum eklenmesi küresel grafit yapısının oluşmasını önler. Fakat yüksek miktarda Titanyum, Titanyum Karbonitrit (TiCN) oluşmasına neden olur, ki bu da Tungsten Karbitten (WC) bile daha serttir. Böylece yüksek miktarda Titanyumun takım ömrünü etkili bir şekilde kötü etkilediğini söyleyebiliriz. Dawson ve diğ [01, 43]. VGDD malzemesinin işlenebilirliğine metalurjik değişkenlerin ve diğer elementlerin etkilerini çalıştılar. Çalışmalarında Titanyum seviyesinin % 0,01'den % 0,02'ye artmasıyla şaşırtıcı bir şekilde yarı yarıya azaldığını Şekil 3.1'deki gibi gözlemlediler.



Şekil 3.1 : Titanyum miktarının VGDD'nin işlenebilirliğine etkisi [01]

Heck ve diğ [44] MnS katmanlarının etkisini çalıştılar ve işlenen iş parçasının adezyonunun MnS katmanı tarafından önlendiğini ortaya çıkardılar. Ek olarak, XRD işleminde, X-ray fotoelektron spektrometri indüklemesinde, atomik kuvvet mikroskobu ve ikincil iyon kütle spektrometri yöntemlerinde MnS katmanını karakterize ettiler. Yazarlar sonuç olarak VGDD'nin zayıf işlenebilirlik özellikliğinin MnS eksikliğinden kaynaklandığını, kesme parametrelerini değiştirerek; kesme hızını azaltarak, tekli kesici takımları çoklularıyla değiştirerek bu durumun üstesinden gelineceğini ortaya

çıkardılar. Böylece sabit talaş kaldırma oranındaki ilerleme hızı ve kesme hızı ayarlanarak yüksek takım ömrünün yanı sıra VGDD'nin işlenebilirliğinin de artırılmasının önü açılmış olacaktır.

Nayyar ve diğ [45, 46] VGDD'nin işlenebilirliği ile ilgili daha kapsamlı bir çalışma yaptılar. Yapraksı, vermiküler ve küresel grafit demirin sürekli imalat operasyonları çalışıldı. Kesme sıvısının vermiküler ve küresel grafitli demir için avantajlarını rapor ettiler. Farklı hızlardaki, farklı ilerlemelerdeki ve kesme derinlikleri ve kesilmiş kenar geometrilerinin takım ömrüne etkisini çalıştılar.

Mohammed ve diğ [40, 47, 48] VGDD malzemesinin işleme sırasındaki talaş şeklinin, talaş aşınmasının ve kesme kuvvetlerinin mikro yapısına olan etkisini daha geniş kapsamda çalıştılar. Süreksiz talaşların oluşumunun ana sebebinin grafit ve matris arayüzünde çatlak başlamasını ve yayılması olduğunu buldular. VGDD'nin sürekli işlenmesi esnasında oluşan talaş ayrılmalarının modelini sonlu elemanlar yöntemi ile işlediler. Yazarlara göre talaş ayrılması, talaşın mikroyapısı, talaş kırılması, kesme kuvvetleri ve takım aşınma mekanizmaları genişletilebilir ve geçerli deneylerdir. Ayrıca ortogonal kesme koşulları için deneyler ve modellemeler de gerçekleştirdiler. Ek olarak kesme kuvvetinin etkisi, kesme hızı, VGDD'nin işlenmesinin optimum koşullarında hesaplanmak üzere takım aşınması üzerindeki kesme sıcaklığını da incelediler.

Metal kesme işlemi çok basit bir şekilde ifade edilmesi istenirse kesici takımın iş parçasından kesme kuvveti kullanılarak talaş koparması olarak açıklanabilir. Kesici takımlar kayma eylemini gerçekleştirmek için özel geometrilere sahiptirler. Çoğu günümüzde kullanılan karmaşık geometrili kesici takımlara nazaran bütün kesici takımlarda var olan 2 öncül yüzey vardır; rake (eğim, talaş) ve flank (yan, yanaşma) yüzeyleri. Talaş yüzeyi basit bir şekilde kesme eyleminin gerçekleştiği ve kesici takımın yüzeyinden kesilmiş malzemenin kaydığı yüzey, yanaşma yüzeyi ise kesici takımın diğer tarafında kesilmiş yüzey ile belirlenmiş yüzey arasında kama açısı yaratmaktadır. Kama açısı temel olarak kesici takımın dayanımını ve sıcaklığını kontrol eder. Yanaşma açısı da kesici takımın arka yüzey ile işlenmiş malzemede neden olan kesici takıma ait dejenerasyonundan ve ürünün kalitesinden sorumludur. İki yüzeyi kesim kenarında birleştirir.

Kesme işleminin modellenmesi sıklıkla takip eden biçimlerin kombinasyonudur; analitik, kayma hattı, mekanistik ve sonlu elemanlar modeli. Analitik model [49, 50] kesme geometrisi tabanlı kuvvet bileşkenleri arasında bir ilişki kurar. Bu modeller basit bir şekilde uygulanır, fakat, kesme açısı, talaş kalınlığı ve temel sürtünme açısı kavramlarının deneysel bir şekilde belirlenmesi gerekliliği bilinmelidir. Bu uygulanabilirliklerini ve doğruluklarını tipik bir şekilde sınırlar. En yaygın model Ernest ve Merchant'a [51] aittir. Kayma Hattı (Slip-Line) modelleri [52, 53] çalışılan malzemenin özelliğine deneysel veriden daha çok bağlıdır. Bu modeller mekanik cevabı ve sıcaklık dağılımını ön görebilir ve birim şekil değiştirme, birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklığa bağlı modellerle uyumludur. Fakat, kesme bölgesindeki kayma hattı alanının geometrisi modellenmeli, varsayımlandırılmalı ve belirlenmelidir. Son zamanlarda bilinen bu konu ile ilgili kayma hattı modeli Oxley [52, 53] tarafından önerilmiştir. Mekanistik modelleme karmaşık yapıdaki işlenebilirlik operasyonlarının kesme kuvvetlerini geniş çapta tahmin edebilen yarı-empirik bir yöntemdir [54, 55]. Bu yaklaşımın temelindeki varsayım; kesme kuvvetleri kesilmemiş talaş alanının oranıdır. Bu oransallığın sabiti spesifik kesme enerjisi olarak adlandırılır ve iş malzemesine, kesme koşullarına ve kesme geometrisine bağlıdır. Spesifik kesme enerjisi ile ilgili fonksiyonun biçimi kesme geometrisi ve koşullarının varsayımıdır. Asıl fonksiyon kalibrasyon işleminde deneysel verilerin uyumluluğu ile hesaplanmaktadır. Kalibrasyon basit ortogonal veya oblik (eğik) işlem ile ayarlanabilir. Geometrik dönüşümler uygulanabilir ve parça işlenirken oluşan üç boyutlu karmaşık kesme kuvvetleri öngörülebilir [56]

Sonlu eleman yöntemi (The Finite Element Method) son 50 yılda kesme işlemleri için başarılı bir şekilde kullanıldı. Fakat, formülasyon çalışmaları ve teknikleri hala devam etmekte. En erken çalışmalardan biri 1973 yılında ortaya atılan Klamecki'ye aittir [57]. Klamecki'nin modeli öncü olmasına rağmen kesme evresinin başında sınırlıydı. Usui ve diğ. Zamandan bağımsız bir talaş geometrisi ve kademeli gelişmeyi varsaydı [58, 59]. Iwata ve diğ. katı plastik sonlu eleman modeli kullanarak ortogonal kesme işlemini modelledi [59]. Fakat model kesme işlemine sıcaklığın etkisini dikkate almadı. Stevenson ve diğ. kesme işleminin ısı sonlu elemanlar analizini yapan öncüler oldular [60, 61]. Lajczok ve diğ. düzlem gerilme prensibine dayalı kesme modelini önerdiler [62]. Diğer modeller makine parçalarındaki kalıntı gerilmeleri ön görmek

için kullanıldı [63 – 65]. Ortogonal kesmenin sonlu elemanlar modeli ile ilgili en büyük ilerlemeyi Strenkowski ve Carroll [66 – 68] gerçekleştirdi.

Bu öncü ve kurucu çabaların üzerine diğer çabalar da eklenerek kesme prosesinin diğer kritik konuları da çalışılmış oldu. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan ortogonal kesme işleminin parçalı talaş oluşumu Ceretti [69] tarafından çalışıldı. Natarajan ve Jaelani viskoplastik model kullanarak talaş geometrisini tahmin ettiler [65]. Son zamanlarda marusich ve diğ. süreksiz talaş biçimini geliştirilebilir ön görebilen yeniden ağlanma (remeshing) ile ilgili bir model geliştirdiler [70 – 72].

Geniş aralıklı birim şekil değiştirme hızlarında ve sıcaklıklarda yüksek birim şekil değiştirme davranışlarını layıkıyla temsil edebilecek birkaç konstitütif (yapıcı) malzeme modeli önerilir. Bu modellere örnek vermek gerekirse; Zerilli-Armstrong [73], Bodner-Partom [74] ve Johnson-Cook [75] olur.

Mühendislik uygulamaları farklı birim şekil değiştirme hızlarında ve sıcaklıklarında meydana gelmektedir. Diğer bir deyişle; zaman bağımlı ama lineer olmayan. Malzemeler de farklı birim şekil değiştirme hızları ve farklı sıcaklıklarda farklı mekanik tepkiler vermektedir. Bu farklı koşulların hepsinin ayrı ayrı test edilmesi ise bayağı külfetli bir giderdir. Bu ihtiyaçtan dolayı akma gerilmesinin, birim şekil değiştirme, birim şekil değiştirme hızına ve sıcaklığa bağlı eşitlikleri ortaya atılmıştır. Bu temel eşitlikler genel bir biçimde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\sigma = f(\epsilon, \epsilon_p, T) \quad (3.1)$$

$\sigma, \epsilon, \epsilon_p, T$ sırayla gerilme, birim şekil değiştirme, birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklık olarak adlandırılırlar. Metaller için (3.1)'de verilen eşitlik viskoplastik model olarak adlandırılır. 1900'ün başlarında, Ludwik (1909) pekleşmenin etkisini bu hesaba kattı ve (3.2) nolu eşitliği ortaya attı.

$$\sigma = \sigma_0 + K\epsilon^n \quad (3.2)$$

σ_0, K, n sırayla akma dayanımı, dayanım katsayısı ve pekleşme üsteli adını almaktadır. Birim şekil değiştirmenin gerçek plastik birim şekil değiştirme olarak hesaba katılması unutulmamalıdır. Bu konsept ilerleyen kısımda detaylandırılacaktır. Hollomon basitçe Ludwik'in Kanununu gerilme, malzemenin akma dayanımının bir fonksiyonu değildir düşüncesiyle sadeleştirmiştir.

$$\sigma = K\epsilon_p^n \quad (3.3)$$

1980'lerde 2 önemli malzeme modeli pekleşme, birim şekil değiştirme hızı ve ısı yumuşama arasında temel bir ilişki kurularak ortaya atıldı. Johnson ve Cook plastik şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığa bağlı temel bir model yayınladı.

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right))(1 - T^{*m})K\varepsilon_p^n \quad (3.4)$$

Johnson ve Cook bu modelin von Mises akma gerilmesi için olduğunu makalesinde belirtmiştir. İlk parantezde belirtilen kısım gerilmenin birim şekil değiştirme hızının $1s^{-1}$ olduğu durum ve oda sıcaklığındaki değerini verir. İkinci parantezli kısım ise birim şekil değiştirme hızının etkisidir. Son olarak üçüncü parantezin olduğu kısım sıcaklığın etkisini verir. A parametresi akma dayanımını, B ve n, pekleşmenin etkilerini, C, birim şekil değiştirme hızı sabitini ve m ısı yumuşamayı belirtmektedir [75]

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right))[1 - (T^*)^m] \quad (3.5)$$

$$T^* = \begin{cases} 0 & \text{eğer } T < T_r \\ \frac{T-T_R}{T_M-T_R} & \text{eğer } T_r < T < T_m \\ 1 & \text{eğer } T > T_m \end{cases} \quad (3.6)$$

$$T^* = \frac{T-T_R}{T_M-T_R} \quad (3.7)$$

Burada T_M , ergime sıcaklığı; T_R , işlemin yapıldığı sıcaklığı yani referans sıcaklığını; σ_R , ise referans sıcaklıkta ölçülen referans gerilmeyi ve T ise σ 'nın hesaplandığı sıcaklığı göstermektedir [75]

Gelişen teknoloji ile birlikte sonlu elemanlar yöntemi yaygınlaşmış ve birçok modelleme fikri ortaya atılmıştır. Bunlardan bir kaç yazılım firmaları tarafından da benimsenmiş ve arayüzlerinde yer bulmuştur. DEFORM programının alt uygulamalarında 2D Machining (Cutting) isimli bir yazılım vardır. Kesme işlemlerinin simüle edebildiği bu programda iş parçası ile kesici takımın seçilmesinin yanı sıra ara menülerden modelleme yöntemi de seçilebilmektedir. Johnson-Cook Modelinin parametrelerinin bulunması; konusu talaşlı imalat olan araştırmacıların da işine yarayacak bir unsurdur ve bu makalede VGDD'ye ait Johnson-Cook parametreleri bulunacaktır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, otomotiv sektöründe yaygın bir şekilde kullanılan ve gün geçtikçe önemi artan, VGDD malzemesinin işlenebilirlik sorunu sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar ortamında daha kolay analiz edilebilsin diye Johnson-Cook modeli parametreleri hesaplanacaktır.

4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz ve Malzemeler

Deneysel çalışmalar öncelikle iki adımda sıralanmıştır. Bu adımlar; tel erezyon yöntemi ile kesilerek hazırlanmış düz deney numunelerinin çekme cihazında yarı statik koşullarda çekme deneylerinin yapılması ve Split Hopkinson Pressure Bar yöntemi (SPHB) ile yüksek birim şekil değiştirme hızlarında basma deneylerinin gerçekleştirilmesidir. Sonrasında basma deneyi ile veriler iyileştirilecektir.

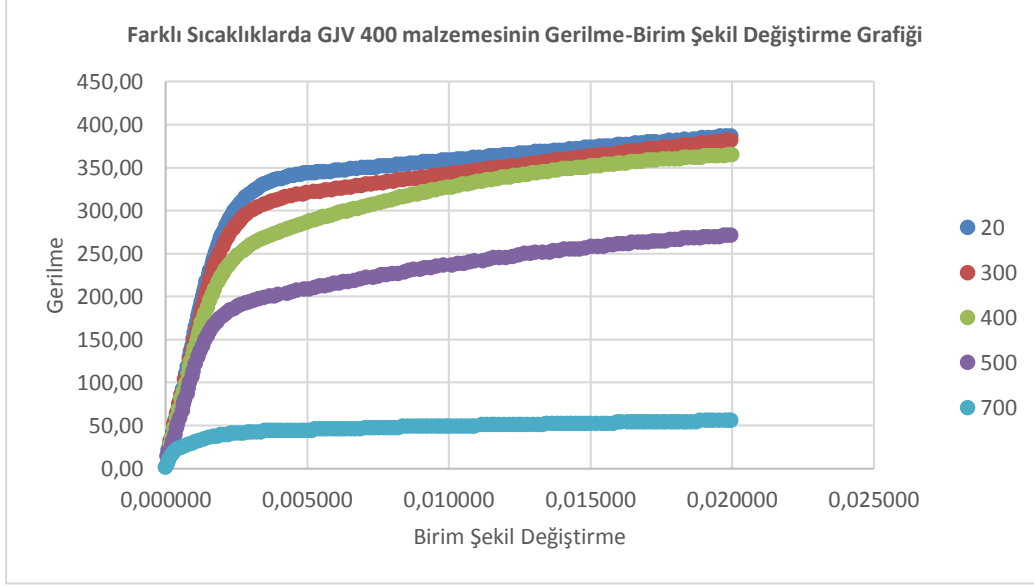
4.2 Yarı Statik Çekme Deneyi

İngilizce adıyla “Quasi-Static” diye bilinen yarı statik çekme deneyi 10^{-1} ile $10^{-5} s^{-1}$ değerleri arasında yer alır [76] Diğer deney tipi ve koşulları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Farklı deney koşullarında numuneye uygulanan deformasyon hızı [76].

| Deney tipi ya da deney koşulu | Deformasyon hızı aralığı, s^{-1} |
|---|------------------------------------|
| Sabit yük ya da gerilme altında yapılan sürünme deneyi | $10^{-8} - 10^{-5}$ |
| Hidrolik ya da vidalı çekme cihazlarıyla yapılan statik çekme deneyi | $10^{-5} - 10^{-1}$ |
| Dinamik çekme ya da basma deneyi | $10^{-1} - 10^2$ |
| Darbe numuneleri kullanan yüksek hızlı deneyler | $10^2 - 10^4$ |
| Gaz tabancası ya da patlamayla son derece yüksek hızda darbe oluşturan deneyler | $10^4 - 10^8$ |

Yarı statik şartlarda ve farklı sıcaklıklarda yapılan testlerin grafiği Şekil 4.1’de ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Farklı sıcaklıklarda VGDD malzemesinin gerilme-birim şekil değişirme grafiği

Çoğu mühendislik uygulamasında kabul gören yaklaşım yerine, eğer malzeme %5'ten daha fazla uzama değerlerine sahip ise gerçek gerilme-gerinme eğrilerinin kullanımı gerekmektedir. Gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirmeyi elde etmek için gereken denklemler Denklem 4.4 ve Denklem 4.5'te verilmiştir.

$$s = \frac{P}{A_0} \quad (4.1)$$

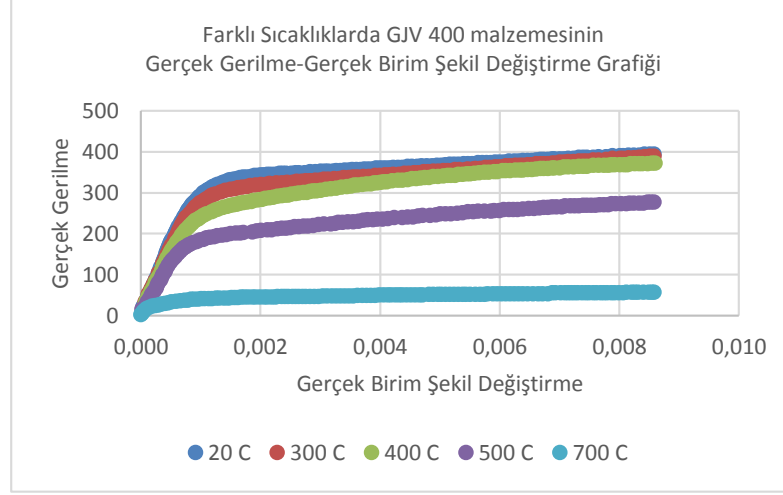
$$e = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (4.2)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.3)$$

$$\sigma = s(e + 1) \quad (4.4)$$

$$\varepsilon = \ln(e + 1) = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (4.5)$$

Burada s mühendislik gerilimi, e mühendislik birim şekil değişimi, σ gerçek gerilmeyi, ε gerçek birim şekil değiştirmeyi, P yükü, L_0 ve L başlangıç ve mevcut boyu, A_0 ve A başlangıç ve mevcut kesit alanı vermektedir. Gerçek gerilim-birim şekil değişirme ifadeleri ile çekme deneyi esnasında numunelerin kesit alanında meydana gelen azalma da hesaplamaya dahil olur. Bu ilişkiler sadece boyun verme noktasına kadar geçerlidir. Boyun verme eyleminden sonra deformasyon homojen bir dağılım göstermez. Bu sebeple hangi noktada boyun verdiğinin bilinmesi gerekir [77].



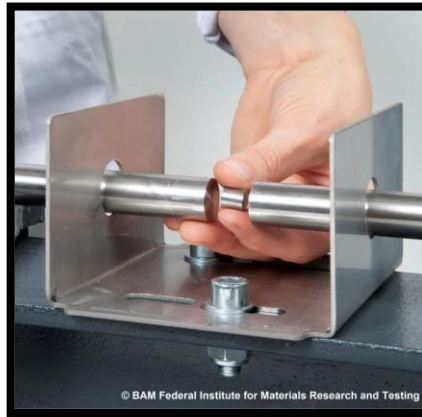
Şekil 4.2 : Farklı sıcaklıklarda VGDD malzemesinin gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişirme grafiği

4.3 Split Hopkinson Pressure Bar Deneyi

Yüksek deformasyon hızlarına erişebilmek için yapılan Split Hopkinson Pressure Bar deney düzeneği Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te yer almaktadır.



Şekil 4.3 : Split Hopkinson Pressure Bar deney düzeneği, BAM Federal Enstitüsü



Şekil 4.4 : SPHB deney düzeneğine numune yerleştirilmesi

4.3.1 Test 182 (P1) Kodlu Deney Numunesi

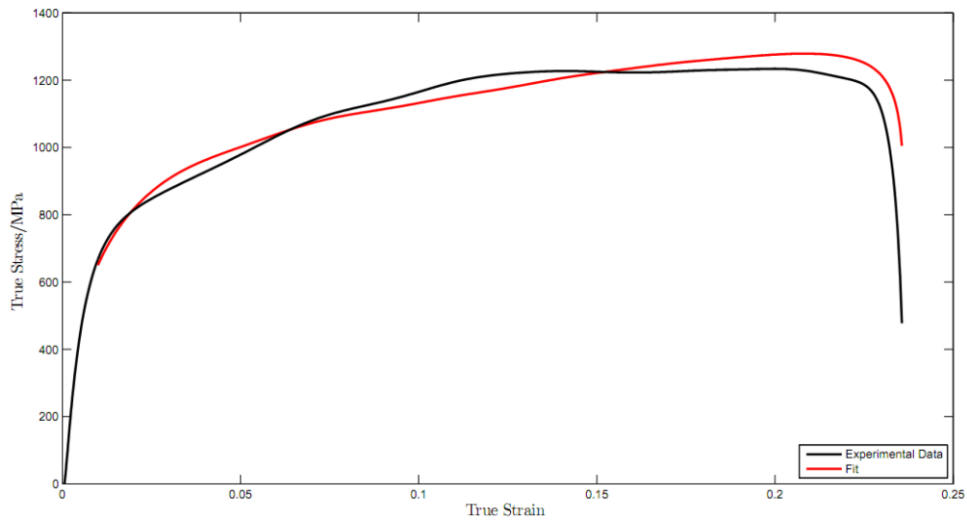
SHPB yöntemiyle yapılan ilk deney 2200 s^{-1} hızında olan Test 182 (P1) kodlu deney numunesidir. (Şekil 4.5 - 4.7)



Şekil 4.5 : Soldaki: Deformasyona uğramamış numune (5x6mm), sağdaki: deforme olmuş numune



Şekil 4.6 : Soldaki: Deformasyona uğramamış numune (5x6mm), sağdaki: deforme olmuş numune, üst bakış



Şekil 4.7 : 2200 s^{-1} hızında gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

4.3.2 Test 184 (P2) Kodlu Deney Numunesi

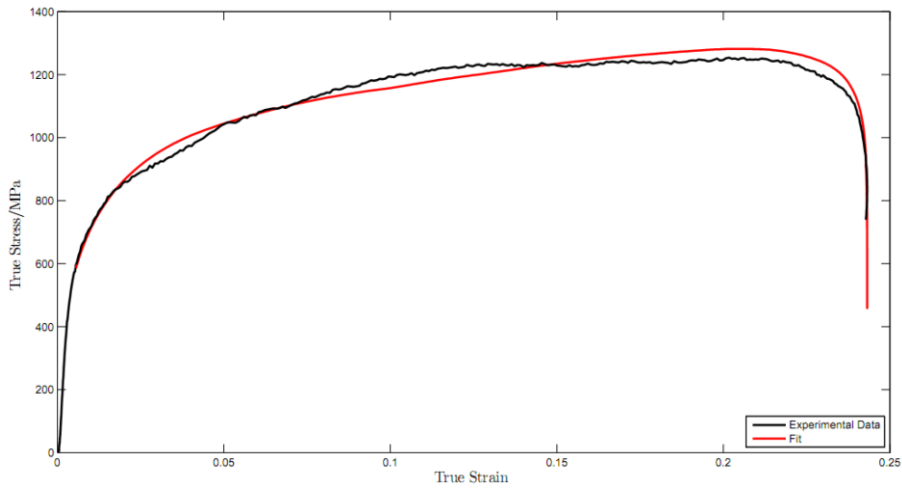
SHPB yöntemiyle yapılan ikinci deney 2000 s^{-1} hızında olan Test 184 (P2) kodlu deney numunesidir. (Şekil 4.8 - 4.10)



Şekil 4.8 : Soldan sağa: deformasyona uğramamış numune (5x6 mm), deforme numune, bakır vuruş şekillendirici (pulseshaper) 5x0,2mm)



Şekil 4.9 : Soldan sağa: deformasyona uğramamış numune (5x6 mm), deforme numune, bakır vuruş şekillendirici (pulseshaper) 5x0,2 mm)



Şekil 4.10 : 2000 s^{-1} hızında gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

4.3.3 Test 187 (P3) Kodlu Deney Numunesi

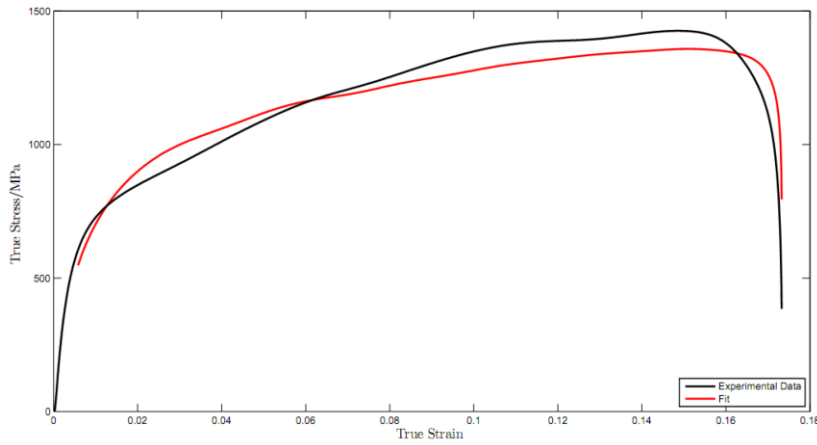
SHPB yöntemiyle yapılan üçüncü deney 1550 s^{-1} hızında olan Test 187 (P3) kodlu deney numunesidir. (Şekil 4.11 - 4.13)



Şekil 4.11 : Soldaki: deformasyona uğramamış numune (7x9 mm), sağdaki deforme numune



Şekil 4.12 : Soldaki: deformasyona uğramamış numune (7x9 mm), sağdaki deforme numune (üst bakış)



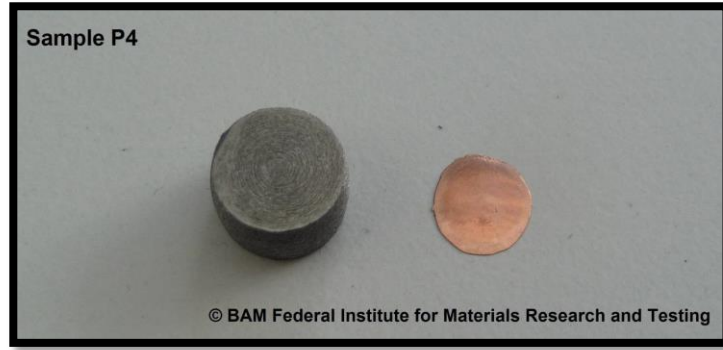
Şekil 4.13 : 1550 s^{-1} hızında gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

4.3.4 Test 190 (P4) Kodlu Deney Numunesi

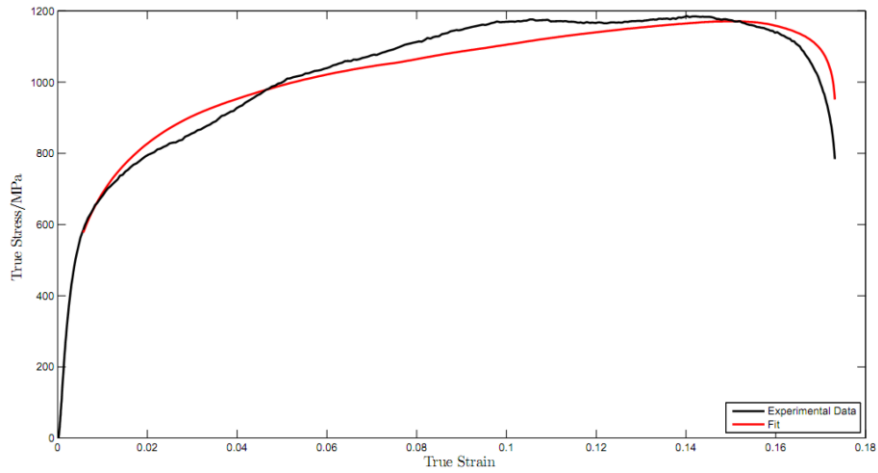
SHPB yöntemiyle yapılan dördüncü ve son deney 1530 s^{-1} hızında olan Test 190 (P4) kodlu deney numunesidir. (Şekil 4.14 - 4.16)



Şekil 4.14 : Soldaki: deformasyona uğramamış numune (7x9 mm), sağdaki deforme numune



Şekil 4.15 : Soldaki: deforme numune, sağdaki: Bakır vuruş şekillendirici 5x0,2 mm



Şekil 4.16 : 1530 s^{-1} hızında gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

4.4 Johnson-Cook Parametrelerinin VGDD Malzeme İçin Bulunması

Johnson-Cook Parametrelerinin bulunması için her malzemeye özel ayrı işlem yapılması gerekebilir. Erime sıcaklığı, sünekliliği, kırılmanlığı, değişkenlik gösterebilir. Bu bölümde vermiküler grafitli dökme demir için Johnson-Cook parametrelerinin bulunması konusu işlenecektir. Şekil 4.17’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.17 : Vermiküler grafitli dökme demirin JC Parametrelerinin hesaplanması için yapılan işlemlerin akış şeması

Modelin bütün parametrelerini belirlemeyebilmek için ilk üçü olan A, B ve n’den başlamak gerekir. A akma dayanımını, B ve n parametreleri de malzemenin sertleşme davranışlarını simgeler. Gerçek birim şekil değiştirme değerinin %0,2 olduğu noktadan elastik bölüme paralel bir doğru çizildiğinde gerilim değeri bize A parametresini verecektir [75].

B ve n sabitleri Log (Plastik gerilim) – Log (Plastik birim şekil değiştirme) grafiğinin çizilmesi ile hesaplanır. Johnson-Cook modelinde oda sıcaklığı koşulları ve plastik birim şekil değiştirmenin referans birim şekil değiştirme değerine eşit olduğu durumda ikinci ve üçüncü parantez etkisiz kalır;

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right))[1 - (T^*)^m] \quad (4.5)$$

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\dot{\varepsilon}_0}\right)) \left[1 - \left(\frac{T_R - T_R}{T_M - T_R}\right)^m\right] \quad (4.5a)$$

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln(1)) [1 - (0)^m] \quad (4.5b)$$

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + 0)[1 - 0] \quad (4.5c)$$

Akma dayanımı, A parametresi gerilme değerinden çıkarılır ve her iki tarafın doğal logaritması alınırsa;

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \quad (4.6)$$

$$\sigma - A = B\varepsilon_p^n \quad (4.6a)$$

$$\ln(\sigma - A) = \ln(B) + n \ln(\varepsilon_p) \quad (4.7)$$

Sonucu elde edilir. Plastik birim şekil değiştirmenin 1 değerine eşit olduğu noktada log-log grafiğinde B değeri akma değerinin çıkarıldığı gerilme değerine eşit olur.

$$\ln(\sigma - A) = \ln(B) + n \ln(1) \quad (4.7a)$$

$$\ln(\sigma - A) = \ln(B) + 0 \quad (4.7b)$$

$$\sigma - A = B \quad (4.7c)$$

Çizilen grafikte eğim de n parametresini verecektir. Böylece log (plastik gerilme) – log (plastik birim şekil değiştirme) lineer eğrisi doğrulandığında B ve n parametreleri elde edilmiş olacaktır.

Birim şekil değiştirme hızı ile ilgili parametre olan C, oda sıcaklığındaki farklı birim şekil değişim hızlarından yola çıkılarak bulunacaktır. Farklı plastik deformasyon hızlarında elde edilen gerilme değerlerinin yarı statik gerilmeye oranlandığı değerden 1 azaltılarak y eksenine, plastik deformasyon hızlarının da logaritmik x eksenine yazıldığı durumda noktalar en uygun düz çizgi ile birleştirilir. Oluşan bu çizginin eğimi C değerini vermektedir.

Oda sıcaklığında yapılan deneylerde 3'üncü parantez değerleri sadeleşir. Birim şekil değiştirme referansının ($\dot{\varepsilon}_0$) 1 s^{-1} olduğu durumda ve referans sıcaklık koşullarında; birim şekil değiştirme hızının 1 s^{-1} olduğu gerilme değerinin birim şekil değiştirme hızının değişkenlik gösterdiği genel formüle oranlaması şu şekile gösterildiğinde;

$$\frac{\sigma_1}{\sigma} = \frac{(A+B\varepsilon_p^n)}{(A+B\varepsilon_p^n)} \times \frac{(1+C \ln(\frac{1}{1}))}{(1+C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{1}))} \times \frac{[1-(\frac{T-T_R}{T_M-T_R})^m]}{[1-(\frac{T-T_R}{T_M-T_R})^m]} \quad (4.8)$$

Formül 4.8a biçimine indirgenir;

$$\frac{\sigma_1}{\sigma} = \frac{1}{1} \times \frac{1}{(1+C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{1}))} \times \frac{1}{1} \quad (4.8a)$$

C değeri yalnız bırakıldığında 4.8b'deki hali alır;

$$C = \frac{(\frac{\sigma}{A+B*0.01^n}-1)}{\ln(\dot{\varepsilon}_0)} \quad (4.8b)$$

C parametresini bulabilmek için farklı birim şekil değiştirme hızlarındaki grafik verilerininin %1 birim şekil değiştirmeye denk gelen gerilme değerlerinden bir grafik oluşturulursa; bu grafiğin eğimi C değerini verecektir [75]

Isıl parametre olan m değeri ise basit bir matematik ile;

$$\frac{\sigma_{Room}}{\sigma} = \frac{(A+B\varepsilon_p^n)}{(A+B\varepsilon_p^n)} \times \frac{(1+C \ln(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}))}{(1+C \ln(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}))} \times \frac{[1-(\frac{T_R-T_R}{T_M-T_R})^m]}{[1-(\frac{T-T_R}{T_M-T_R})^m]} \quad (4.9)$$

$$\frac{\sigma_{Room}}{\sigma} = 1 \times 1 \times \frac{[1-(0)^m]}{[1-(\frac{T-T_R}{T_M-T_R})^m]} \quad (4.9a)$$

$$\frac{\sigma_{Room}}{\sigma} = \frac{1}{[1-(\frac{T-T_R}{T_M-T_R})^m]} \quad (4.9b)$$

$$m = \frac{\ln(1-\frac{\sigma}{\sigma_{Room}})}{\ln T^*} \quad (4.9c)$$

σ_{Room} oda sıcaklığında, belirlenmiş bir plastik birim şekil değiştirme değerindeki gerilmedir. T^* ise Formül 3.6'daki normalize sıcaklık değeridir [78, 79]

4.4.1 SHPB deneyi neticesinde alınan değerler

SPHB için BAM Federal Enstitüsü'ne gönderilen Çizelge 4.2'te boyutları belirtilen numuneler test edildikten sonra adyabatik Johnson-Cook parametreleri bulunmuş ve Çizelge 4.3'deki sonuçlar ortaya çıkmıştır;

Çizelge 4.2 : SHPB deneyine ait numune boyutları

| Test: | 182 (P1) | 184 (P2) | 187 (P3) | 190 (P4) |
|-------------------------------------|----------|-------------|----------|-------------|
| Numune boyu [mm] (çap x uzunluk) | 5x5 | 5x5 | 7x8 | 7x8 |
| Vuruş Şekillendirici | - | Cu 5x0,2 mm | - | Cu 5x0,2 mm |

Çizelge 4.3 : 4 farklı VGDD numunesi için adyabatik Johnson-Cook parametreleri

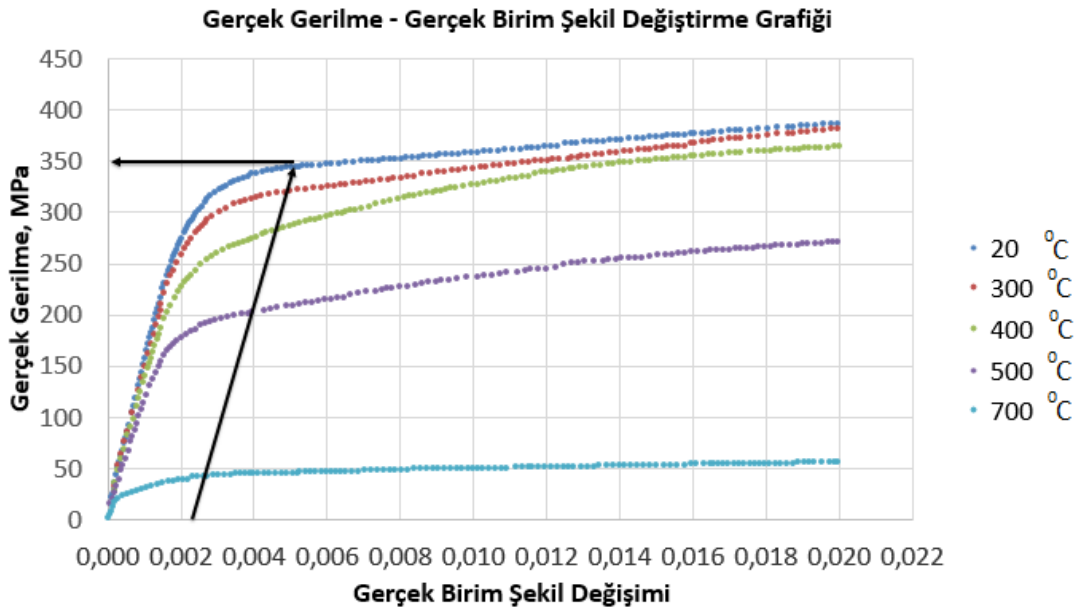
| Test: | 182 (P1) | 184 (P2) | 187 (P3) | 190 (P4) |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A/MPa | -57.54796 | -52.09466 | -39.88625 | -44.56352 |
| B/MPa | 63.80994 | 56.77551 | 41.28519 | 43.00252 |
| C | 32.92195 | 42.84375 | 177.12546 | 133.63712 |
| N | 0.01231 | 0.00907 | 0.00448 | 0.00373 |

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER

Yapılan deneysel çalışmalarda toplanan veriler Johnson-Cook parametrelerini bulmaya yetmektedir. BAM Enstitüsü'nden alınan değerlerde A parametresinin negatif olduğu görülmektedir. Fakat Johnson-Cook, makalelerinde A parametresinin akma dayanımı olduğundan bahsetmiştir. Bu adyabatik değerlerin fiziksel anlamlarını taşımadığı; örneğin A parametresinin akma dayanımına eşit olmadığı aktarılmış, formülde ilk parantezde yer alan A, B ve n parametrelerinin hesaplanması için yarı-statik bir deneyin yapılması gerektiği söylenmiştir. Bu sebeple bu bölümde Johnson-Cook parametreleri yarı-statik deney değerleri ile, yüksek hızda yapılan deney sonuçlarının birleştirilmesiyle hesaplanacaktır.

5.1 Yarı Statik Deney Sonuçlarını Kullanarak A, B ve n parametrelerinin bulunması

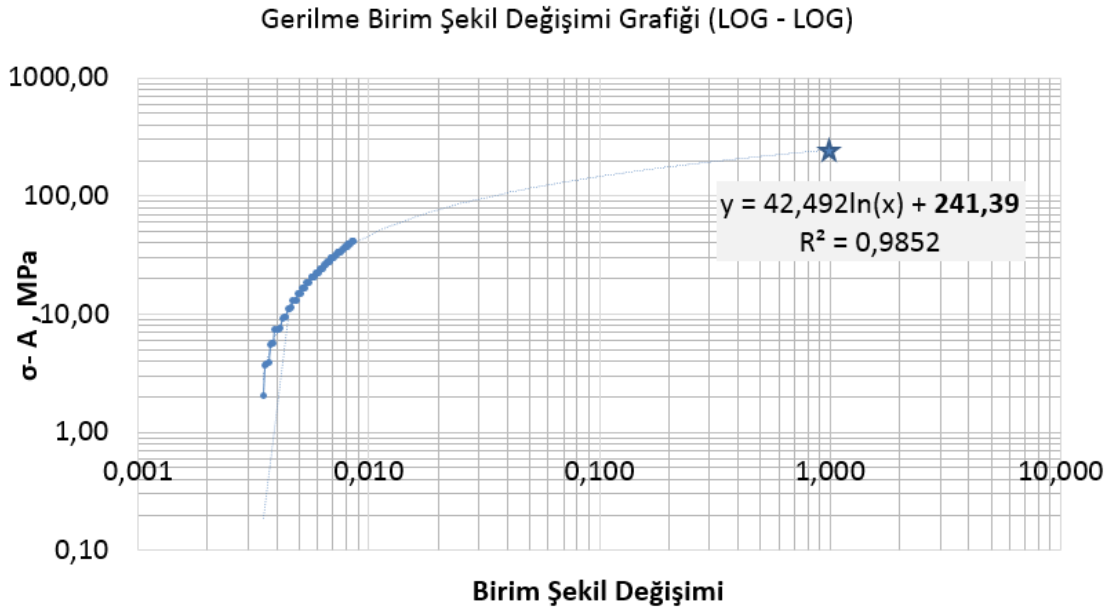
20 derece sıcaklıkta yapılan çekme deneyine ait gerilme – birim şekil değiştirme grafiğinde %0,2'den elastik bölge çizgisine paralel çizilen çizginin grafiği kesti nokta 350 MPa değerini vermektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 : Farklı Sıcaklıklarda VGDD malzemesine ait gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

Buradan A parametresi 350 MPa bulunur.

Birim şekil değiştirme, ϵ , değerinin 1'e eşit olduğu durumda $-y$ eksenini kesen değer $\sigma - A = B$ koşulunu sağladığından B değerini vermektedir. Bu grafiğe göre B değeri 241,39 MPa'dır. Eğim, n, ise 0,134 bulunmuştur (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 : VGDD'ye ait logaritmik gerilme – birim şekil değişimi grafiği

5.2 Yüksek Hızda Birim Şekil Değiştirme Değerini de Hesaba Katarak C Parametresinin Bulunması

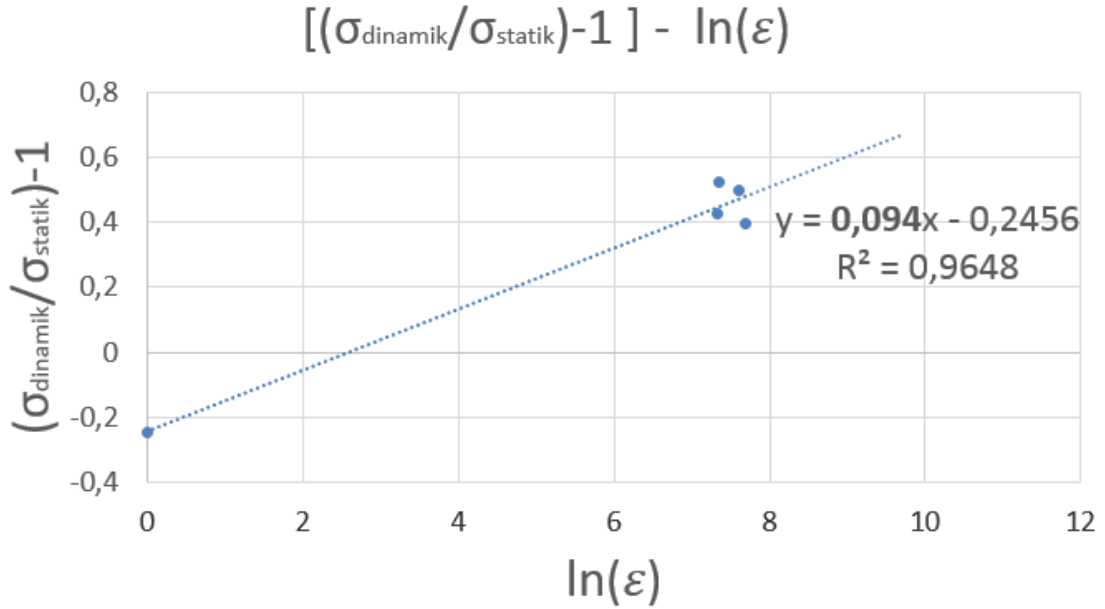
Farklı birim şekil değişim hızlarında elde edilen verileri kullanarak C değerini hesaplamak için, Johnson-Cook malzeme modelinden türetilen 4.8b'deki formül kullanılacaktır.

$A=350$ MPa, $B=241,39$ MPa, $n=0,134$ değerleri daha önce bulunmuştur. Sonrasında bu değerlerle birlikte Çizelge 5.1'de bulunan %1 birim şekil değiştirmenin karşılığındaki gerilme değerleri alınarak çizilen grafiğin eğiminden C değeri bulunmuş olacak.

Çizelge 5.1 : C değerinin bulunması için farklı birim şekil değişimi hızlarında, VGDD'ye ait değerler.

| Birim Şekil Değişimi, ε | Birim Şekil Değişimi Hızı, $\dot{\varepsilon}$ (s ⁻¹) | Gerilme, σ (MPa) | Logaritmik Birim Şekil Değişimi, $\ln(\dot{\varepsilon})$ | $(\frac{\sigma}{A + B * 0.01^n} - 1)$ |
|-------------------------------------|---|-------------------------|---|---------------------------------------|
| 0,01 | 1 | 358,848 | 0 | -0,24869415 |
| 0,01 | 1530 | 680,826 | 7,33 | 0,425419059 |
| 0,01 | 1550 | 728,415 | 7,35 | 0,525053933 |
| 0,01 | 2000 | 714,187 | 7,6 | 0,495267139 |
| 0,01 | 2200 | 665,712 | 7,7 | 0,393776101 |

Grafiğin eğimi hesaplandığında C=0,094 olarak bulunur (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 : C değerinin bulunması

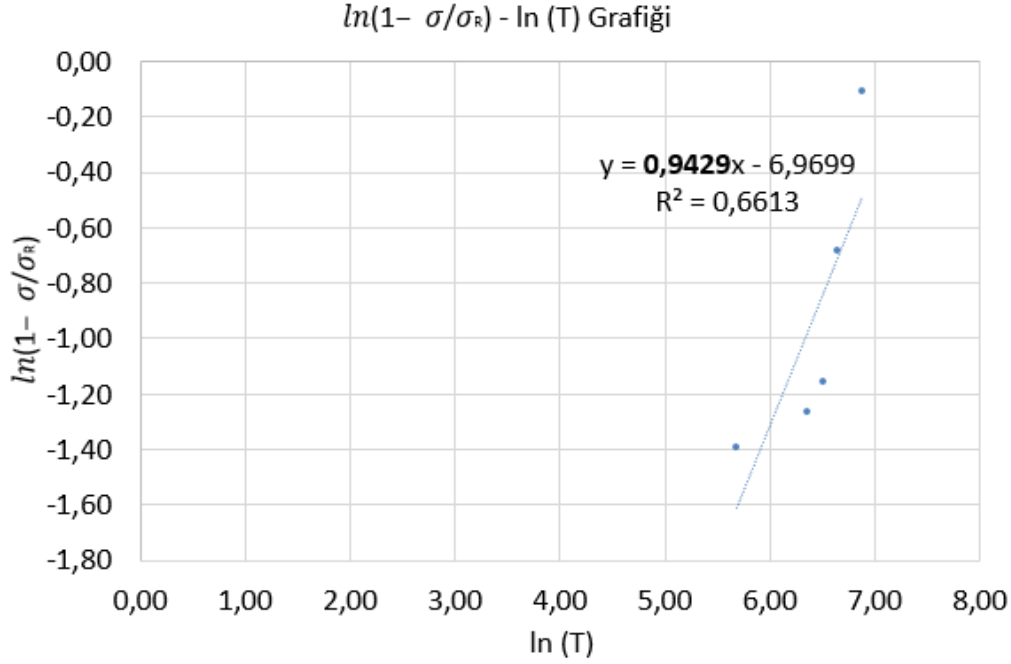
5.3 Farklı Sıcaklık Değerleriyle m parametresinin bulunması

Isıl yumuşama etkisi olan m parametresi için Çizelge 5.2'de yer alan farklı sıcaklıklardaki değerlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 5.2 : Farklı sıcaklık değerlerinde VGDD'nin özellikleri

| Birim Şekil Değişimi, ε | Sıcaklık, T (K) | Gerilme, σ (MPa) | $\ln(T)$ | $\ln(1 - \frac{\sigma}{A + B * 0.01^n})$ |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------------|----------|--|
| 0,01 | 20 | 358,848 | 5,680684 | -1,391531 |
| 0,01 | 300 | 680,826 | 6,351147 | -1,262969 |
| 0,01 | 400 | 728,415 | 6,511968 | -1,157805 |
| 0,01 | 500 | 714,187 | 6,650473 | -0,685726 |
| 0,01 | 700 | 665,712 | 6,880538 | -0,109135 |

Isıl yumuşama parametresi olan m Şekil 5.4'teki grafiğin eğiminden hesaplanır.



Şekil 5.4 : JC Parametrelerinden m 'nin bulunması

Elde edilen parametreler Çizelge 5.3'teki gibidir;

Çizelge 5.3 : VGDD için Johnson-Cook parametreleri

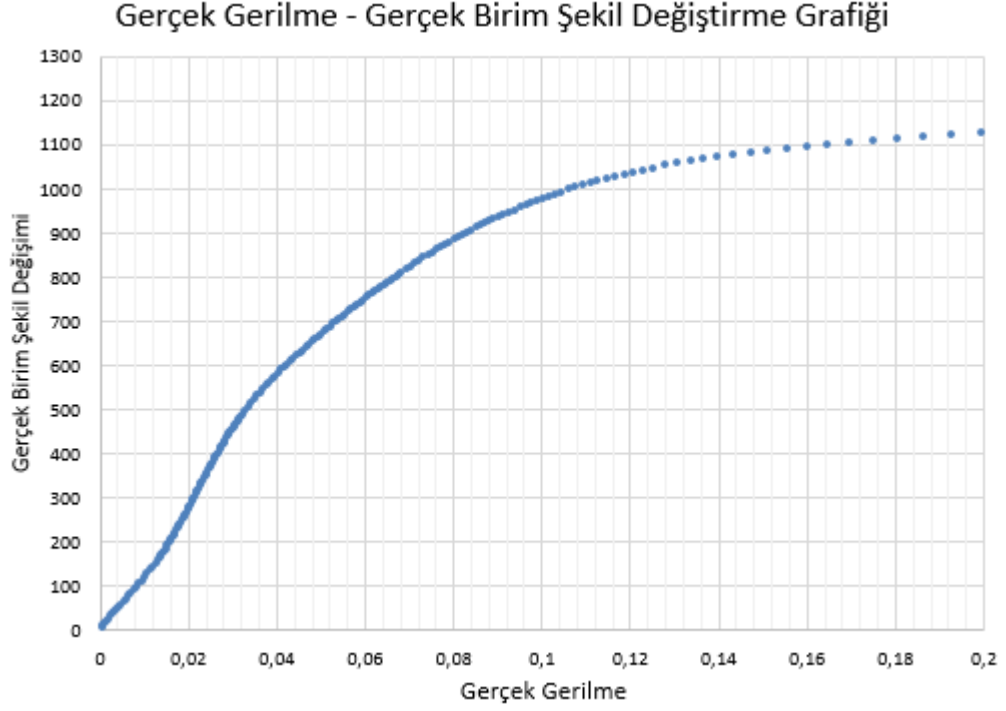
| A [MPa] | B [MPa] | C | n | m |
|---------|---------|-------|-------|------|
| 350 | 241,39 | 0,094 | 0,134 | 0,94 |

VGDD malzeme için Johnson-Cook modelinin parametreleri formülde yerine yazıldığında;

$$\sigma = (350 + 241,39\varepsilon_p^{0,134})(1 + 0,094 \ln(\dot{\varepsilon}_p)) \left[1 - \left(\frac{T-20}{1130}\right)^{0,94}\right] \quad (5.1)$$

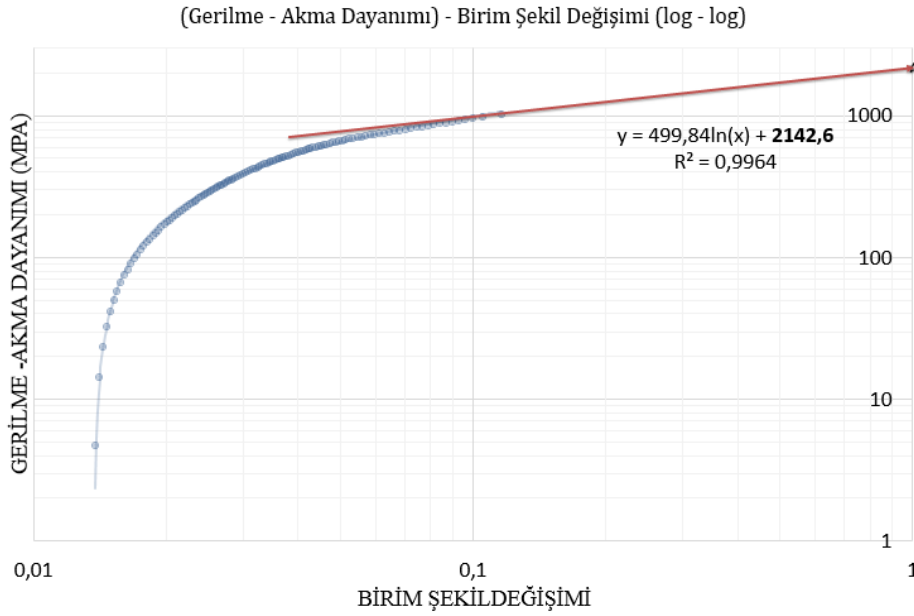
5.4 Basma Deneyi ile Parametrelerin Yeniden Hesaplanması

Birim şekil değişimi kırılğan malzemelerin çekme grafiğinde az veri içermesi nedeniyle farklı birim şekil değişim hızlarında basma deneyleri yapıldı (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 : $1s^{-1}$ hızında VGDD basma deneyi Gerçek gerilme – Gerçek birim şekil değişimi grafiği

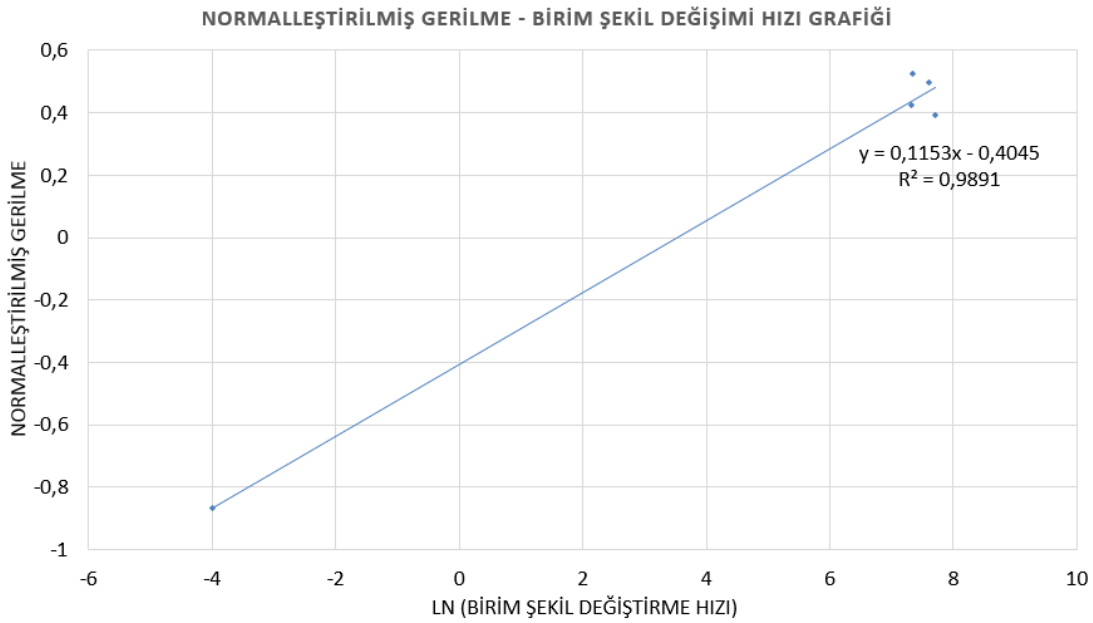
Basma deneyi sonucunda A parametresi 500 MPa bulundu. Akma dayanımı gerilmeden çıkartılıp birim şekil değişimi ile log-log grafiği çizildiğinde birim şekil değişiminin 1 olduğu nokta 2142,6'ya denk gelmiş oldu (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 : $\ln(\sigma - A) - \ln \epsilon$ Grafiği

Şekil 5.6'ya göre eğim, yani; n değeri 0,315 çıkacaktır.

Normalize edilmiş gerilme değeri ile birim şekil değiştirme hızının grafiği Şekil 5.8'deki gibi elde edildikten sonra eğimden C değeri 0,1153 bulunacaktır. (Şekil 5.7)



Şekil 5.7 : $[(\sigma_{\text{dinamik}} / \sigma_{\text{statik}}) - 1] - \ln \epsilon$ grafiği

Elde edilen parametreler Çizelge 5.4'teki gibidir;

Çizelge 5.4 : VGDD için basma deneyi kullanarak elde edilen JC parametreler

| A [MPa] | B [MPa] | C | n |
|---------|---------|--------|-------|
| 500 | 2142,6 | 0,1153 | 0,315 |

6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tez kapsamında VGDD malzemeye ait Johnson-Cook malzeme modelinin deneysel ve analitik yöntemlerle geliştirilmesi konusu incelenmiştir. VGDD perlitik yapısından dolayı kırılğan bir yapı göstermektedir. Johnson-Cook malzeme modelinde ise malzemenin plastik bölgelerdeki davranışları analiz edilmektedir. A parametresinin hesaplanması için elastik bölge yeterli iken, B ve n parametrelerini hesaplamada plastik bölge önem taşımaktadır. Akma dayanımı ile malzemenin boyun verdiği çekme dayanımı arasında kalan alandan alınan verilerin aralığı malzemenin gerçeğe yakın değerlerini bulma konusunda büyük önem taşımaktadır. İlk çalışmada VGDD malzemenin yarı-statik deneylerde elastik bölgeden sonra çabuk kırılması gerçek sonuçlara yaklaşmanın zorlaştırmasına neden olsa da parametrelerin bulunması için gereken prosedürlerin uygulanmasına izin vermiştir [80]

Daha sonra birim şekil değişimi etkisini görebilmek için farklı deformasyon hızlarında basma deneyleri yapılmış ve parametreler yeniden hesaplanmıştır. Yarı statik değerler çekme ve burma deneyleri ile hesaplanmaktadır. Çekme, basma ve burma deneylerinin A, B, n ve C parametreleri ayrı ayrı bulunup Xicheng ve diğ. gibi verilerin ortalaması alınarak hesaplanabilir [81]. Bazı dökme demir parametreleri Çizelge 6.1'de yer almaktadır.

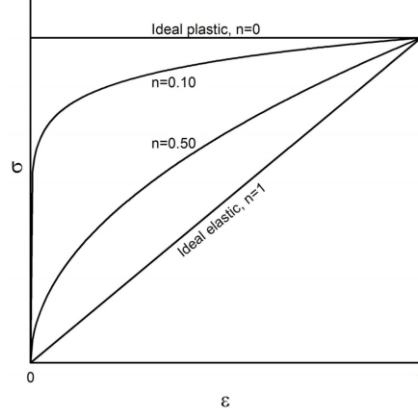
Çizelge 6.1 : VGDD için JC parametrelerinin karşılaştırılması [091]

| | A [MPa] | B [MPa] | C | n | m |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|
| Kır Dökme Demir [82] | 470 | 250 | 0.004 | 0.1 | 1.1 |
| VGDD JC Parametreleri (Çekme) | 350 | 241,39 | 0,094 | 0,134 | 0,94 |
| VGDD JC Parametreleri (Ort.) | 425 | 1192 | 0,10465 | 0,225 | 0,94 |
| VGDD JC Parametreleri (Basma) | 500 | 2142,6 | 0,1153 | 0,315 | |
| EN-GJS-700-2 [83] | 130 | 111.56 | 0.138 | 0.34 | 1.125 |
| NDI [84] | 525 | 650 | 0.0205 | 0.6 | |

Gerçeğe en yakın parametrelerin bulunması için burma deneyinin de yapılması ve son olarak da gerçek verilerle doğrulanması yararlı olacaktır. Bulunan ortalama parametreleri yorumlamak gerekirse; A, Akma Dayanımı kabul edilebilir bir değerde çıkmıştır. B değeri basma deneyinden elde edilen verilerde çok yüksek çıkmasına

karşın çekme deneylerinde elde edilen parametre ile bu fark bir nebze azalmıştır. n , pekleşme üsteli de metal için kabul edilebilir değerler arasında olmasına karşın C değeri yüksek çıkmıştır. m , ısıl yumuşama değeri ise kabul edilebilir bir değerdedir.

Johnson Parametrelerinden n üsteli tipik metaller için 0,1 ile 0,5 değerler arasında almaktadır (Şekil 6.1). Bu çalışmada 0,225 bulundu.



Şekil 6.1 : Metaller için tipik n değerleri; 0,10-0,50 [85]

Gerçeğe daha yakın sonuçlar almak için Johnson ve diğ. [75] makalelerinde yaptığı gibi çok düşük birim şekil değiştirme hızlarında burma deneyi karşılaştırılması yapılmalı ve doğrulama yöntemleri kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [01] **Dawson, S., Hollinger, I., Robbins, M., Daeth, J., Reuter, U., & Schulz, H.** (2001). The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron. SAE Transactions: Journal of Materials & Manufacturing, 110, 334-352.
- [02] **Abele, E., & Schramm, B.** (2008). Using PCD for machining CGI with a CO2 coolant system. Production Engineering, 2(2), 165-169.
- [03] **Campbell, F. C. (Ed.).** (2008). Elements of metallurgy and engineering alloys. ASM International. p. 453. ISBN 978-0-87170-867-0
- [04] **Welding Handbook**, Cilt 4, American Welding Society, 1984, Böl. 5
- [05] **The Procedure Handbook of Arc Welding** The Lincoln Electric Company, 1994
- [06] **Mohammed, E. S. M.** (2011). The Effect of Compacted Graphite Iron Microstructure on Fracture and Machining., PhD. Thesis, School of Engineering, McMaster University, Ontario, 20
- [07] **Santner J.S., Goodrich G.M.,** Iron Alloys, Casting Source Directory, (2006) pp.17-22
- [08] **Ataçelik Döküm İnternet Sayfası**, (Ziyaret günü 3 Aralık 2015'te yapıldı)
<http://www.atacelik.com/sferodokumnedir.html>
- [09] **Reardan, Arthur C.** (2011). Metallurgy for the non-metallurgist (2nd edition) ASM international (2011).cast irons, 269-270
- [10] **Morrogh, H., & Williams, W. J.** Graphite formation in gray cast iron. Proceedings of the Institute of British Foundrymen, 40, 1946-47.
- [11] **Norman, B. P., Keith, D. M., & Albert, P. G.** (1949). U.S. Patent No. 2,485,761. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [12] **Sintercast**, www.sintercast.com, August 2011
- [13] **Subramanian, S. V., & Kay, D.** (1982). Compacted Graphite Morphology Control.(Retroactive Coverage). American Foundrymen's Society, Inc., 589-603.

- [14] **Stefanescu, D. M., & Loper, C. R.** (1981). Recent progress in the compacted/vermicular graphite cast iron field. *Giesserei-Prax*, (5). 73-96
- [15] **Stefanescu, D. M.** (1990), "Compacted graphite iron".ASM International, ASM Handbook, Properties and selection: irons, steel, and high performance alloys. 01, 102-129
- [16] **Walton, C. F., & Opar, T. J.** (1981). *Iron castings handbook*. Iron Castings Society, Inc, 121.
- [17] **Bradley, W. L., & Srinivasan, M. N.** (1990). Fracture and fracture toughness of cast irons. *International Materials Reviews*, 35(1), 129-161.
- [18] **Fundições, T.** (2005). Thermal conductivity of gray iron and compacted graphite iron used for cylinder heads. *Revista Matéria*, 10(2), 265-272.
- [19] **R.K. Nanstad, F.J. Worzala, and C.R. Loper, Jr.,** Static and Dynamic Toughness of Ductile Cast Iron, *Trans. AFS*, Vol 83, 1975
- [20] **ASM Speciality Handbook Cast Irons**, ISBN: 978-0-87170-564-8, pp. 433, 1996
- [21] **Sjörger, T.**, (2007) "Influences of the graphite phase on elastic and plastic deformation behaviour of cast irons", PhD. Thesis, School of Engineering, Jönköping University, Sweden, 20
- [22] **Dawson, S., Hollinger, I., Robbins, M., Daeth, J., Reuter, U., & Schulz, H.** (2001). The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron. *SAE Transactions: Journal of Materials & Manufacturing*, 110, 334-352.
- [23] **Marwanga, R. O., Voigt, R. C., & Cohen, P. H.** (2000). Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of continuously cast ductile irons. In *Transactions of the American Foundry Society and the One Hundred Fourth Annual Castings Congress* (pp. 651-661).
- [24] **Reuter, U., Schulz, H., Dawson, S., Hollinger, I., Robbins, M., & Daeth, J.** (1999). Wear mechanisms in high-speed machining of compacted graphite iron. In *Design e Machining Workshop—CGI*.
- [25] **Dökümhane**, www.dokumhane.net, January 2015.
- [26] **Murthy, V. S. R., & Seshan, S.** (1985). Vermicular graphite cast iron—current state of the art. *Sadhana*, 8(4), 361-372.

- [27] **Germann, H., Starke, P., Kerscher, E., & Eifler, D.** (2010). Fatigue behaviour and lifetime calculation of the cast irons EN-GJL-250, EN-GJS-600 and EN-GJV-400. *Procedia Engineering*, 2(1), 1087-1094.
- [28] **Loper Jr, C. R., Lalich, M. J., Park, H. K., & Gyarmaty, A. M.** (1980). The Relationship of Microstructure to Mechanical Properties in Compacted Graphite Cast Irons. In AFS 84 th Annual Meeting (pp. 313-330).
- [29] **Sofroni K, Riposan I, Chira I** 1974 The metallurgy of cast iron (eds.) B Lux, I Minkoff, F Mollard (St Saphorin, Switzerland: Georgi) pp. 179-195
- [30] **Dawson, S.** (1999). Compacted graphite iron: mechanical and physical properties for engine design. *Vdi Berichte*, 1472, 85-106.
- [31] **Metal İşleme Ürünleri Kataloğu**, Sandvik Coromant, İstanbul, H-29, 2012
- [32] **Secomax PCBN Technical Guide**, 2003, 69-70.
- [33] **Mocellin, F., Melleras, E., Guesser, W. L., & Boehs, L.** (2004). Study of the machinability of compacted graphite iron for drilling process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26(1), 22-27.
- [34] **Roos, E., & Maile, K.** (2008). Kriterien zur Schadensbewertung. *Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung*, 403-404.
- [35] **Akkurt, M.**, “Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 8-107 (1992)
- [36] **Köksal, S.** (2000). Face milling of nickel-based superalloys with coated and uncoated carbide tools (Doctoral dissertation, Coventry University).
- [37] **Metallurgy and Machinability**, Kennametal Tornalama Takımları Kataloğu, İstanbul, 32-36 (2005).
- [38] **Morrogh, H., & Williams, W. J.** (1947). GRAPHITE FORMATION IN CAST IRONS AND IN NICKEL CARBON AND COBALT CARBON ALLOYS. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 155(3), 321.
- [39] **Murthy V.SR., Seshan, S., Seshan, K.** (1984). Vermicular graphite cast iron current state of art Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India MS received 8 May 1984; revised 7 August 1984.
- [40] **Mohammed, W. M., Ng, E., & Elbestawi, M. A.** (2012). Modeling the effect of compacted graphite iron microstructure on cutting forces and tool wear. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5(2), 87-101.

- [41] **Dawson S.**, (2008). SinterCast, Sweden. Compacted graphite iron – A material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads. Pp.243-244 overseas foundary.
- [42] **Souza, J. V. C., Nono, M. D. C. D. A., Silva, O. M. M., & Ribeiro, M. V.** (2008, October). Comparative study on turning CI and CGI using silicon nitride cutting tools. In Materials Science Forum (Vol. 591, pp. 572-577).
- [43] **Dawson J.V., E. R. E.** (1974). Compacted graphite irons produced by magnesium additions. BCIRA Journal;22. p: 136-44
- [44] **Heck, M., Ortner, H. M., Flege, S., Reuter, U., & Ensinger, W.** (2008). Analytical investigations concerning the wear behaviour of cutting tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 26(3), 197-206.
- [45] **Nayyar, V., Grenmyr, G., Kaminski, J., & Nyborg, L.** (2013). Machinability of compacted graphite iron (CGI) and flake graphite iron (FGI) with coated carbide. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 13(1), 67-90.
- [46] **Nayyar, V., Kaminski, J., Kinnander, A., & Nyborg, L.** (2012). An experimental investigation of machinability of graphitic cast iron grades; flake, compacted and spheroidal graphite iron in continuous machining operations. Procedia CIRP, 1, 488-493.
- [47] **Mohammed, E. S. M.** (2011). The Effect of Compacted Graphite Iron Microstructure on Fracture and Machining.
- [48] **Mohammed, W. M., Ng, E., Elbestawi, M.** (2011). Modeling the effect of the microstructure of compacted graphite iron on chip formation. International Journal of Machine Tools and Manufacture;51,10. p: 753-65.
- [49] **Ernst H., and Merchant M.E. (1941)**, "Chip formation, friction, and high quality machined surfaces, surface treatment of metals", American Society of Metals, 299-378
- [50] **Merchant M. E. (1945)**, "Mechanics of the metal cutting process, I. orthogonal cutting and a type 2 chip", Journal of Applied Physics, 16, No. 5, 267-275

- [51] **Ernst H.** (1937), "Physics of metal cutting", Machining of Metals, American Society for Metals, 24
- [52] **Oxley, P. L. B.** (1961). A strain-hardening solution for the "shear angle" in orthogonal metal cutting. International Journal of Mechanical Sciences, 3(1-2), 68-79.
- [53] **Oxley, P. L. B., & Hatton, A. P.** (1963). Shear angle solution based on experimental shear zone and tool-chip interface stress distributions. International Journal of Mechanical Sciences, 5(1), 41-55.
- [54] **Nakayama, K., Arai, M., & Takei, K.** (1983). Semi-empirical equations for three components of resultant cutting force. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 32(1), 33-35.
- [55] **Endres, W. J., DeVor, R. E., & Kapoor, S. G.** (1993). A Dual-Mechanism Approach to the Prediction of Machining Forces: Part 1-Model Development and Calibration. ASME-PUBLICATIONS-PED, 64, 563-563.
- [56] **Chandrasekharan, V., Kapoor, S. G., & DeVor, R. E.** (1995). A mechanistic approach to predicting the cutting forces in drilling: with application to fiber-reinforced composite materials. Journal of engineering for industry, 117(4), 559-570.
- [57] **Klamecki, B.** (1973). Incipient chip formation in metal cutting a three dimensional element analysis. Urbana-Champaign, University of Illinois.
- [58] **Usui E., and Shirakashi T.,** (1982), "Mechanics of machining - from descriptive to predictive theory", On the Art of Cutting Metals - 75 Years Later, A Tribute to F W Taylor Presented at the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Phoenix, AZ, USA, ASME, 7, 13-35
- [59] **Shirakashi T., and Usui E.,** (1974), "Simulation of orthogonal cutting mechanism", Proceedings of International Conference of Production Engineering, Tokyo, Japan, 535
- [60] **Stevenson, M. G., Wright, P. K., & Chow, J. G.** (1983). Further developments in applying the finite element method to the calculation of temperature distributions in machining and comparisons with experiment. Journal of Engineering for Industry, 105(3), 149-154.

- [61] **Tay, A. O., Stevenson, M. G., & Davis, G. D. V.** (1974). Using the finite element method to determine temperature distributions in orthogonal machining. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 188(1), 627-638.
- [62] **Lajczok M.R.** (1980), "A Study of some aspects of metal machining using finite element method", Ph.D. Thesis, North Carolina State University
- [63] **Okushima K., and Kakino Y.** (1971), "The residual stress produced by metal cutting", Annals of CIRP, 20, 1, 13
- [64] **Okushima K., and Kakino Y.** (1972), "A study on the residual stress produced by metal cutting", Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University, 34, Copyright 1973, IEE, 234-248
- [65] **Natarajan R., and Jeelani S.,** (1983), "Residual stresses in machining using finite element method", Computers in Engineering 1983, Proceedings of the 1983 International Computers in Engineering Conference and Exhibit, Chicago, IL, USA, ASME, 3, 79-80
- [66] **John S. S., and Carroll J.T.,** (1986), "An orthogonal metal cutting model based on an Eulerian finite element method.", Proceedings of the 13th NSF Conference on Production Research and Technology, Manufacturing Processes, Machines and Systems
- [67] **Carroll J.T. III.** (1986), "A numerical and experimental study of single point diamond machining", Ph.D. Thesis, North Carolina State University
- [68] **Strenkowski J. S., and Carroll J. T. III,** (1984), "Finite element model of orthogonal metal cutting", High Speed Machining Presented at the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, New Orleans, LA, USA, ASME, 12, 157-166
- [69] **Ceretti E.A, Fallböhmer P.B, Wu W.T.C, and Altan T.b.** (1996), "Application of 2D FEM to chip formation in orthogonal cutting", Journal of Materials Processing Technology 59, 1-2, 169-180
- [70] **Marusich T.D., and Ortiz M..** (1995), "Modeling and simulation of high-speed machining", International journal for numerical methods in Engineering, 38, 3675-3694
- [71] **Maekawa K.,** (1999), "Application of 3D machining modeling to cutting tool design", Proceedings of IInd CIRP Int'l workshop modeling of machining operations, Nantes, France

- [72] **Wayne S.F., Zimmerman C., and O'Neil D.A.**, (1993), "Aspects of advanced cutting tool and chip-flow modeling ", Proceedings of the 13th International Plansee Seminar, Reutte, Metallwerk Plansee, 2, 64
- [73] **Zerilli, F. J., & Armstrong, R. W.** (1987). Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations. *Journal of Applied Physics*, 61(5), 1816-1825.
- [74] **Bodner, S., & Partom, Y.** (1975). Constitutive equations for elastic-viscoplastic strain-hardening materials. *Journal of Applied Mechanics*, 42(2), 385-389.
- [75] **Johnson, G. R., & Cook, W. H.** (1983, April). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics* (Vol. 21, pp. 541-547).
- [76] **Bernstein, M. L., Zaimovski, V. A.** (1983) "Mechanical Properties of Metals", MIR Publishers, Moskova.
- [77] **Özcan Z.S., Sökmen K.F., Güner A., Akbaba U., Yazıcı M.** (2014) Yolcu koltuklarının sonlu elemanlar analizlerinde, elastik plastik malzeme modeli ile Johnson Cook Malzeme Modelinin karşılaştırılması ve test sonuçları ile doğrulanması.
- [78] **Holmquist, T. J., & Johnson, G. R.** (1991). Determination of constants and comparison of results for various constitutive models. *Le Journal de Physique IV*, 1(C3), C3-853.
- [79] **Li, H. Y., Wang, X. F., Duan, J. Y., & Liu, J. J.** (2013). A modified Johnson Cook model for elevated temperature flow behavior of T24 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 577, 138-146.
- [80] **Ghodrat, S.** (2013). Thermo-mechanical fatigue of compacted graphite iron in diesel engine components. TU Delft, Delft University of Technology.
- [81] **Huang, X., Zhu, J., & Hu, W.** (2012) "Identification of johnson-cook constitutive model parameters for hight strain rate deformation.", 15th International Conference on Experimental Mechanics, paper ref: 3071
- [82] **Malakizadi, A., Sadik, I., & Nyborg, L.** (2013). Wear mechanism of cBN inserts during machining of bimetal aluminum-grey cast iron engine block. *Procedia CIRP*, 8, 188-193.

- [83] **L. Mercier, K. Watremez, M. Guerin, J. D. Fouillaud, L., & Dubar, L.** (2013). Thermo-mechanical behaviour of spheroidal graphite iron in the austenitic phase. In Congrès Français de Mécanique (21; 2013; Bordeaux).
- [84] **Springer, H. K.** (2012). Mechanical Characterization of Nodular Ductile Iron (No. LLNL-TR-522091). Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA.
- [85] **Torsten Sjögren:** "Influences of the Graphite Phase on Elastic and Plastic Deformation Behaviour of Cast Irons", Ingenjörshögskolan i Jönköping, Linköping Studies in Science and Technology, Dissertations no. 1080

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Selçuk Keser
Doğum Tarihi ve Yeri : 30 Haziran 1986
E-posta : selcukkeser@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği