



## Bir Yüksek Karbonlu Toz Metal Çeliğin Östemperlenmesi Üzerine Bir Çalışma

### A Study on Austempering a High Carbon Powder Metal Steel

Onur ALTUNTAŞ<sup>1</sup>, Ahmet GÜRAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makin ve Metal Teknolojileri. Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 06/05/2017

Kabul/Accepted: 06/09/2017

Son Versiyon/Final Version: 26/12/2017

#### Öz

Bu çalışmada NC100.24 saf demir tozlarına ağırlıkça %1,5 oranında doğal grafit tozları ilave edilerek sade yüksek karbonlu çelik toz metalurjisi numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan karışım oda sıcaklığı, 100°C ve 200°C sıcaklıkta ve 700 Mpa presleme basıncında tek eksenli preslendikten sonra 1150°C de atmosfer kontrollü fırında sinterlenmiştir. Ardından östemperleme ısıl işlemi için numuneler 950°C de östenitlenip 300 °C sıcaklıktaki tuz banyosunda 30 dakika süre ile östemperleme işlemine tabi tutulmuştur. Isıl işlem sonrası gerçekleşen yapı dönüşümleri optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda presleme işlemleriyle yoğunlaşma oranının sertlik ve beynitik dönüşümlere etkileri çalışılmıştır. Yüksek carbonlu toz metal malzemelerin yoğunluklarının artırılmasıyla, beynitik yapı dönüşümleri geliştirilmiş ve sertlik değerleri etkili bir şekilde artırılmıştır.

#### Anahtar Kelimeler

“toz metal çelik, östemperleme, sinterleme, mikroyapı”

#### Abstract

In this study, 1.5% by weight of natural graphite powders were added to NC 100.24 pure iron powders to obtain plain high carbon steel powder metallurgy specimens. After respectively uniaxial pressing at room temperature, 100 °C and 200 °C and under 700 MPa pressing pressure, the specimens were sintered in an atmospheric controlled furnace at 1150 ° C. The spec,mens were then austenitized at 950 ° C for half an hour in a salt bath at 300 ° C for austempering heat treatment. The structure transformations after the heat treatment were examined using optic microscope. Through pressing processes at different temperatures, the effects of densification rate on the hardness and bainitic transformation were investigated. It was seen that by increasing the density of high carbon powder metal materials, the bainitic structure transformation was improved and thus hardness value was effectively increased.

#### Key Words

“powder metal steel, austempering, sintering, microstructure”

## 1.GİRİŞ

Ötektoid dönüşüm sıcaklıklarından östenitin perlit ve martensite dönüşümü sıcaklıkları arasında eşsiz bir mikroyapı oluşmaktadır. Bu ara sıcaklıklarda oluşan yapı perlit ve martensitten çok farklı mekanik özellikler göstermekte olup, “beynit” olarak adlandırılmıştır (Krauss, 2005) Beynit tanım olarak, ferrit ve lamelli olmayan sementitin ( $Fe_3C$ ) karışımından oluşan oldukça tok ve sünek bir yapıdır (Smith,2000). Beynit, izotermal dönüşüm diyagramlarına göre perlit burnunun altında izotermal sıcaklıkta östenitin dönüşümü sonucu oluşan bir yapıdır. Östenitin bozunması sırasında soğuma difüzyon kontrollüdür ve bu esnada perlitin oluşmasına imkân yoktur. Ayrıca soğuma yeterli miktarda yavaş olduğu için martensit oluşumunu da engellemektedir (Caballero vd. 2002:279) Şekil 1.'de verilen Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) diyagramında perlit ve martensit oluşum sıcaklıkları arasında beynit oluşumu için gerekli olan soğutma ve izotermal bekleme koşulları görülmektedir (Krauss, 2005). Östemperleme, özellikle belirli seviyelerde sertliğe rağmen süneklik ve darbe dayanımını artırmak ve su verme esnasında oluşan çatlakların azaltılması için geleneksel su verme temperleme ısı işlemlerine alternatif bir ısı işlemidir. Östemperleme özellikle kalın kesitli sade karbonlu çeliklerin yaklaşık 50 HRC sertlikte mükemmel tokluk ve süneklik sağlayan bir ısı işlemidir. Sade karbonlu çeliklerde alt beynit yaklaşık  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' nin altındaki sıcaklıklarda oluşur. Düşük sıcaklıklarda  $250\text{-}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' ler arasında difüzyon hızının düşük olmasından dolayı alt beynit içerisindeki sementit ferrit plakalarının içerisinde çökler. Alt beynitin oluşmasındaki mekanizma, martensitin oluşması ve temperlenmesiyle oluşan mekanizmaya benzerlik göstermektedir. Bu mekanizma, kayma işlemi ile östenitten aşırı doymuş ferritin oluşması ve ardından ferrit içerisinde sementitin çökmesidir (Smith,2000)

Meng Yin Tu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada (Meng Yin Tu vd 2007) aynı sertliğe sahip temperlenmiş martensitik yapının ve alt beynitik yapının mekanik özellikleri karşılaştırılmış olup, alt beynitik yapının sünekliği ve tokluğu temperlenmiş martensite göre çok daha yüksek olduğu ortaya konmuştur. Aynı çalışmada gözlenen başka bir durum ise, alt beynitik yapıda hasarı oluşturan çatlak taneler arası ilerlerken, temperlenmiş martensitik yapıda ise tane içinden ilerlediğidir. Nedeni ise temperleme sırasında karbürlerin tane sınırlarında çökmesi olarak gösterilmiştir.

Chakraborty ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada ise (Chakraborty vd 1999) SAE 52100 rulman çeliğinin uygun östemperleme sıcaklığında tutulup daha sonra su verilmesiyle beynitik ve martensitik olmak üzere karışık içyapıya sahip çeliklerin sadece temperlenmiş martensitik yapıyla karşılaştırıldığında mekanik özellikleri olan çekme ve darbe dayanımında iyileşme görülmüştür.

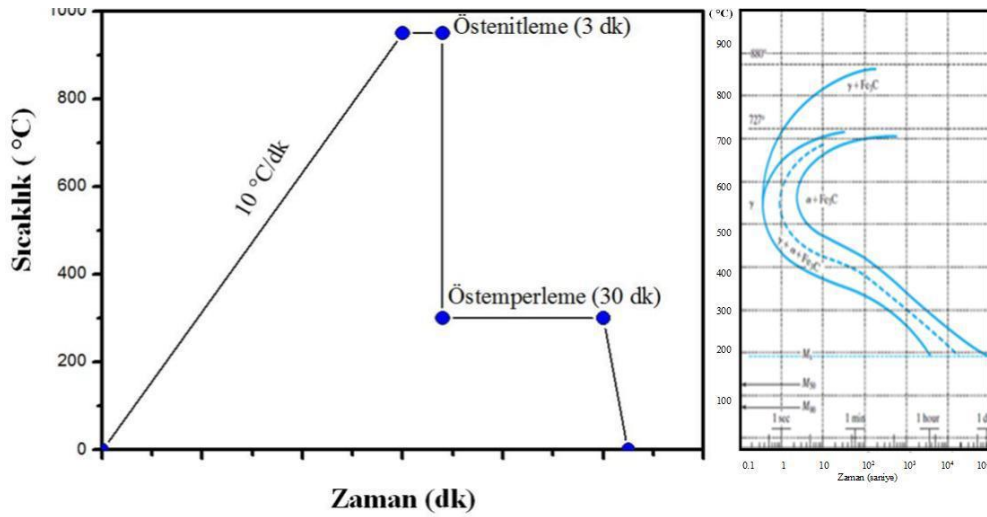
Kumari ve arkadaşlarına göre östemperleme ısı işleminin sıcaklığının artışıyla aşınma oranının arttığı bulunmuştur. C oranının artışı ve buna bağlı olarak karbür oranının artması aşınma hızını ve oranını azaltıcı yönde etki yapmaktadır (Kumari ve Rao, 2009:1082) Çeliklerde beynitik yapılar, geniş çapta dayanım ve süneklik sunmaktadır. Yüksek karbonlu alt beynitik mikroyapıya sahip bir çelik; 1400 MPa çekme dayanımına ve 55 HRC sertliğe ulaşabilmektedir. Bu dayanımlar, ince ferrit plakalarına, yüksek dislokasyon yoğunluğuna ve ince sementit dağılımları ile elde edilir. Dönüşüm sıcaklığı düşüktüğü, beynitik ferrit daha ince karbür dağılımına sahip olur. Bu durumda beynitik ferrit daha yüksek sertlik ve dayanım sağlamaktadır. Su verilmiş ve temperlenmiş çelikler ile kıyaslandığında, östemperlenmiş çelikler benzer sertlik ancak daha yüksek tokluk sergilemektedir. Su verme sonrası oluşan martensit oldukça sert ve kırılındır. Bu nedenle su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerin tokluğu östemperlenmiş çeliklere göre oldukça düşüktür.

Beynitik çeliğin mikroyapısı, çeliğin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Araştırmacılar (Krauss, 2005 , Smith,2000, Callister vd,2007, Bhadeshia vd 2006),üst beynitik mikroyapıya sahip bir çeliğin alt beynitik çelik ile kıyaslandığında daha düşük tokluk ve sünekliğe sahip olduğunu bildirmektedir (Krauss, 2005).

Bu çalışmada, genellikle içerdikleri gözenek ve yetersiz sinterlemeden dolayı düşük mekanik özelliklere sahip yüksek karbonlu toz metal çeliklere farklı sıcaklıklarda presleme sonrası östemperleme ısı işlemlerinin uygulanmasıyla özellikle yoğunluk/sertlik özelliklerinin geliştirilebileceği amaçlanmıştır.

## 2.MATERYAL METOT

Çalışmada kullanılan yüksek C'lu TM malzemesinin üretiminde NC 100.24 (Höganäs AB) saf demir tozları içerisinde ağırlıkça % 1.5 oranında doğal grafit tozu ilave edilmiştir. Hazırlanan bu karışım tozları 700 MPa basınç altında oda sıcaklığında, 100 ve  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  tek eksenli pres ile şekillendirilmiş,  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  de atmosfer kontrollü fırında sinterlenerek toz metal numuneler üretilmiştir. Sinterleme öncesi ve sonrası numunelerin yoğunlukları hassas terazi ve elektronik kumpas kullanılarak matematik hesaplamalarla ölçülmüş ve grafik olarak sunulmuştur. Sinterlenen numuneler  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  de 3dk östenitlendikten sonra %50  $KNO_3$  ve %50  $NaNO_3$  tuz banyosunda  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  de 30 dk süre ile östemperleme ısı işlemi uygulanmıştır. Östemperleme ısı işlem çevriminin şematik özeti Şekil 1'de gösterilmiştir.

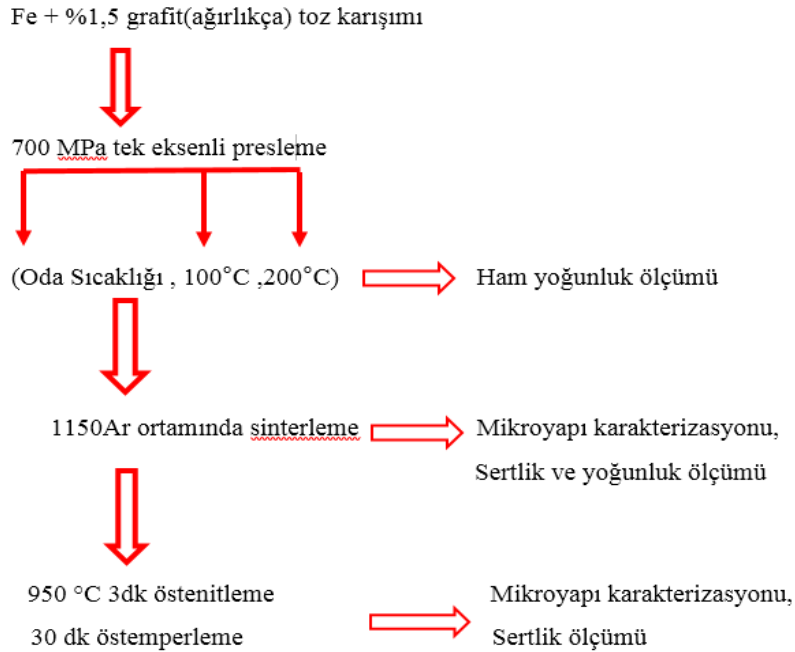


Şekil 1: Östempereleme ısıl işleminin şematik gösterimi ve ötektoid üstü bir ZSD diyagramı (Shackelford, 2016)

Üretilen bu numunelerde mikroyapı incelemeleri için zımpara ve parlatma işleminin ardından %2 Nital ile dağlanmıştır. Numunelerin ısıl işlem öncesi ve sonrası makro sertlikleri Vickers sertlik ölçümleri Shimadzu Sertlik cihazında 2 kg yük kullanılarak, her bir numune için en az 5 farklı noktadan sertlik değeri alınarak ortalama HV2 değerleri tespit edilmiştir. Yukarıda anlatılan deney numunesine ait akış şeması Şekil 2 de şematik olarak gösterilmiştir.

### 3.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

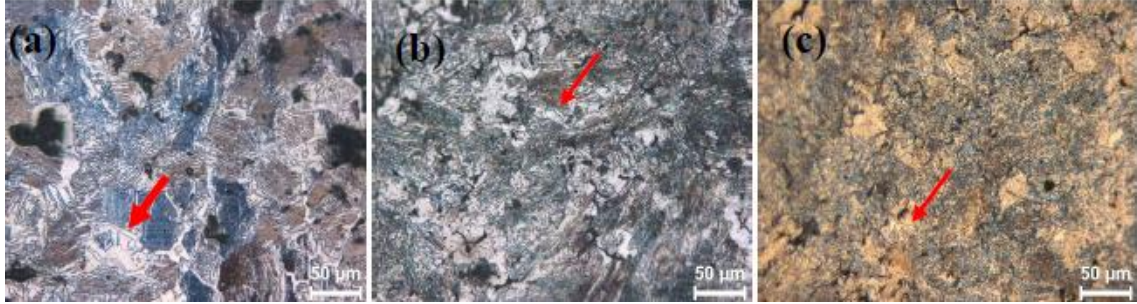
Şekil 3’de sırasıyla oda sıcaklığı, 100 ve 200° C sıcaklıkta tek eksenli presleme ile şekillendirilen 1150 °C de Ar ortamında sinterlenmiş numunelerin mikroyapıları sırasıyla verilmiştir. Mikroyapılardan görüldüğü gibi sinterleme sonrası tüm numunelerde beklenen birincil sementit (ok ile gösterilmiş) ve perlit lamelleri görülmektedir. Ancak toz metal parçalarda tam yoğunluğa ulaşmak için uygulanan sıcaklık ile birlikte presleme sonrası mikroyapıdaki gözeneklerin önemli oranda azaldığı görülmektedir. Pek çok mühendislik malzemesinde artan sıcaklıkla beraber düşen akma dayanımı ve sertlikten dolayı plastik deformasyon kolaylaşır. Bu da preslenmeye olan direnci azaltacağından geleneksel toz metalürji malzemelerinde yüksek yoğunluğa ulaşabilmek için tercih sebebidir (Süleyman Sarıtaş vd.2009).



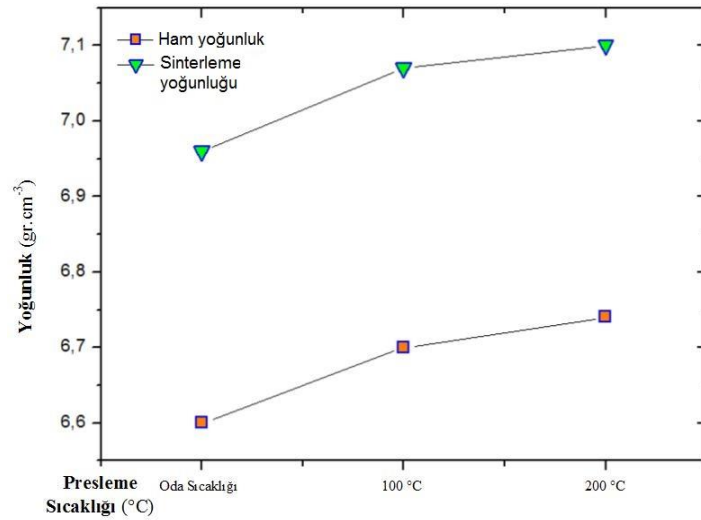
Şekil 2: Çalışmada gerçekleştirilen işlem akış şeması

Sıkıştırma kalıbının ısıtılması ile preslenen numunelerin artan presleme sıcaklığı ile hem ham yoğunluklarında hem de sinterleme sonrası yoğunluklarında artış görülmüştür. Sıcak presleme, gerilme destekli yoğunlaşmanın bir ifadesi olup sıcak presleme

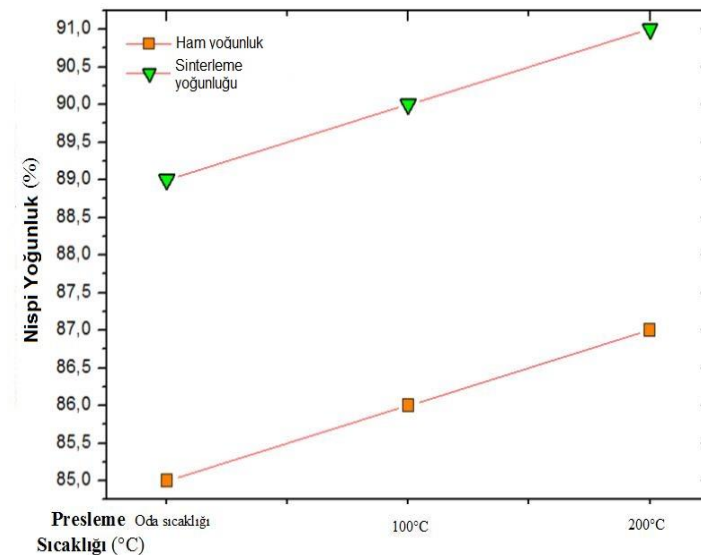
sırasında ilk yoğunlaşma, parçacıkların yeniden düzenlenmesi ve parçacık temas noktalarındaki plastik akış ile olur. Etkili gerilme kendiliğinden akma gerilmesinin altına düştüğünde daha fazla yoğunlaşma meydana gelmektedir (Süleyman Sarıtaş vd.2009). En yüksek yoğunluk değeri 200°C sıcaklıkta preslenip sinterlenen numunede elde edilmiş olup ham yoğunluk ve tam yoğunluk değerleri sırasıyla 6,74 gr/cm<sup>3</sup> ve 7,1 gr/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Şekil 4’de numunelerin yoğunluk değerleri grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 5’te numunelerin nispi yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Bu değerlere göre 200°C sıcaklıkta preslenip sinterlenen numunenin yaklaşık % 91 teorik yoğunluğa ulaştığı görülmektedir. Şekil 3’deki sinterleme sonrası mikroyapılar incelendiğinde yoğunluk artışının mikroyapıdaki mevcut gözenek/boşlukları küçülttüğü söylenebilir.



Şekil 3:Farklı sıcaklıklarda (a) Oda sıcaklığı, (b) 100°C, (c) 200°C) preslenmiş ve 1150 °C’de sinterlenmiş numunelere ait optik mikroyapılar

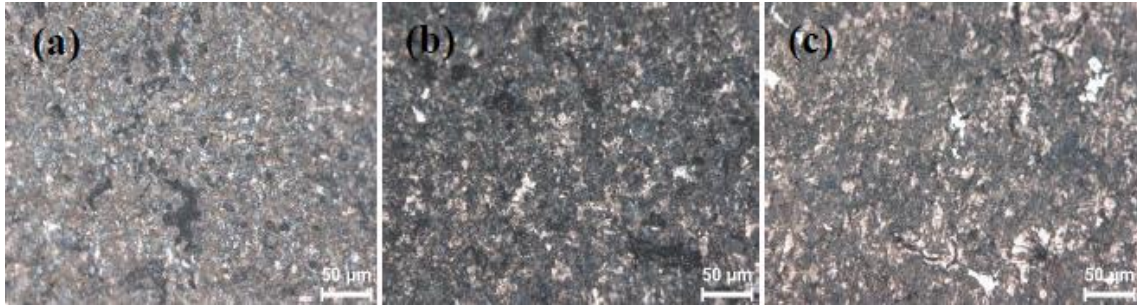


Şekil 4: Presleme ve sinterleme sonrası numunelerin yoğunluk grafiği



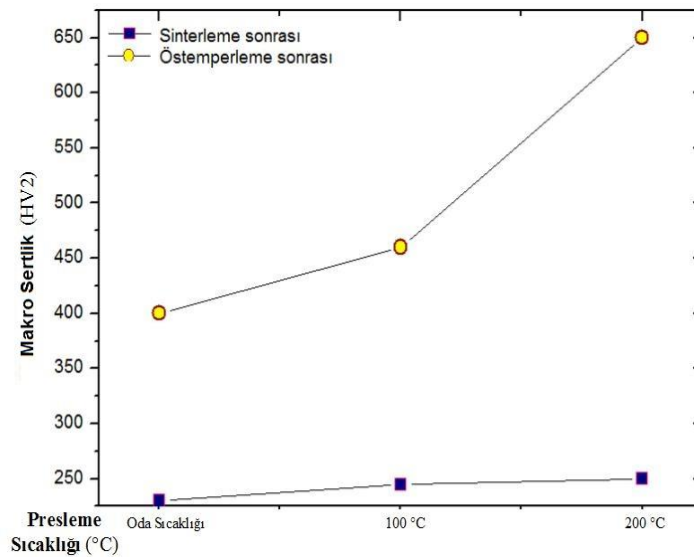
Şekil 5: Presleme ve sinterleme sonrası numunelerin nispi yoğunluk grafiği

Şekil 6’te ise 300°C tuz banyosunda 30 dk süre ile östemperlenmiş numunelerin mikroyapıları görülmektedir. Östemperleme ısı işlemi sonucu izotermal dönüşüm oluşurken mikroyapıda kısmen beynitik yapıların oluştuğu görülmektedir. Bununla beraber, kısmen ferritik alanlar da görülmektedir. Numunelerin tamamında ferritik alanların görülmesinin muhtemel nedeninin sinterlemeden kaynaklı dekarburizasyon olduğu düşünülmektedir. Bu alaşımın 30 dk süre östemperleme işlemi ile izotermal dönüşüm ile beynitik yapıları iğnemsî morfolojisinde olduğu görülmektedir. Muhtemelen bu sürede kısmen martensitik yapılarda oluşmuş olabilir. İğnemsî yapılar, kısa süreli östemperleme ısı işlemi ile oluşmuştur.



Şekil 6: (a) Oda sıcaklığında, (b) 100°C, (c) 200°C sıcaklıkta preslenip sinterlenmiş numunelerin östemperleme sonrası mikroyapıları

Şekil 7’deki grafikte numunelerin HV2 makro sertlik değerleri görülmektedir. Tozların sıcaklık ile birlikte preslenmesi ile elde edilen yoğunluk değerleri farklılık göstermiş ve bu yoğunluk farklılıklarının da sertliğe etki eden faktörlerden olduğu düşünülmektedir. Şekil 7’den görüldüğü gibi farklı sıcaklıklarda preslenmiş toz metal çeliklerin sinterleme sonrası (Brincil sementit+perlitik mikroyapılı) numunelerde sertlik önemli oranda değişmezken 300 °C tuz banyosunda 30dk süre izotermal tavlama ile numunelerde meydana gelen mikroyapısal değişimlerden dolayı ısı işlem sonrası sertlik değerleri önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu sonuç üretilen toz metal çeliklerinin yoğunluklarının östemperleme ısı işlemlerinde olduğu gibi izotermal dönüşüm sırasında östenitten üretilen ferrit ana yapıda yeni mikro fazların çökmesi kinetiğini hızlandırdığı anlaşılabilir. Diğer bir ifade ile izotermal dönüşümle beynit dönüşüm oranı yüksek yoğunluklu toz metal çeliklerde daha fazla olmaktadır. Östemperleme ısı işlemi uygulanan malzemede matris yapıdaki beynit oranı arttıkça numunelerin sertliğinde bir artış görülmekte olduğu bildirilmiştir(Ovalı, vd.2011) Bu çalışmada en yüksek sertlik değeri 200 °C sıcaklıkta 700 MPa basınç altında preslenip 1150°C sıcaklıkta sinterlenen, 7,1 g.cm<sup>-3</sup> yoğunluğa ve % 91 nispi yoğunluğa sahip numunelerde 300°C sıcaklıkta 30 dk süre ile izotermal sonrasında yaklaşık 650 HV2 olarak elde edilmiştir. Bu yüksek sertlik değerleri de toz metal çeliklerde yüksek aşınma ve tokluk direnci sağlanabileceğini gösterdiğinden özellikle yatak malzemeleri gibi ürünlerin geliştirilmesinde östemperleme ısı işlemlerinin uygulanabileceğini göstermektedir.



Şekil 7: Sinterleme ve östemperleme sonrası numunelerin sertlik grafiği

#### 4.SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlara göre 200°C sıcaklıkta ılık preslemenin en yüksek yoğunluk değerini (7,1 gr/cm<sup>3</sup>) verdiği belirlenmiştir. 300 °C tuz banyosunda 30dk süre izotermal tavlama ile iğnemsiz beyritik yapının oluştuğu ve bu mikroyapıdaki numunenin 650 HV2 makro sertlik değeri belirlenmiştir. İzotermal tavlama süresinin ve yoğunluklarının daha da artırılması ile beyritik dönüşümlerin artacağı ve böyle yüksek karbonlu toz metal çeliklerin mekanik özelliklerinin önemli oranda geliştirileceği düşünülmektedir.

#### REFERANSLAR

- Bhadeshia, H.K.D.H., Honeycombe, R. (2006). Steels: Microstructure and Properties, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, USA,
- Caballero, F.G., Bhadeshia, H.K.D.H., Mawella, K.J.A., Jones, D.G., Brown, P. (2002). Very Strong Low Temperature Bainite, Materials Science and Technology, 18(3): 279-284.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G. (2007). Materials Science and Engineering: An Introduction, Wiley, New York, USA,
- Chakraborty, J., Bhattacharjee, D. and Manna, I.(1999), Scientific Services and Research and Development, Tata Steel, Jamshedpur 831 001, Jharkhand, India.
- Krauss, G. (2005) Steels: Processing, Structure, and Performance, ASM International.
- Kumari, U. R., Rao P. P(2009) "Study of wear behaviour of austempered ductile iron", J Mater Sci, 44:1082–1093,
- Meng Yin Tu, Cheng-An Hsu, Wen-Hsiung Wang, Yung Fu Hsu, (2007.) Comparison of microstructure and mechanical behaviour of lower bainite and tempered martensite in JIS SK5 steel. Elsevier
- Ovalı, İ. Mavi, A. (2011)., "Ösferrit Hacim Oranın Çift Fazlı Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi" 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ,
- Randall M. G. (2007) Çeviri Editörleri., Sarıtaş S. vd Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, (Kitap), Ankara,
- Shackelford, James F. (2016). *Introduction to Materials Science for Engineers (8th Ed.)*, England, Pearson Education Limited
- Smith W.F. (2000) (Çev.: Erdoğan, M.) Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Nobel Yayın, Ankara.



Vardiya çizelgeleme problemleri bazı kısıtlar altında, çalışan personellerin görev dağıtımından oluşmaktadır. Bu kısıtları birbiriyle uyumlu bir biçimde yürütmek zor bir iştir. Temel kısıtlar ayrı ayrı değerlendirilip birbirleriyle çakışmaması sağlanmalıdır. Çizelgeleme hazırlanırken personellerin çalışma tercihleri, izin günleri, hafta sonları çalışma günleri ve yıllık tatil dönemleri gibi hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada vardiya çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Çalışmada güvenlik görevlilerinin aylık çalışma çizelgesi yapılmış ve işgücü minimize edilmeye çalışılmıştır. Çizelgelemeyi yaparken çalışanların sayıları, cinsiyetleri ve çalıştıkları bölümleri aynı anda değerlendirerek çizelgeleme oluşturulmuştur. Kırıkkale Üniversitesi güvenlik görevlilerinin vardiya çizelgelemesi, ilgili bölüm amiri tarafından yapılmaktadır. Uygulanmakta olan planda sözleşmeli erkek güvenlik görevlisi sayısı 81, kadrolu erkek güvenlik görevlisi sayısı 60 ve sözleşmeli kadın güvenlik görevlisi sayısı 9 olup toplamda 150 güvenlik görevlisi çalışmaktadır. Bu çalışmada problem hedef programlama yöntemi ile çözülmüştür ve Kırıkkale Üniversitesi Güvenlik Müdürlüğünde uygulanmıştır.



Yapılan çalışmanın planı şu şekildedir: Çalışmanın ikinci bölümünde vardiya çizelgeleme konusu, üçüncü bölümünde hedef programlama, dördüncü bölümünde literatür araştırması, beşinci bölümde yapılan uygulama anlatılmış ve altıncı bölümde de yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir.

## 2. VARDİYA ÇİZELGELEME

Vardiyalı çizelgeleme, başlangıç ve bitiş saatlerinin işletmenin yapısına ve faaliyet gösterdiği işkoluna göre değişiklik gösteren işgücünü, maliyetleri minimize ederek, maksimum fayda elde etmeyi amaçlayan bir sistemdir. İş günü genellikle sabah, akşam ve gece vardiyası olarak bölümlendirilir (Yüksel, 2004).

Vardiya çizelgeleme problemleri bir kurum veya kuruluşta çalışan personellerin belirlenmiş olan vardiyalara kurumun çalışma koşullarını yansıtarak düzenli ve sistemli bir çalışma planı oluşturmaktır. Bu çizelgelerde bazen çalışan personellerin özel izin ve istekleri yerine getirilerek, bazen de personelleri uzman oldukları iş kollarına atayarak çalışma planlarına ek olarak değerlendirilebilmektedir. Vardiyalı çalışma sistemi, kamu ve özel sektörde olmak üzere birçok yerde kullanılmakta olan bir sistemdir (Varlı ve Eren, 2016). İş gücünün planlı bir şekilde teknolojik yeniliklere uyum sağlayarak kullanılmasıyla verimli sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Etkili bir vardiya planından insanların fiziksel ve zihinsel sağlığı üzerindeki kötü faktörleri minimize etmesi ve performans açısından da maksimum değerde fayda sağlanması beklenir.

Vardiya Çizelgeleme konusunda ilk olarak George Bernard Dantzig (1954) yılında çalışmıştır. Amacı her grup için maliyeti minimize ederek, gerekli personel ihtiyacını sağlamaktır. Vardiya çalışması güvenlik, ulaşım, iletişim ve sağlık endüstrisi gibi hizmet ya da üretimin ekonomik ve kamusal açıdan sürekliliği olan alanlarda tercih edilen bir sistemdir. Vardiya planlaması problemlerinin çözümünde kullanılan çok fazla yöntem vardır. Bunlardan bazıları, tam sayılı programlama, hedef programlama, dinamik programlama ya da sezgisel programlama yöntemleridir. Bu çalışma da hedef programlama yönteminden yararlanılmıştır.

## 3. HEDEF PROGRAMLAMA

Hedef programlama çalışmalarının ilki Charnes vd. (1965) yılında gerçekleşmiştir. Charnes ve Cooper (1961) yılında ise hedef programlamayı geliştirmeye çalışmışlardır.

Hedef programlama çok kriterli karar verme tekniklerinden bir tanesidir. Bu yöntem de amaç fonksiyonun maksimizasyonu ya da minimizasyonu yerine var olan kısıtlarla belirlenen hedeflerden sapma değişkenleri minimize yapılmaya çalışılmaktadır. Yani hedef programlamada sorunun amacı, sapmayı ifade eden değişkenlerin toplamının minimize edilmesidir

Sapma değişkenleri hedef programlamada genellikle  $d_i^+$  ve  $d_i^-$  simgesiyle gösterilir. Sapma değişkenleri negatif değerli olmazlar ve bir hedefin hem üstünde hem altında bir anda olunamayacağından, bunlardan birinin değeri de daima 0 olur. Hedef kısıtlayıcılarına bağlı olarak sapma değişkenleri istenen veya istenmeyen değişken olarak da adlandırılabilir. Hedef programlama her amacın verilen hedeflere mümkün olduğunca ulaşmasını amaçlar ve hedefteki sapmaları minimize etmektir (Ignizio, 1985).

Matematiksel gösterimi şu şekildedir;

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^t (d_i^+ + d_i^-)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j + d_i^+ + d_i^- = k_i$$

$$d_i^+ * d_i^- = 0$$

$$x_j, d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i=1...t \quad j=1...n$$

Değişkenler

$x_j$ : j. Karar değişkeni

$w_{ij}$ : i. hedefin j. karar değişkeni katsayısı

$k_i$  : i. hedef için ulaşılmak istenen değer

$d_i^+$  : i. hedefin pozitif sapma değişkeni

$d_i^-$  : i. hedefin negatif sapma değişkeni

#### 4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Vardiya çizelgeleme ile ilgili birçok farklı sektörde çalışma bulmak mümkündür. Çalışmaların büyük bir bölümü sağlık sektöründe hemşire çizelgeleme konusunda yapılmış olsa da özel şirketlerde, fabrikalarda ve devlette çalışan personeller için de farklı iş disiplinleri kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Vardiya çizelgeleme ile ilgili yapılmış birtakım çalışmalara aşağıda değinilmiştir.

Segal (1974), vardiya uzunluğuna dayanan çizelgeleme problemlerini, geliştirdiği şebeke diyagramı formülasyonu ile çözümlenmiştir. Keith (1979) vardiya çizelgeleme konusunda tam sayılı programlama modeli geliştirmiştir. Bu modelde işgücündeki eksiklik ve fazlalığa izin verilmiş buna göre çizelgelemede maliyeti minimize etmeye çalışmıştır. Özkarahan ve Bailey (1988) çalışmasında hem hastane için hem de hemşire isteklerini yerine getirmek için bir model oluşturmuştur. Günler ile saatler arasında bir esneklik oluşturulmuş ve hastanelerde uygulamaya koyulmuştur. Sowalter ve Mabert (1988) hemşire çizelgelemede farklı bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmasında vardiyanın başlama ve bitiş sürelerine esneklik sağlamışlardır. Ancak vardiya sürelerinin farklı olması hemşirelerin dinlenme zamanlarında problemler yaşamalarına sebep olmuştur. Burada amaç hemşire maliyetinin minimize edilmesidir. Aykin (1996) optimal vardiya planlaması için geliştirmiş olduğu tam sayılı matematiksel modeli bulanıklaştırarak farklı bir problem üzerinde uygulamıştır. Thompson (1996) çalışanların çalışma sürelerinin sınırlı olduğu durumlar için vardiya planlaması oluşturmuş ve çalışmasında vardiya uzunluğu, molalar, vardiya başlama ve bitiş zamanları konusunda fazlaca esnekliğe izin veren optimal vardiya çizelgesini oluşturmayı amaçlayan tam sayılı programlama modelini geliştirmiştir. Bard vd. (2003) ABD posta servisinde personel planlaması üzerine işgücünün en küçüklenmesini amaçlayarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Tam ve yarı zamanlı çalışanlarla tam sayılı modelleme yöntemini kullanarak problemi çözümlenmiştir. Topaloğlu ve Özkarahan (2004) çalışmalarında tur çizelgeleme problemini araştırmışlardır. Amaçları çalışanların istek ve ihtiyaçlarına yönelik bir çizelgeleme oluşturmaktır. Çözüm için Hedef programlama modelini önermişlerdir. Ernst vd. (2004) yaptıkları çalışmada personel çizelgeleme problemi üzerine yapılan çalışmaları uyguladıkları alanlara göre sınıflamıştır. Uygulama alanlarına göre çalışmaları, üretim finansal hizmetler, organizasyon yönetimi, çağrı merkezleri turizm hizmetleri, sağlık hizmetleri, lojistik sistemler, sivil hizmetler ve güvenlik ve acil hizmetler vb. gruplara ayırarak sınıflandırmıştır. Çözüm yöntemlerine göre ise; yapay zekâ, matematiksel modeller, sezgisel modeller (heuristik modeller), kısıt programlama, talep modelleme olarak sınıflandırmıştır. Ernst vd. (2004) Geçmişte yapılan çalışmalara göre 700'den fazla problemin modellerini ve çözümlerini incelemişlerdir. Moz ve Pato (2004) çalışmalarında Portekiz devlet hastanesinde hemşirelerin nöbet planlamasının çözümü için bir model oluşturulmuştur. Problem tam sayılı programlama yöntemi ile çözümlenmiştir. Azaiez ve Sharif, (2005) bu çalışmada anket metodunu kullanmışlardır ve bunun sonucuna göre hemşire ve hastanenin istekleri karşılanmaya çalışılmıştır. Riyadh Al-Kharj Hastanesinde 0-1 tam sayılı hedef programlama yaklaşımını kullanarak bir hemşire çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Çalışmada fazla mesai gibi durumları minimize etmeyi amaçlarken hemşirelerin istekleri de göz önünde bulundurulmuştur. Hemşirelerin tercihlerini öğrenmek için anket çalışması yapılmıştır. Hedef programlama modeli ile problemin çözümü sağlanmıştır. Seçkiner ve Kurt (2005) çalışmalarında belirli bir işçi, belirli zamanda, minimum maliyete göre çizelgenmiş ve farklı faktörleri de göz önünde bulundurulmuşlardır. Horn vd. (2007) yaptıkları çalışmada Avustralya Kraliyet Donanması için karakol botları ve mürettebatını çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Sungur (2008) çalışmasında güzellik salonu çalışanlarının çizelgelemesini yapabilmek için, her bir işçinin haftanın hangi günlerinde ve günün hangi saatlerinde çalışacağını belirlemiştir. Amaç, her bir çalışma günü ve saati için ihtiyaç duyulan işgücü sayısını minimum maliyetle karşılamak şartıyla, her bir tura atanacak işgücü sayısının belirlenmesidir. Bozbura vd. (2008) yaptıkları çalışmalarında kritik görevlerdeki işçilerin nöbet planlaması problemini incelemişlerdir. Üretim maliyetlerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Brunner vd. (2009) bir hastanede psikiyatr bölümünde çalışan doktorların vardiya çizelgeleme problemini araştırmışlardır. Amaç hastanenin maaş maliyetlerini minimize etmesidir. Günther ve Nissen (2010) çalışmalarında meta-sezgisel optimizasyon olan parçacık sürüm optimizasyonunu kullanmışlardır. Bu yöntemle vardiya çizelgeleme çalışmalarını geliştirebileceklerini düşünmüşlerdir. Oluşturdukları model ile bir lojistik şirketi çalışanlarına çizelgeleme yaparak uygulamaya koymuşlardır. Karaatlı (2010) çalışmasında hemşirelerin iş yoğunluklarına göre, bulanık çok amaçlı doğrusal bir model önerisinde bulunmuştur. Burke vd. (2010) çok fazla kısıttan oluşan hemşire çizelgeleme problemini değişken komşu arama algoritmasını tam sayılı programlama ile birleştirerek çok amaçlı melez bir model oluşturmuştur. Glass ve Knight (2010) çalışmalarında hemşireler için nöbet çizelgeleme problemini incelenmişlerdir.

Problemin çözümünde karışık tam sayılı programlama yöntemini kullanmışlardır. Ronnberg ve Larsson (2010) çalışmalarında bir hastane çalışanlarının vardiya planlaması konusunda bir matematiksel model geliştirilmiştir. Wright ve Bretthauer (2010) çalışmalarında hastanede çalışan hemşirelerin en verimli şekilde vardiya planlamasını oluşturmak için bir çözüm uygulamışlardır. Brunner ve Edenharter (2011) çalışmalarında bir hastanede çalışan personellerin çalışma çizelgesini hazırlamışlardır. Karışık tam sayılı programlama modeli kurarak sezgisel algoritma ile çözmüşlerdir ve hastanede uygulamaya konmuştur. Bağ vd. (2012) yaptıkları çalışmada hemşire çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Hedef programlamada ağırlıkları ANP ile belirlenmiştir. Kurulan model, Kırıkkale’de hizmet veren bir devlet hastanesinde uygulanmıştır. Çalışmanın sonunda mevcut durum ve sonuç kıyaslanmıştır, sonuçlar değerlendirilmiştir. Fırat ve Hurkens (2011) çalışmalarında tam sayılı programlama kullanmışlardır. Kıdeme göre farklı yetenek isteyen işleri o kişilere atayarak iş düzeni çizelgelemesi yapmışlardır. Li vd. (2012) çalışmalarında hedef programlama ile sezgisel yöntemleri bir arada kullanmıştır, hibrit bir yaklaşımla personel çizelgelemesi yapmışlardır. Labadi vd. (2014) çalışmalarında çok amaçlı hedef programlama kullanmışlar ve Banka Bilgi Teknolojileri personeli için çizelgeleme çalışması yapmışlardır. Öztürkoglu ve Çalışkan (2014) çalışmalarında hemşire çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Kurdukları modelin amacı, çizelgeleme boyunca hemşirelerin kendilerine tanınan esnek işe başlama saatlerinden yararlanarak istedikleri saatte işe başlamaları halinde elde edecekleri tatmini maksimize etmektir. Todovic vd. (2015) çalışmasında hedef programlama modeli kullanmıştır. Bosna Hersek’teki bir polis karakolu ele alınmış ve buradaki polis memurlarının vardiya çizelgelemesi üzerine çalışılmıştır. Ünal ve Eren (2016) yaptığı çalışmada nöbet çizelgeleme problemi üzerine çalışmıştır. Çalışanlardan ilk önce çalışamayacakları günleri belirlemeleri istenmiştir. Daha sonra kıdem seviyeleri göz önünde bulundurularak nöbet çizelgeleme yapılmıştır. Yağcıoğlu vd. (2016) çalışmasında bir kredi yurtlar kurumunda güvenlik görevlisi sayısının minimize edilmesi için vardiya çizelgeleme problemini ele almıştır. Varlı ve Eren (2017b) çalışmalarında bir fabrikada çalışan şeflerin iş gücü çizelgelemeleri için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Varlı vd. (2016a) raylı sistemlerde çalışan vatmanları birer ekip halinde ele alarak aylık çalışma planlarının düzenlenmesi için bir çalışma sunmuşlardır. Varlı vd. (2016b) Ankara M1 (Batıkent-Kızılay) hattında çalışan vatmanların tecrübelerine göre ihtiyaç duyulan iş gücünün karşılanması adına bir matematiksel model önermişlerdir. Varlı ve Eren (2017a) çalışmalarında Kırıkkale’de hizmet veren bir hastanede çalışan hemşirelerin vardiya planlarının adil bir şekilde yapılmasını sağlamışlardır. Şahiner vd. (2017) çalışmalarında hemşire çizelgeleme problemini ele almışlardır. Hemşirelere verilen kişisel izinler ve doğum izinleri gibi özel sebeplerle birlikte bir hedef programlama modeli sunmuşlardır. Özcan vd. (2017) çalışmalarında hidroelektrik santrallerinde çalışan personellerin aylık vardiya çizelgelerini işletmenin kuralları doğrultusunda planlamışlardır. Her bir vardiyaya belirlenen kıdem seviyelerine göre atamalar gerçekleştirmişler ve geliştirdikleri matematiksel model ile personellerin daha dikkatli ve konsantre bir şekilde çalışmalarını sağlamışlardır.

## 5. UYGULAMA

Bu çalışmada Kırıkkale Üniversitesi’nde çalışan güvenlik görevlilerin aylık çalıştıkları bölümlere adaletli ve dengeli bir şekilde atanması istenmiştir. Bu görevliler sözleşmeli erkekler ve kadınlar, kadrolu erkekler olmak üzere çalışma koşulları değerlendirilmiştir. Ek olarak bu sınıflandırmalara göre kişisel kısıtlarda kullanılmıştır. Güvenlik görevlilerinin çalıştıkları 19 bölüm ve 3 vardiya vardır. Çalıştıkları bölümler şu şekildedir: A giriş kapısı (AK), B giriş kapısı (BK), C giriş kapısı (CK), Tıp (TF), Diş Hekimliği (DHF), Mühendislik (MF), Güzel Sanatlar (GSF), Eğitim (EF), Fen Edebiyat (FEF), Veterinerlik (VF), Hukuk (HF), İktisadi ve İdari Birimler (İİBF), İslami İlimler (İİF) Fakülteleri, Beden Eğitimi Ve Spor Yüksekokulu (BESYO), Meslek Yüksek Okulu (MYO), Kütüphane (KTP), Öğrenci İşleri (Öİ), Rektörlük A (RA), Rektörlük B (RB) ve Kamera (KMR) yerleridir. Vardiya ise Sabah-S, Akşam-A, Gece-G olarak gösterilmiştir. Her bir vardiyanın saat dilimleri ise Sabah (08:00-16:00), Akşam (16:00-24:00), Gece (24:00-08:00).

Çalışmada oluşturulan matematiksel modellerde aşağıda verilen güvenlik görevlilerinin çalışma prensipleri kullanılmıştır.

Güvenlik Görevlilerinin Çalışma Koşulları:

- Her bölümde ihtiyaç duyulan görevli sayısı karşılanmalıdır.
- Kadrolu güvenlik görevlileri ardı ardına en fazla 5 gün çalışmalıdır haftada 2 gün izin verilmelidir.
- Sözleşmeli erkek güvenlik görevlileri ardı ardına en fazla 6 gün çalışmalıdır ve haftada 1 gün izin verilmelidir.
- Sözleşmeli bayan güvenlik görevlileri sadece sabah vardiyasında çalışmalıdır.
- Üç vardiya çalışan her bir güvenlik görevlisi için gece vardiyasında çalıştığı takdirde ertesi gün ki sabah ve akşam vardiyanında çalışmamalıdır.