

56991

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERDE
Cu, Ni ve Mo ALAŞIM ELEMENTLERİNİN
OSTEMPERLEME SONUCU BEYNİT OLUŞUMUNA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ ve SİNİRSEL AĞ
MODELİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Osman Nuri ÇELİK

Doktora Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

1996

Bu Tez Osmangazi Üniversitesi Araştırma
Fonunca Desteklenmiştir.

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERDE
Cu, Ni ve Mo ALAŞIM ELEMENTLERİNİN
OSTEMPERLEME SONUCU BEYNİT OLUŞUMUNA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ ve SİNİRSEL AĞ
MODELİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Osman Nuri ÇELİK

Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Bu Tez Osmangazi Üniversitesi Araştırma
Fonunca Desteklenmiştir

Danışman: Prof. Dr. Orhan Şerif KOMAÇ

Mayıs-1996

Osman Nuri ÇELİK'in DOKTORA TEZİ olarak hazırladığı "KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERDE Cu, Ni ve Mo ALAŞIM ELEMENTLERİNİN OSTEMPERLEME SONUCU BEYNİT OLUŞUMUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ ve SINIRSEL AĞ MODELİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye: Prof.-Dr. Orhan Seray Komaç



Üye: Prof. Dr. Niyazi Eruslu



Üye: Y.Doc.Dr. Nedret AYDINBEYLİ



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13-6-1996 gün ve 96-17/9 sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Prof. M. Selami KILIÇKAYA
Enstitü Müdürü

ÖZET

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler (OKGDD) aynı matris yapıya sahip çelik malzemelere eşdeğer mukavemet özellikleri verebilen malzemelerdir. Son yıllarda özellikle dişli üretiminde, yüzeyi sertleştirilmiş dövme çelik malzemelerin yerine kullanımları artmaktadır. Aşınma ve yorulma direncinin yüksek olması istenen yerlerde (tank paleti, krank mili v.b.) başarılı uygulama örneklerinin verilmesi, OKGDD'lerin önemini ve kullanım alanlarını arttırmaktadır.

OKGDD'lerde mekanik özellikler, mikroyapıyla yakından ilgilidir. Bu nedenle mikroyapının çok iyi incelenmesi gerekir.

Bu çalışmada, KGDD'lerde ostemperleme ısı işlemi sonucu oluşacak beynit miktarına ve sertliğe Cu, Ni ve Mo alaşım elementlerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmalara ait sonuçların değerlendirilmesiyle, yapılacak deneyler için önceden tahminleme yapabilecek bir model oluşturmak amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan döküm malzemeler, farklı oranlarda Cu, Ni ve Mo alaşım elementleri içermektedir. Bileşimleri belirlenen numuneler 22 farklı kompozisyonda özel bir döküm firmasına dökülmüştür. 16 mm çapında ve 10 mm genişliğindeki dilimler halinde hazırlanan numuneler, 850°C ve 950°C'de 1 saat ostenitlenmiş ardından 250°C, 350°C ve 450°C sıcaklıklarında 0.5, 1, 2, 3 ve 4 saat ostemperlenmiştir. Isıl işlemi takiben temizlenen numuneler, yüzeyleri zımparalanıp parlatıldıktan sonra dağlanmış ve Leco 2001 görüntü analiz cihazıyla beynit miktarları belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri, Rockwell sertlik ölçüm yöntemiyle 950°C'de ostenitlenmiş numuneler üzerinde yapılmıştır. Metalografik çalışmaların sonuçları ostemperleme süre ve sıcaklığına bağlı olarak her alaşım için diyagramlar halinde verilmiştir.

Turbo Pascal V7.0 programlama dili kullanılarak sinirsel ağ modeliyle deney sonuçlarını değerlendiren bir program hazırlanmıştır. Deney sonuçları, bu program aracılığıyla, tasarlanan sinirsel ağ modeline öğretilmiştir. Daha sonra yapılacak deneylere ait beynit miktarları tahmin edilmiş ve elde edilen değerler gerçek deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, sinirsel ağ modeliyle bu tür deneysel çalışmalarda güvenilir tahminleme yapılabileceği gösterilmiştir.

ABSTRACT

Austempered ductile irons are materials with similar strength giving equal value strength characteristic to the same matrix steels. Up to now, ADI has used instead of carbonised steels, specially on gear production. Successful applications in the area that is needed high wear resistance and fatigue strength (tank tracks, crank shafts, etc.) increase the importance of ADI.

ADI's mechanical properties depend on the microstructure, so, the microstructure should be controlled.

In this study, Cu, Ni and Mo alloys' effect were investigated in ADI. The aim was to construct a model which will estimate the experimental results. The materials contain Cu, Ni and Mo alloys in different rates. Specimens with predetermined compositions have been casted in 22 different contents at foundry situated in İzmit. Specimens, firstly, have been austenised for 1 hour at 850°C and 950°C, then, they have been austempered for 0.5, 1, 2, 3 and 4 hours at 250°C, 350°C and 450°C. After heat treatment, cleaned specimens have been polished and etched carefully for the preparation to Leco 2001 image analyzer where bainite amounts determined. Hardness have been fulfilled on the specimens which have been austenized at 950°C. Metallographic results being obtained according to austempering time and temperature have been given as diagrams for each alloy separately.

For the evaluation of the test results, a new program has been written in Turbo Pascal V7.0, where neural network model has been used. With the aid of a new program, the test results have been taught to the designed neural network model and the bainite amounts for the foregoing tests have been estimated. So then, obtained values have been compared with the real test results. As a result, one may say that reliable estimation in such experimental studies with neural network can be done successfully.

TEŞEKKÜR

Çalıőmam boyunca yapmış olduğu tım katkılar için sayın hocam Prof.Dr. Orhan Şerif KOMA'a, numunelerinin dökölmesini üstlenen Kırfez Döküm Sanayinin sahibi sayın Yusuf ALAN'a, numune hazırlama aőamasındaki teknik yardımları için teknisyenimiz Akif TUTGUN'a, sinirsel ağ modeli programının yazımında beni destekleyen sayın Arő.Grv. İsmail CİN'e ve bütün çalıőmalarım süresince maddi, manevi desteklerini esirgemeyen en kıymetli varlıklarım Babama ve Anneme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
1. GİRİŞ	1
2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN OSTEMPERLENMESİ ..	3
2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirler	3
2.1.1. Küresel grafitli dökme demirlerin metalurjisi	5
2.1.2. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri	7
2.2. Ostemperleme Isıl İşlemi	9
2.2.1. Ostemperleme kinetiği	11
2.2.2. Ostemperleme kabiliyeti	17
3. OSTEMPERLEMİYİ ETKİLEYEN PARAMETRELER	21
3.1. Döküm Kalitesi ve Alaşım Elementlerinin Segregasyonunun Etkisi	21
3.2. Ostenitleme ve Ostemperleme Şartlarının Etkisi	25
3.3. Kimyasal Bileşimin Etkisi	28
4. OSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÖZELLİKLERİ	38
4.1. Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri	38
4.1.1. Çekme özellikleri	41
4.1.2. Yorulma özellikleri	44
4.1.3. Darbe ve sertlik özellikleri	45
4.2. OKGDD lerin Teknolojik Önemi ve Uygulama Alanları	48

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa No</u>
5. SİNİRSEL AĞLAR (NEURAL NETWORKS)	51
5.1. Yapay Sinirsel Ağların Temel Terimleri	52
5.2. Geri Yayınım (Backpropagation)	55
5.3. Genelleştirilmiş Delta Kuralı	56
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	59
6.1. Deneyleerde Kullanılan Malzemeler	59
6.2. Deneyleerde Kullanılan Cihazlar	60
6.3. Deneyleerin Yapılışı	62
6.4. Deneylee Sonuçları	63
6.5. Deneylee Sonuçlarının Sinirsel Ağ Sistemiyle Değerlendirilmesi	93
6.5.1. Değerlendirme Algoritması	94
6.5.2. Sinirsel Ağ Sistemiyle Elde Edilen Sonuçlar	111
6.6. Sinirsel Ağ Programının Kullanımına Ait Bilgiler	113
7. SONUÇ ve ÖNERİLER	118
KAYNAKLAR DİZİNİ	123
ÖZGEÇMİŞ.....	129
EK-1: Sinirsel Ağ Modeline Ait Bilgisayar Programı	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
2.1: Küresel grafitli dökme demir (%1 Nital, 200x)	5
2.2: Ostemperleme ısı işleme şeması.	10
2.3: Ostemperleme reaksiyonu.....	12
2.4: Ostemperleme süresi ile çekme uzaması arasındaki ilişki.....	13
2.5: Dönüşüm %'si ve mikroyapısal değişimler (1., 2. kademedeki ve proses penceresinde).....	14
2.6: t_2 zamanının bulunması için kullanılan kalıntı ostenit-süre ilişkisini gösteren diyagram.....	15
2.7: a) CCT diyagramı üzerinde su verme ve ostemperlemenin birarada gösterilmesi, b) Silindirik numunenin aksel kesiti boyunca r_e ve r_c arasındaki ilişki, kesitin tüm noktalarında $r_e > r_c$, D_c : Kritik çap.....	18
3.1: OKGDD'lerde ostemperleme sıcaklığı ve süresinin akma ve çekme mukavemetine etkisi.....	26
3.2: OKGDD'lerde ostemperleme sıcaklığı ve süresinin sertlik ve birim uzamaya etkisi.....	27
3.3: Hacimsel ostenit miktarı ve ostemperleme süresi arasındaki reel ilişki.....	28
3.4: 2.5 cm çaplı CuNi alaşımlı çubukta, 360°C ostemperleme sıcaklığında, ostemperleme süresine bağlı olarak oluşan martenzit miktarı.....	29
3.5: 275-400°C sıcaklıklar arasında 1 saat ostemperlenmiş malzemelerde Si miktarının çekme mukavemeti üzerine etkisi.....	30
3.6: OKGDD'lerde mekanik özelliklerin bakır miktarıyla değişimi.....	33
3.7: Ostemperleme sıcaklığı ve süresinin %3.82 Ni içeren KGDD'de çekme mukavemeti, sertlik, ve birim uzama üzerine etkisi.....	34
3.8: Ostemperleme sıcaklığı ve süresinin %0.36 Mo içeren KGDD'de çekme mukavemeti, sertlik, ve birim uzama üzerine etkisi.....	35
3.9: OKGDD'lerde Mo içeriğine bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi.....	36

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
3.10: KGDD'lerin sertleşebilirliği üzerine alaşım elementlerinin etkisinin çarpım faktörü üzerindeki etkisi.....	37
4.1: Çekme mukavemeti uzama ilişkisi.....	39
4.2: OKGDD'de alt beynitik yapı (%3 Nital, 200X).....	40
4.3: OKGDD'de üst beynitik yapı (%3 Nital 200X).....	40
4.4: %0.55 Mn, %0.8 Cu içeren KGDD'de sertliğin ostemperleme süresine ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi.....	41
4.5: 1" Y-Blok.....	43
4.6: Darbe testi sıcaklığının darbe direncine etkisi.....	46
4.7: Oda sıcaklığında V-çentikli Charpy numunesinin darbe enerjisinin ostemperleme süresine bağlı değişimi.....	46
4.8: %1.57 Si içeren KGDD'de, ostenitleme sıcaklığındaki artışın ostemperleme sonrası oluşan kalıntı ostenit miktarına etkisi.....	47
5.1: Sinirsel ağda şematize bir nöron şekli.....	52
5.2: Sinirsel ağlarda bağlantı şekilleri.....	54
5.3: Geri yayınının yapısı.....	56
6.1: Deney numunelerinin şekli.....	59
6.2: Deneysel çalışmalarda kullanılan fırınlar.....	61
6.3: Metalografik çalışmalarda kullanılan görüntü analiz sistemi.....	61
6.4-6.45: Cu, Ni ve Mo alaşımli KGDD'lerde çeşitli ostenitleme ve ostemperleme şartlarında beynit miktarının ve sertliğin ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi	64-84
6.46-6.61: Cu, Ni ve Mo alaşımli KGDD'lerde çeşitli ostenitleme ve ostemperleme şartlarında deneye tabi tutulmuş numunelere ait bazı mikroyapı fotoğrafları	85-92

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
6.62: Deney sonuçlarında, 1 gruba ait sinirsel ağ motifi.....	93
6.63: Örnek probleme ait ağ motifi.....	96
6.64: Sinirsel ağ programı açılış ekranı.....	114
6.65: Sinirsel ağ programı DOSYA menüsü	115
6.66: Sinirsel ağ programı NETWORK menüsü.....	115
6.67: Sinirsel ağ programı çalışma ekranı.....	116
6.68: Sinirsel ağ programı rapor oranı.....	117

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa No</u>
2.1: Küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri.....	8
4.1: 25 mm çaplı OKGDD lerin 2 saat 360°C’de ostemperlenmesi sonucu elde edilen çekme özellikleri.....	42
6.1: Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri.....	60
6.2: Deney çizelgesi.....	62
6.3: Deney sonuçlarımıza ait değerlendirmede birinci grup öğrenme verileri.....	100
6.4: Deney sonuçlarımıza ait değerlendirmede ikinci grup öğrenme verileri.....	106
6.5: Birinci grup öğrenme verileri için test verileri.....	107
6.6: İkinci grup öğrenme verileri için test verileri.....	110
6.7: 850°C’de ostenitlenmiş 1. grup numunelere ait deney ve sinirsel ağ sonuçları.....	111
6.8: 850°C’de ostenitlenmiş 2. grup numunelere ait deney ve sinirsel ağ sonuçları.....	112
6.9: 950°C’de ostenitlenmiş 1. grup numunelere ait deney ve sinirsel ağ sonuçları	112
6.10: 950°C’de ostenitlenmiş 2. grup numunelere ait deney ve sinirsel ağ sonuçları	113

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Sembol</u>	<u>Açıklama</u>
η	Öğrenme oranı
δ_i	i. kademe için düzeltme faktörü
θ_i	i. nörona ait eşik değeri
τ_{Ti}	Kritik soğuma süresi (saniye)
α_Y^L	Y elementinin sıvı fazdaki termodinamik aktivitesi
γ_Y^L	Y elementinin sıvı fazdaki aktivite katsayısı
α_Y^S	Y elementinin katı fazdaki termodinamik aktivitesi
γ_Y^S	Y elementinin katı fazdaki aktivite katsayısı
B_f	Beynit oluşumu bitiş sıcaklığı (°C)
B_s	Beynit oluşumu başlangıç sıcaklığı (°C)
${}^0G_Y^L$	Y elementinin sıvı fazdaki serbest molar entalpisi (kJ/kg)
${}^0G_Y^S$	Y elementinin katı fazdaki serbest molar entalpisi (kJ/kg)
I_n	Sinirsel ağ giriş geçişleri
O_i	I. nörona ait çıktı değeri
r_c	Kritik soğuma oranı (1/°C)
r_e	Efektif soğuma oranı (1/°C)
T_A	Ostenitleme sıcaklığı (°C)
T_B	Ostemperleme sıcaklığı (°C)
t_1	Ostemperleme proses penceresi başlangıç zamanı (saat)
t_2	Ostemperleme proses penceresi bitiş zamanı (saat)
W_{ij}	Sinirsel ağ bağlantı ağırlık değerleri
X_γ	Kalıntı ostenit miktarı (hacimce %)
X_Y^L	Y elementinin sıvı mol kesri
X_Y^S	Y elementinin katı mol kesri
Y_i	Sinirsel ağ modeli tarafından hesaplanan çıktı değeri

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
BCIRA	British Cast Iron Research Association
BSD	Brinell sertlik değeri
KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
OKGDD	Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir
VSD	Vickers sertlik değeri



1. GİRİŞ

Dökme demirler miladi yılların başlarından itibaren kullanılmaya başlanmış metal malzemelerdir. Teknolojik gelişmelerin sürekliliği, dökme demirlerin de metalurjik gelişimine yansımıştır. Zaman içinde, daha yüksek mukavemetli ve düşük maliyetli döküm ürünlerinin elde edilmesi mümkün olmuştur.

Dökme demirlerin üretimindeki önemli gelişmelerin başında kontrollü katılaşma metodunun geliştirilmesi ve grafitlere küre şeklinin verilmesi sayılabilir. Küresel grafitli dökme demirlerin (KGDD) hem mukavemet hemde süneklik yönünden, aynı matris yapıya sahip gri dökme demirlerden daha üstün olduğu söylenebilir. Başlangıçta ferritik, ferritik-perlitik ve perlitik mikroyapılarda üretilebilen küresel grafitli dökme demirlerin, günümüzde çok daha yüksek mukavemet değerleri verebilen matris yapılarda da üretimleri yaygınlaşmaktadır. Bu tarz mikroyapıya en güzel örnek, beynitik mikroyapıdır. Beynitik yapı ilk kez çelik malzemelerde, Davenport ve Bain tarafından geliştirilmiştir. Küresel grafitli dökme demirlerde beynitik yapı, yüksek mukavemet süneklik ve tokluk değerlerinin birarada elde edilmesine imkan vermektedir. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler (OKGDD), küresel grafitli dökme demirler içinde beynitik mikroyapıya sahip olan grubu ifade etmektedir.

Tanım olarak OKGDD, uygun bileşimdeki KGDD'lerin ostemperleme ısı işleminden geçirilmesiyle elde edilen sünek döküm ailesinin, beynitik yapıly üyesidir. OKGDD'ler aynı matris yapıdaki çelik malzemelere yakın mukavemet ve süneklik değerlerine sahip olabildikleri için son yıllarda ilgi çeken bir malzeme olmuşlardır. Bu malzemenin kullanım alanı tüm dünyada giderek artmaktadır.

Günümüzde pekçok firma OKGDD malzemedan imal edilmiş parçalar kullanmaktadır. Özellikle ağır hizmet şartlarında çalışan araçların dişli kutularında, aşınmaya karşı dayanıklı olması ve yorulma ömründe uzun olması nedeniyle bu malzeme tercih edilmektedir.

OKGDD malzemeler, KGDD malzemelerin üstün dökülebilme ve işlenebilme özellikleri ile aynı boyuttaki çelik malzemelerin yüksek mukavemet özelliklerini biraraya getirir. Bu nedenle hem daha ucuz hem de daha dayanıklıdır.

Bu çalışmada, küresel grafitli dökme demirlerin ostemperlenmesinde Cu, Ni ve Mo alaşım elementlerinin, çeşitli ostenitleme ve ostemperleme şartlarında beynit oluşumuna etkileri incelenmiştir. Bu incelemenin amacı, alaşım elementlerinin etkisini matematiksel olarak ortaya koymak ve alaşım elementlerinin değişik miktarları için hangi ısı işlem parametrelerinin optimum sonuçları vereceğini önceden kestirmektir. Bu amaçla tezin ikinci bölümde KGDD'lerin ostemperleme ısı işlemi teorik olarak ele alınmış ve ostemperlenme kabiliyeti tanımlanmıştır. Üçüncü bölümde ostemperlemeyi etkileyen parametreler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde OKGDD'lerin mekanik özellikleri, kullanım yerleri ve teknolojik önemleri anlatılmıştır. Beşinci bölümde deney sonuçlarının değerlendirilmesinde ve tahmininde kullanılacak olan sinirsel ağ modeli (neural networks) anlatılmıştır. Altıncı bölümde ise deneylerde kullanılan malzemelerin nitelikleri, deneylerin tasarımı, deney sonuçları ve bu sonuçlardan yararlanılarak oluşturulan sinirsel ağ modeli ile bu modelden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar yedinci bölümde değerlendirilerek yorumlanmıştır. Ayrıca OKGDD malzemelerin ülkemizdeki kullanım alanlarına çeşitli öneriler getirilmiştir.

2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN OSTEMPERLENMESİ

General Motors firmasının 1973 yılında ilk kez Pontiac marka kamyonlarının arka aks dişlisi olarak, sementasyona tabi tutulmuş dövme çelik malzeme yerine ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir malzeme kullanması, bu malzemeye olan ilginin hızla artmasına neden olan ilk örnektir (Harding and Gilbert, 1986). İlk araştırmaları 60'lı yıllarda başlayan ve ilk kullanım örnekleri 70'li yıllarda olan ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir malzemeler, günümüzde de pekçok alanda kullanımları hızla yaygınlaşan metal malzemeler sınıfındadır. Başlangıçta ostemperlemeyi, malzeme ve ısıl işlem şartları açısından etkileyen faktörler tam anlamıyla çözülememişken, artan araştırma çalışmalarıyla pek çok problem ortadan kaldırılmış ve OKGDD malzemeler bir çok kullanım alanı bulmuşlardır (Dorazil, 1991). OKGDD'leri etkileyen en önemli etkenlerin başında küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı ve içerdiği alaşım elementleri gelir. Hassas olarak üretilmiş olan küresel grafitli dökme demirler üzerinde, ısıl işlem parametreleriyle oynayarak oldukça iyi sonuçlar elde etmek mümkündür. Ostemperleme ısıl işlemi, ostenitleme süre ve sıcaklığıyla, ostemperleme süre ve sıcaklığı da sonuçta elde edilecek beynitik yapıyı, dolayısıyla tüm özellikleri doğrudan etkiler. Başarılı bir ostemperleme ısıl işlemi için tüm parametrelere etkin bir şekilde müdahale etmek, işlemin her kademesini, dökümden ısıl işlemin sonuna kadar, kontrol altında tutmak gerekir. İşlem kontrollerini başarılı olarak yapabilmek için hem küresel grafitli dökme demirlerin hem de ostemperleme ısıl işlemi sonucu elde edilen beynitik yapının morfolojisinin iyi incelenmesi gereklidir.

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirler

Dökme demirlerin üretimi çok eski bir endüstri koludur ve ilk örnekleri 2000 yıl öncesine dayanır. Dökme demir veya gri döküm, bir demir-karbon-silisyum alaşımıdır ve yapısı çeliğe benzer bir matris üzerinde lamel grafitlerden oluşur. Gri döküm hemen hemen hiç sünek olmayan kırılğan bir malzemedir. Ayrıca alaşımsız formdaki gri dökme demir, düşük mukavemetli kolay işlenen bir malzemedir. Beyaz temper ve siyah temper dökme demirlerin gelişimi ise 18. yy'ın sonlarıyla 19. yy'ın başlarına rastlar. Bu tarz

malzemeler pik demirin dönüşüm fırınlarında oksitli şartlar altında ergitilmesi ve sonuçta düşük karbonlu düşük silisyumlu, grafitsiz karburlu bir yapıya getirilmesi ile elde edilir (Segem, 1978).

Küresel şekilde grafit içeren dökme demirlerin ilk üretimi 1946 yılı temmuz ayında British Cast Iron Research Association'dan H. Morrogh tarafından yapılmıştır. Bu uygulamada küreleştirici olarak Ce kullanılmıştır. Fakat çok mükemmel kontrol edilmesinin gerekliliği ve yüksek maliyeti nedeniyle bu yöntem geniş kullanım alanları bulamamıştır (Spengler and Briggs, 1972).

II. Dünya savaşı sırasında, International Nickel Company, gri dökme demirlerde karbür oluşumunu önlemek amacıyla magnezyum kullanmıştır. Fakat ergimiş demirle magnezyum karıştırıldığında meydana gelen reaksiyonun şiddeti nedeniyle, magnezyumu doğrudan katmak mümkün olmamıştır. Reaksiyon şiddetini azaltmak için magnezyumu doğrudan katmak yerine, magnezyum alaşımları kullanmak yoluna gidilmiştir. Bu amaçla başlangıçta bakır-magnezyum ve nikel magnezyum kullanılmıştır. Gri dökme demire bu malzemenin katılmasıyla mukavemetin ve sünekliğin arttığı görülmüştür. Bu malzemelerin metalografik incelemelerinde ise yapıdaki grafitlerin küre şeklinde olduğu saptanmıştır. Bu ilk örneğin ardından yapılan geliştirme çalışmalarından sonra 1947 yılında magnezyum-küresel grafitli dökme demir prosesi tanıtılmıştır (Spengler and Briggs, 1972).

Günümüzde kullanılan küresel grafitli, çeliğe benzer matris yapılı, dökme demirlerin ilk örnekleri verildikten sonra, üretim teknikleri konusunda pekçok çalışma yapılmış ve sonuçlandırılmıştır. Şekil 2.1'de küresel grafitli dökme demirler için bir mikroyapı örneği verilmiştir.

Bu gelişimin sonucu olarak tasarım mühendisleri için uygun, yeni bir malzeme ortaya çıkmıştır. Küresel grafitli dökme demirler, tek başına bir metalin sağlayamayacağı özellikleri verebilen önemli bir malzemedir. Çok ince kesitli parçalarda da (≈ 1.5 mm) çok büyük parçalarda da (≈ 800 mm) iyi döküm sonucu verebilirler. Küresel grafitli dökme

demirler, gri dökme demirlerin mükemmel dökülebilme özellikleriyle, çeliklerin mukavemet ve süneklik özelliklerini birarada sağlayabilen ender malzemelerdendir.



Şekil 2.1: Küresel grafitli dökme demir (%1 Nital, 200x)

Küresel grafitli dökme demirlerin önemi, yıllık döküm istatistiklerinden de görülebilir. 1986 yılı itibarıyla BCIRA tarafından yapılan istatistikler dünya döküm ürünlerinin ağırlıkça %24'ünün küresel grafitli dökme demir olduğunu göstermektedir (Harding and Gilbert, 1986).

2.1.1. Küresel grafitli dökme demirlerin metalurjisi

Küresel grafitli dökme demirler gri dökme demirlerden farklı olarak, aynı karbon ekivalan değeri için, ötektik katılaşması daha yüksek sıcaklıkta başlayan malzemelerdir. Bu durumda küre şekilli grafit bir ostenit kabuğu ile çevrilir ve yalnız bir faz (ostenit) ötektik yapıyla temas halinde kalır. Bu tarz katılaşmaya neo-ötektik katılaşma denilmektedir. Her bir ostenit kabuğu bir hücredir. Bu hücre içindeki grafitin büyüebilmesi için ostenit kabuğundan içeriye doğru karbon difüzyonu olmalıdır. Bu nedenle küresel grafitli dökme demirlerde, gri dökme demirlere nazaran daha yavaş bir katılaşma olmaktadır. Neo-ötektiğin büyümesi başladıktan sonra, küresel grafit

çekirdeklenmesi olmaz. Dolayısıyla küresel grafitlerin sayısı katılaşmanın hemen başlangıcında belirlenmiş olur. Ötektoid sıcaklığına kadar mevcut grafitler üzerine karbon çökmesi olur (Çavuşoğlu, 1981).

Küresel grafitli dökme demirlerin genel sınıflandırmaları, mekanik özellikleri ve malzeme yapısı esas alınarak yapılmaktadır. Bu tarz dökme demirlerde grafitlerin küresel şekilleri nedeniyle, mekanik özellikler matrisin yapısına bağlıdır. Kürelerin büyüklüklerinin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi azdır. Küresel grafitler dökümün kesit kalınlığına ve grafit çökmesi için gerekli çekirdek sayısına bağlı olarak çeşitli büyüklüklerde olabilirler. Genellikle daha ince kesitlerde daha çok sayıda çekirdek bulunur. Buna bağlı olarak, ince kesitlerde grafit kürelerinin boyutları daha küçük olacaktır (Segem, 1978).

Küresel grafitli dökme demirlerde, grafitlerin sayısı ve dağılımı metalurjik kalitenin çok iyi ve hassas bir göstergesidir. Küre sayısının 100 adet/mm² olması ortalama bir değer olarak tercih edilir (Segem, 1978).

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısı, bir matris ve bu matris içindeki küresel grafitlerden oluşur. Grafitlerin hacimsel olarak yapının %8-10'unu kaplaması tercih edilir. Yapıda bulunabilecek karbürler ise, ostenitik küresel grafitli dökme demirler dışında tercih edilmez. Karbürler mukavemeti ve tokluğu olumsuz yönde etkilerler (Segem, 1978).

Katılaşmanın hemen sonrasında alaşımly ve alaşımlyz küresel grafitli dökme demirlerin yapısı tamamen ostenittir ve katı çözelti halinde yaklaşık %1 C içerir. Döküm soğudukça, karbonun ostenitteki çözünürlüğüde azalır. Çözeltiden itilen karbon çökler ve grafit kürelerine eklenir. Bu süreç, katılaşma tamamlanuncaya kadar devam eder (Segem, 1978).

Alaşımlyz küresel grafitli dökme demirlerde ostenit oda sıcaklığında kararlı bir faz değildir ve demirin başka bir kristallografik formu olan ferrite dönüşür. Bu

dönüşümün sıcaklığı yapıdaki Si miktarından etkilenir ve 723°C civarındadır (Segem, 1978; Spengler and Briggs, 1972).

Küresel grafitli dökme demirlerde ostenit-ferrit dönüşümü matris yapının karbon oranını etkiler. Ostenitin kristalleşme sıcaklığında karbon oranı %1 civarındadır ve bu oran soğuma sırasında azalır. Ostenit-ferrit dönüşümü sırasında karbonun ostenitteki çözünürlüğü %0.55 civarındadır. Buna karşın karbonun ferrit içinde çözünürlüğü sıfırdır. Bu durumda dönüşüm sırasında karbon açığa çıkar. Açığa çıkan bu karbon; soğuma hızına, kimyasal bileşime ve grafit dağılımına bağlıdır. Düşük soğuma hızlarında açığa çıkan karbon çökelir ve grafit kürelerine eklenir. Bu durumda matris yapı tamamen ferrittir ve ferritik küresel grafitli dökme demir elde edilmiş olur. Oysa hızlı soğuma karbonun çökmesine olanak vermez. Karbon ferrit içinde çözünemediği ve ostenitte katılma sırasında dönüşümüne devam ettiği için ostenit doku içinde çok ince demir karbür plakaları oluşmaya başlar. Bu plakalar matrisin sürekliliğini bozar ve ferrit ile ardışık plakalar oluşturur. Ortaya çıkan bu yapı perlittir. Bu şekilde oluşan demir ise perlitik küresel grafitli dökme demirdir (AFS, 1986).

Küresel grafitli dökme demirlerin döküm sonrası matris yapıları çeşitli oranlarda ferrit ve perlit içerirler. Bunun dışında çeşitli ısı işlem ve katılaştırma teknikleriyle yapıyı değiştirmek mümkündür. Soğuma hızına müdahale edilerek veya katılaşmadan sonra mamul üzerinde ısı işlem uygulamalarıyla beynitik, martenzitik veya ostenitik matris yapılar elde edilebilir.

2.1.2. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri

Günümüzde pekçok ülke küresel grafitli dökme demirleri mekanik özelliklerine göre sınıflandırmış ve standartlaştırmıştır. Örneğin Türk Standartları Enstitüsü "Dökme Demir Küresel" anlamındaki DDK kodu ardından minimum çekme mukavemetini verir. Alman standartlarında bu gösterim GGG ile Amerikan standartlarında ise A536-70 gibi özel numaralarla ifade edilmiştir (Çavuşoğlu, 1981).

Tablo 2.1'de TS 526'ya göre küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri verilmiştir. Küresel grafitli dökme demirler, aynı matris yapıdaki gri dökme demirlerin iyi dökülebilme, iyi işlenebilme gibi özellikleriyle daha iyi mekanik özellikleri birarada sağlarlar. Yapılarındaki küresel grafitlerin yağlayıcı etkisi nedeniyle, krank mili, dişli gibi aşınma direnci gerektiren birçok uygulamada kullanılabilirler. Çalışma koşullarında ani sıcaklık değişimlerine karşı küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlere göre daha dirençlidir.

Küresel grafitli dökme demirlerin darbe direnci, çelik malzemelerde olduğu gibi sıcaklığa, malzemenin yapısına ve kimyasal bileşimine göre değişir. Matris ferritik yapıya doğru gittikçe malzemenin tokluğu artar. Tokluk, perlit yüzdesinin artmasıyla azalır. Sıcaklık azaldıkça malzemenin darbe direnci %80'e kadar azalır. Matris yapının beyritik olması durumunda ise bu azalma miktarı daha düşüktür (Segem, 1978; Çavuşoğlu, 1981).

Tablo 2.1: Küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri (TS 526)

Kısa Gösteriliş	Doku	Çekme dayanımı kgf/mm ²	0.2 Akma sınırı kgf/mm ²	Kopma uzaması %	Brinell sertliği (BSD) kgf/mm ²
DDK-40	Ferritik	42	28	12	140-201
DDK-50	Ferritik/Perlitik	50	36	7	170-241
DDK-60	Perlitik/Ferritik	60	40	3	192-269
DDK-70	Perlitik	70	45	2	229-302
DDK-80	Perlitik	80	50	2	248-352
DDK-35.3 ¹⁾	Ferritik	35	22	22	-
DDK-40.3 ¹⁾	Ferritik	40	25	18	-

¹⁾ Darbeli çalışması öngörülen tiplerdir.

Küresel grafitli dökme demirlerde kesit boyutlarının özellikler üzerine doğrudan etkisi yoktur. Fakat ince kesitlerde soğuma hızının yüksek olması, oluşan tane boyutunu ve matris yapının cinsini belirler. Küçük taneli ve perlitik bir yapı daha mukavim olmakla beraber daha kötü süneklik özellikleri gösterecektir. Bununla beraber, ferritik bir matris yapıda ise süneklik daha iyi olacaktır. Çok kalın kesitlerde soğuma hızının düşmesi yapıda segregasyonlara neden olacağı için hem küresel grafitli dökme

demirin mekanik özelliklerini hem de ostemperleme ısı işlemi sonucu oluşacak yapının özelliklerini kötü yönde etkileyecektir (Schissler and Saverna, 1985).

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri ve mikroyapıları üzerine yapılan çalışmalar sonunda özellikle Mangan alaşım elementinin kalın kesitli parçaların yavaş soğuması sırasında segregasyonlara sebep olduğu tespit edilmiştir (Faubert, et. al., 1990).

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri büyük ölçüde matris yapılarına bağlıdır. Kürelerin şekli, miktarı ve dağılımı mekanik özellikler üzerine matris yapıdan daha az etkilidir. Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri üzerine; matris yapının bileşimi, matrisin alaşım elementi miktarı, grafit küreleri sayısı, katılaşma sırasındaki soğuma oranı ve ostenit yapının homojenliği birarada etki eder (Yu, et. al., 1986).

2.2. Ostemperleme Isıl İşlemi

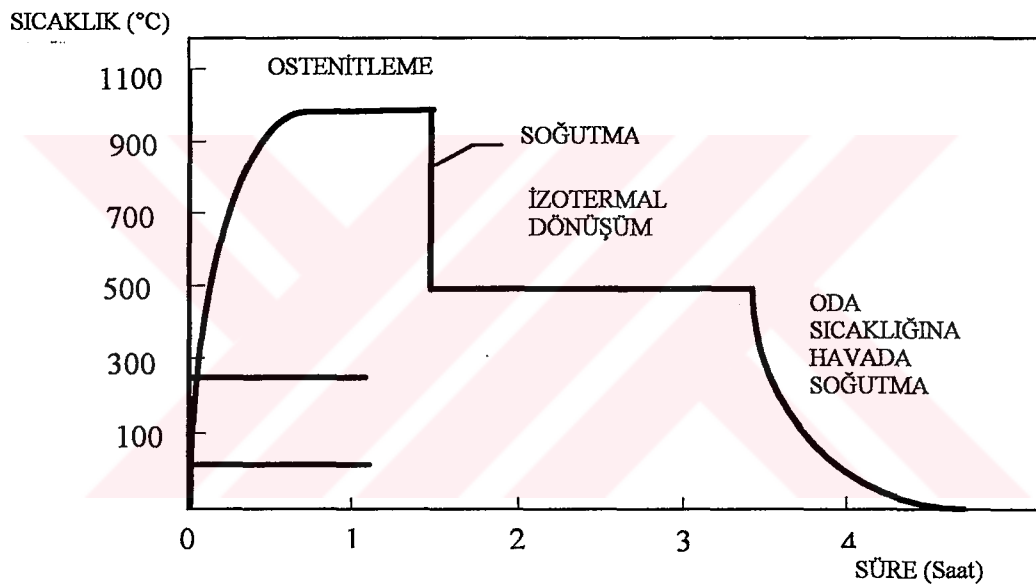
Küresel grafitli dökme demirlerin ticari üretimlerinde, son dönemlerdeki en önemli gelişme, ostemperleme olarak bilinen izotermal bir ısı işlemle matris yapıyı beynite dönüştürmektir. Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilen ostemperleme ısı işleminin kademeleri şöyledir (Morgan, 1987; Harding and Gilbert, 1986):

1. 850-950°C sıcaklıklar arasında enaz 1 saat ostenitleme. Bu işlem yüzeyde dekarbürizasyonu önlemek için, kontrollu atmosferli elektrikli veya gazlı fırınlarda yapılabilir. Alternatif olarak, yüksek sıcaklıklara dayanabilen klorür bazlı tuz banyoları veya akışkan yatak kullanılabilir.
2. Parçaların fırınlardan alınması ve hızlı bir şekilde, 235-450°C sıcaklıklar arasındaki tuz banyosunda hızlı soğutma. Alternatif hızlı soğutma ortamı, maksimum çalışma sıcaklığı 260°C civarında olan yağ veya akışkan yataktır. Su verme oranı, ostemperleme sıcaklığına soğuma sırasında perlit reaksiyonunu önleyecek kadar yüksek olmalıdır. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, örneğin kalın kesitli

parçalarda, döküm sırasında yapıya ilave edilecek Mo, Cu ve Ni gibi alaşım elementleriyle perlit burnunun sağa kaydırılması sağlanabilir.

3. Ostemperleme sıcaklığında bekleme. Bu sıcaklıkta ostenit izotermal bir dönüşümle beynitik ferriti oluşturur. Ostemperleme sıcaklığında bekleme süreleri, demirin alaşım elementi miktarına, ostenitleme süresine ve sıcaklığına bağlı olarak değişir. Ortalama olarak 0.5-4 saat arasında değişir.

4. Oda sıcaklığına suda veya havada soğutma.



Şekil 2.2: Ostemperleme ısı işleme şeması.

Verilen bir bileşimdeki küresel grafitli dökme demirin ostemperleme sonucu elde edilecek, mekanik özelliklerine, ostenitleme süre ve sıcaklığı, alaşım elementlerinin miktarı ve ostemperleme süre ve sıcaklığı doğrudan etki eder. Yapılan araştırmalar en büyük etkinin, ostemperleme süre ve sıcaklığından kaynaklandığını, özellikle ostemperleme sıcaklığının oluşacak beynitik yapıyı doğrudan etkilediğini göstermişlerdir (Morgan, 1987).

Ostemperleme ısı işleminin birinci aşamasında, 850-950°C arasında ostenitleme işlemi yapılmasının amacı matris yapıyı ostenite dönüştürmek ve ostenitin

karbon oranını, dökümün bileşimine ve ostenitleme sıcaklığına bağlı olarak kontrol etmektir. Yapılan ikinci aşama, 235-450°C sıcaklıklar arasında, 0.5-4 saat yapılacak olan ostemperleme işlemi sıcaklığına hızla soğutmaktır. Bu ısıl işlem prosedürü sonunda yüksek karbonlu ostenit, ostemperleme sıcaklığına bağlı olarak, beynitik ferrit veya beynitik ferrit-karbür fazlarını oluşturur. Ostenitin karbon oranı yeterince yüksek olursa, termal olarak dengeli hale gelir. Böylece ostemperleme ısıl işleminden sonra bir miktar ostenit kalıntı (dönüşmeyen) ostenit olarak yapıda kalır (Janovak and Gundlach, 1983; Özel ve Kısakürek, 1990).

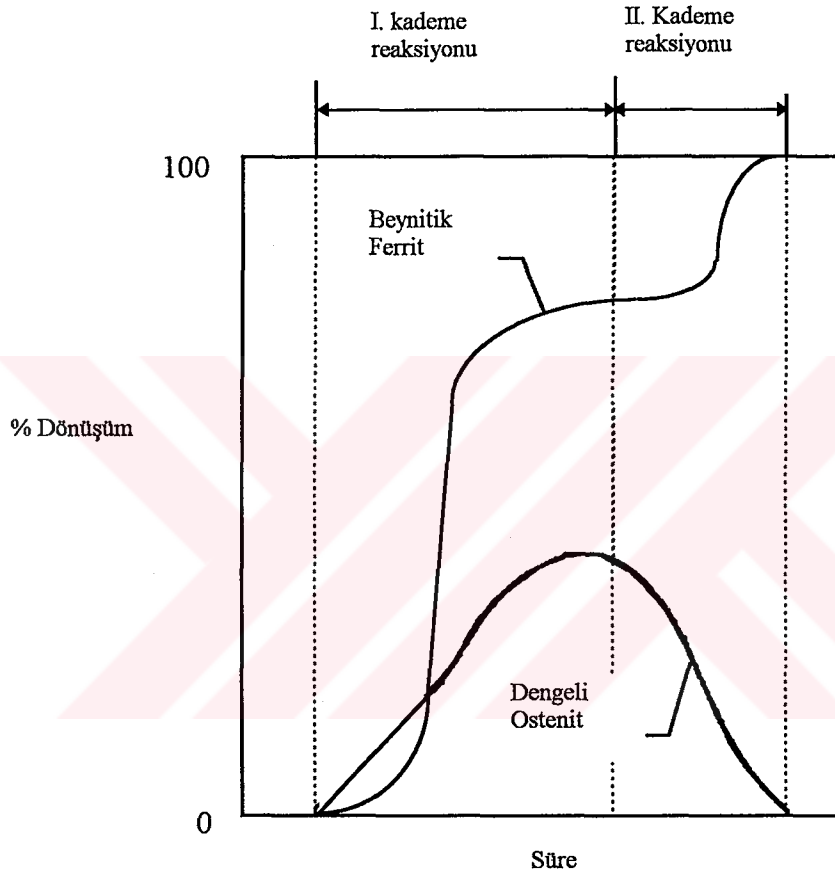
İdeal ostemperleme mikroyapılarını elde edebilmek için ostemperleme süresi doğru olarak seçilmelidir. Bu sürenin doğru seçilebilmesi için ostemperleme ısıl işleminin kinetiğini incelemek gerekir.

2.2.1. Ostemperleme kinetiği

Küresel grafitli dökme demirlerde ve yüksek Si içeren çelik malzemelerde beynitik reaksiyon, konvensiyonel çelik malzemelerdeki beynitik reaksiyondan farklıdır. Küresel grafitli dökme demirlerde izotermal bekleme süresi boyunca ostenit içinde beynitik ferrit çekirdekleri büyür. Aynı süre içinde, ostenit içindeki büyüyen ferrit plakaları içinden karbon atılır. Malzemedeki yüksek Si içeriği, beynitik reaksiyon boyunca normal olarak karbür partiküllerinin oluşumunu engeller. Sonuç olarak kalıntı ostenit beynitik reaksiyon boyunca karbon emmeye devam eder. Ostenitin karbonca zengin hale gelmesiyle dengeli olma hali artar ve ostenitten ferrite dönüşüm kolaylaşır (Metals Handbook, 1985). Beynitik ferrit tabakalarının büyümesi bir noktadan sonra, engellenir ve reaksiyon geçici olarak durur. Bu reaksiyon, ostemperleme dönüşümünün birinci reaksiyonu olarak isimlendirilir (Darwish and Elliott, 1993).

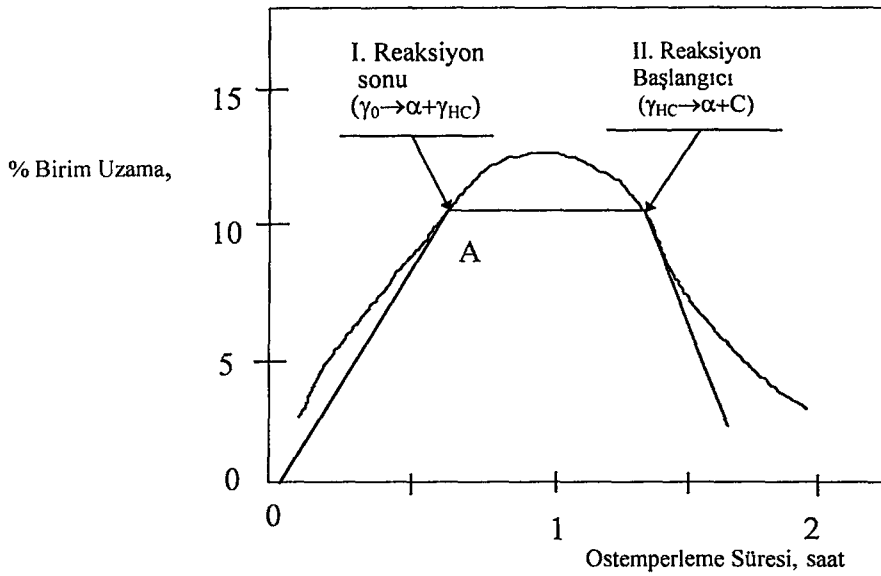
Yüksek karbonlu ostenit belirgin olarak dengeli değildir. Yeterli bir süreyle, özellikle yüksek ostemperleme sıcaklıklarında, ostenit içinde karbür çökmesi olur ve sonuçta ostenit ferrit ve karbüre dönüşür. Ostemperleme reaksiyonu Şekil 2.3'de genel hatlarıyla verilmiştir. İkinci reaksiyon sünekliliği ve tokluğu azalttığı için istenmez. Şekil 2.4'de küresel grafitli dökme demir için ostemperleme süresi ile çekme uzaması

arasındaki ilişki şematize edilmiştir. Teorik olarak A noktası 1. reaksiyonun bittiği yeri gösterir. B noktası ise 2. reaksiyonun başlama noktasıdır. A ve B arasındaki zaman aralığı, maksimum süneklığın sağlandığı proses penceresidir. Verilen bir malzeme için kritik ostemperleme süresini bulmak için birinci reaksiyonun bittiği ve ikinci reaksiyonun başladığı noktaları iyi tesbit etmek gereklidir.



Şekil 2.3: Ostemperleme reaksiyonu (Park, et. al., 1987).

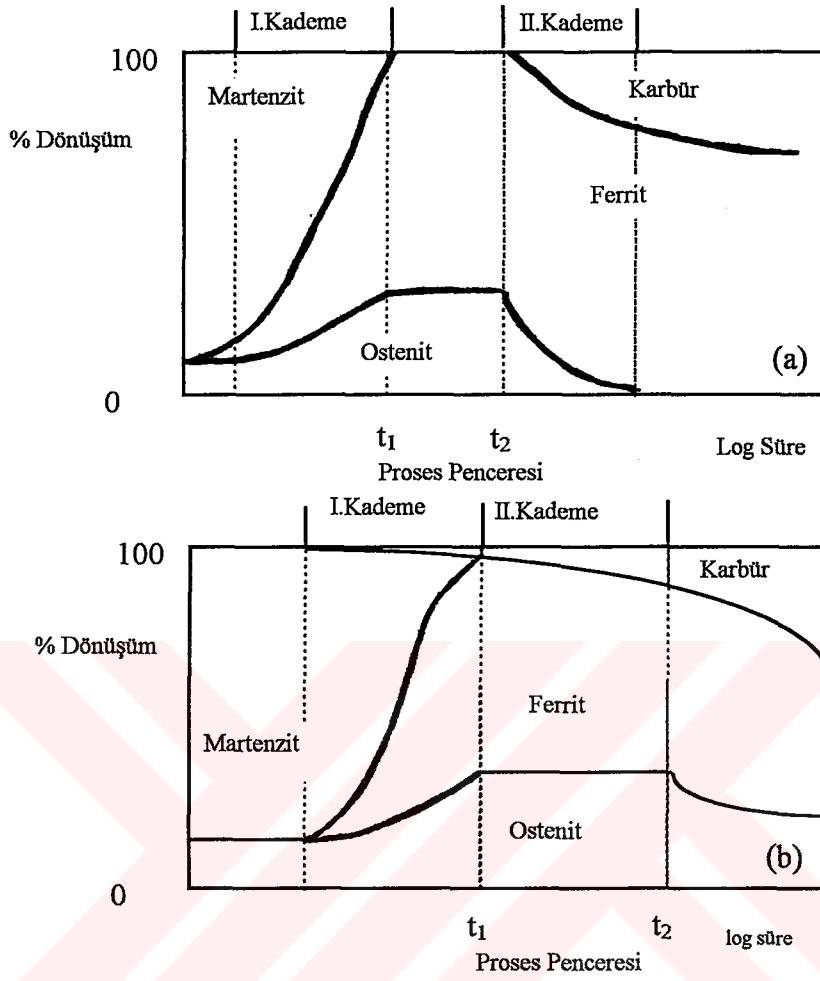
Ostemperleme ısıl işleminde, reaksiyonun iki kademesini incelerken, oluşan beynit şekline göre, dönüşümün farklı olduğunu göz önüne almak gereklidir. Şekil 2.5'de alt ve üst beynitik oluşum için ayrı ayrı, dönüşüm ve süre diyagramları verilmiştir.



Şekil 2.4: Ostemperleme süresi ile çekme uzaması arasındaki ilişki (Park, et. al., 1987).

Ostemperleme ısıl işleminde, reaksiyonun iki kademesini incelerken, oluşan beynit şekline göre, dönüşümün farklı olduğunu göz önüne almak gereklidir. Şekil 2.5'de alt ve üst beynitik oluşum için ayrı ayrı, dönüşüm ve süre diyagramları verilmiştir.

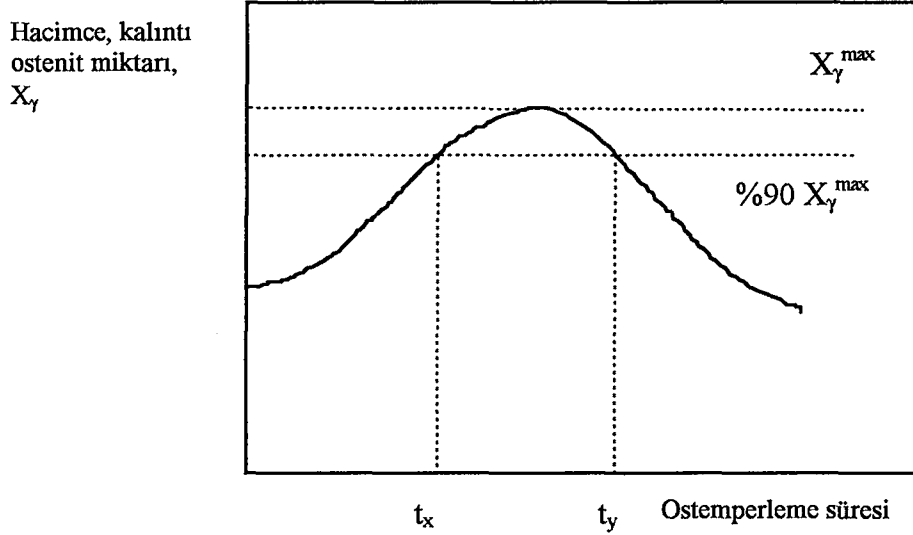
Ostemperleme proses penceresi zaman aralığında, ostemperlenmiş yapı dengededir ve KGDD optimum mekanik özellikleri bu aralıkta verir. 1. aşamada martenzitin, 2. aşamada ise karbürün mevcudiyeti, mekanik özelliklerden tokluk ve sünekliliği olumsuz yönde etkiler. Proses penceresi bu temel üzerine oturtularak tarif edilmelidir. t_1 olarak tanımlanan pencerenin başlangıcından oda sıcaklığına soğutma sırasında ostemperlenmiş yapıda %1 martenzit oluşur. t_1 başlangıç zamanı kantitatif metalografi yöntemleriyle bulunabilir. t_2 zamanı, ikinci aşama reaksiyonu sonucu umulan karbür formasyonu miktarına bağlı olarak hazırlanan bir eşitlikle bulunur. Yapıdaki kalıntı ostenitin miktarı (X_γ), ikinci kademe reaksiyonu sonucu (hacimce) azalır. t_2 zamanını bulmak için X_γ 'nın en büyük değeri bulunur. Bunun için ostemperleme zaman eğrisi (Şekil 2.6) ve bu eğriye %90 kalıntı ostenitten çizilen doğru kullanılır. %90'dan çizilen doğrunun eğriyi kestiği noktalarda ostemperleme süreleri t_x ve t_y okunur. t_2 değeri, bu değerler kullanılarak 2.1 nolu eşitlik yardımıyla bulunur (Darwish and Elliott, 1993).



(a) üst beynit, (b) alt beynit

Şekil 2.5: Dönüşüm %'si ve mikroyapısal değişimler (1., 2. kademe ve proses penceresinde) (Darwish and Elliott, 1993).

$$\ln t_2 = \frac{\ln t_x + \ln t_y}{2} \dots\dots\dots (2.1)$$



Şekil 2.6: t_2 zamanının bulunması için kullanılan kalıntı ostenit-süre ilişkisini gösteren diyagram (Darwish and Elliott, 1993).

Ostemperleme ısısal işleminde elde edilecek sonuç özellikler, ısısal işlem şartlarıyla tamamen bağlantılıdır. Eğer ısısal işlem proses penceresi dahilinde tamamlanırsa elde edilecek özellikler optimum olur. Ostemperleme sonucu elde edilecek olan beynitik yapı, martenzit dönüşüm sıcaklığı üzerinde, perlitik reaksiyon sıcaklığı altında, ostenitin çözünmesiyle oluşmaktadır. Çeliklerde ve dökme demirlerde, beynitik yapı izotermal olarak veya sürekli soğuma sırasında elde edilir (Metals Handbook, 1985).

Pek çok malzemede beynitik oluşum sıcaklığı perlit burnunun altında başlar ve perlitik dönüşüm aralığından ayrılır. B_f (beynit bitiş) sıcaklığının altında tamamen beynitik yapı elde edilir. Fakat daha yüksek sıcaklıklarda beynitik dönüşüm ostenitin çözünmesi tamamlanmadan durdurulabilir. Bu durumda yapıda dönüşmemiş (kalıntı) ostenit kalır. Ostenitin çözünme miktarı malzemenin bileşiminin ve ostemperleme sıcaklığının bir fonksiyonudur. İzotermal reaksiyon sıcaklığı azaldıkça, beynit oluşum yüzdesi artar, B_s (beynit başlama) sıcaklığı, TTT diyagramında yaklaşık olarak perlit burnunun biraz altındadır (Metals Handbook, 1985).

Klasik demir beynit, lameler olmayan çubukların biraraya gelmesinden veya içine karbür partikülleri çökelmiş düzlem şeklindeki ferrit taneleri içerir. Bununla beraber bazı malzemelerde (örneğin, yüksek Si içerenler) klasik üst beynitik ferritin oluşması beklenirken, ferrit tanelerinde tamamen karbür çökmesi görülür (Metals Handbook, 1985).

Bazı demirdışı metallerde, çeliklerdeki beynitik yapıya benzer mikroyapılar elde etmek mümkündür. Demir alaşımlarında elde edilen beynitin bir diğer karakteristik özelliği yüzey gerilimi sonucu beynitik ferrit tabakalarının şekillenmesidir, bu oluşum martenzit tabakalarının oluşumuna benzer.

Beynitik dönüşüm sıcaklığı aralığında dönüştürülmüş çeliklerde oluşan mikroyapılar için pekçok terim kullanılmaktadır. Alt ve üst beynit en klasik ve temel terimlerdir. Davenport ve Bain tarafından yapılan ilk çalışmayı izleyen 50 yıllık süreç içinde metalurjik araştırmalarla beynitin oluşumu izah edilmeye çalışılmıştır. Beyniten araştırılmasının bir sebebi tercih edilen özellikleri, bir diğer sebebi ise bazı özelliklerinin yaygın, bazı özelliklerinin kayma modunda dönüşüm özellikleri veren katı hal dönüşüm reaksiyonu olmasıdır. Beynitik dönüşüm (hem alt hemde üst beynitik dönüşüm), yüzey gerilimlerinin eşlik etmesi, beynit miktarının dönüşüm sıcaklığına bağlı olmaması, beynitik dönüşüm sahasında ostenitin dengede olması, beynitik dönüşümü martenzitik dönüşüme benzer kılmaktadır (Dorazil, 1991).

Aoronson'a göre beynitin üç farklı tanımı vardır. Bunlar; mikroyapısal tanım, kinetik tanım ve yüzey gerilimi tanımıdır. Mikroyapısal tanım, beyniti otektoid reaksiyonun lamel olmayan ürünü olarak tanımlar. Kinetik tanım beynitin C-eğrisinden ayrışarak oluştuğunu söyler. Yüzey gerilimi tanımına göre ise beynit yavaş yavaş büyüyen plakalar halindedir. Kennon, demir alaşımlarındaki beyniti, yavaş yavaş şekillenen ve yüzey gevşemesi verebilen lamel şeklinde olmayan ferrit ve karbür kümeleri olarak tanımlamıştır (Dorazil, 1991).

2.2.2. Ostemperlenme kabiliyeti

Küresel grafitli dökme demirlerde ostemperlenme kabiliyeti, ostenitleme sıcaklığından ostemperleme sıcaklığına sertleşme kabiliyeti olarak tanımlanır. Malzemenin bu sıcaklıklar arasında sertleşme kabiliyetini tesbit etmek için bazı yöntemler önerilmektedir.

Sertleşme kabiliyeti tesbiti için yapılan en klasik deney Jominy deneyidir. Jominy deneyinde standart numuneye sadece uç kısmından su verilerek sertleşmesi sağlanır. Ardından uçtan itibaren belli aralıklarla sertlik ölçümü yapılarak sertlik-mesafe diyagramı çizilir. Bu diyagram sertleşme kabiliyetinin bir göstergesidir. Jominy deneyinde minimum soğuma oranı, yapıda belli bir miktar martenzit oluşturmak amacıyla seçilir.

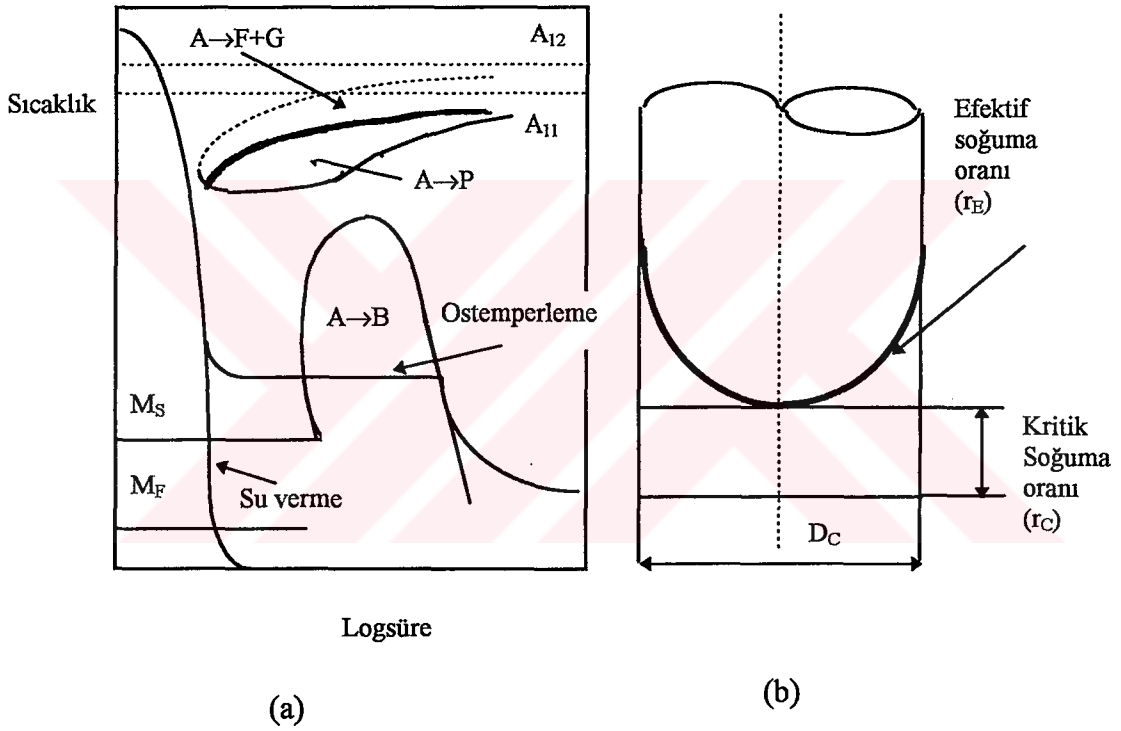
Jominy deneyinde deney şartları, ostemperleme ısı işlem şartlarına ayarlanabilir. Uç kısım ostemperleme sıcaklığına soğutulularak deney yapılabilir. Fakat bu durumda sertlik değişimi çok fazla olmayacağından, sertliği ölçerek ostemperlenme kabiliyetini tesbit etmek mümkün olmayabilir. Sertliği ölçerek ostemperlenme kabiliyetini tesbit etmek mümkün olsa bile beynitik dönüşümün ostemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olduğu unutulmamalıdır (Dorazil, 1991).

Burns, Moore ve Archer tarafından önerilen bir diğer sertleşme kabiliyeti ölçüm yöntemi, silindirik numunenin tüm yüzeylerinden aynı zamanda soğutulması esasına dayanır. Daha sonraları da buna benzer yöntemler ileri sürülmüştür.

Sertleşme kabiliyeti ölçüm deneylerinde, tüm yüzeylerinden su verilen silindirik numuneler kullanıldığında, eğer faydalı bir soğuma oranı elde edilmek isteniyorsa, farklı çaplarda numunelere çeşitli şekillerde su verilmelidir. Ostemperlenme kabiliyetinin sıcak banyoda tesbiti için deney, silindirik numunenin tüm yüzeylerinin soğutulmasıyla yapılabilir. Ostemperleme ısı işleminin M_s ile 450°C arasında yapılacağı düşünülürse, dönüşüm sıcaklığı değişince kritik çap değerinin değişeceği, buna bağlı olarak, banyo sıcaklığının artmasıyla test numunesinin her noktası için soğutma etkisinin, dolayısıyla efektif soğutma oranının değişeceği hesaba katılmalıdır. Ostemperlenme kabiliyeti tesbit

edildiği zaman, dönüşüm için kritik çap değeri de bulunmuş olur, veya bazı durumlarda değişik dönüşüm sıcaklıkları için kritik çap değerini tesbit etmek mümkün olur (Dorazil, 1991).

Hem sertleşme hemde ostenperlenme kabiliyeti, kritik ve efektif soğuma oranlarının arasındaki ilişkiye bağlıdır. Şekil 2.7'de D çaplı bir silindirik çubuğa tamamen su verilmesi durumunda (r_e 'nin r_c 'den büyük olması) soğuma oranları arasındaki ilişki gösterilmiştir (Dorazil, 1991).



Şekil 2.7: a) CCT diyagramı üzerinde su verme ve ostemperlemenin birarada gösterilmesi, b) Silindirik numunenin aksenal kesiti boyunca r_e ve r_c arasındaki ilişki, kesitin tüm noktalarında $r_e > r_c$, D_c : Kritik çap (Dorazil, 1991).

Dorazil, ostemperlenme kabiliyetini tanımlamak ve matematiksel bir zemine oturtmak için deneysel çalışma sonuçlarıyla, istatistiksel analiz yöntemlerini kullanmıştır. Yapılan çalışmada amaç, alaşımsız ve alaşımlı küresel grafitli dökme demirlerde r_e , r_c ve D_c parametreleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır. Eğer bu parametreler arasındaki

ilişki matematiksel olarak ifade edilebilirse, ostemperlenme kabiliyeti tanımına uygun olarak kritik çap ve kritik soğuma oranı tarif edilmiş olur.

Silindirik bir numunenin tamamen ostemperlenebilmesi için, ostenitleme sıcaklığından ostemperleme sıcaklığına inildiğinde tüm kesitin bu sıcaklıkta olması gerekmektedir. Bu nedenle çapa bağlı olarak numunenin enaz hangi hızla soğutulması gerektiği hesaplanabilmelidir. Seçilen kesit için makul bir soğuma oranının bulunabilmesiyle, malzemenin ostemperlenebilmesi hakkında yorum yapılabilir.

Dorazil bu amaçla yaptığı çalışmada, Cu, Mn, Mo ve Ni içeren küresel grafitli dökme demirler kullanmıştır. Numuneler 5, 10, 20 ve 40 mm çaplı silindirik numunelerdir. Tüm numunelerde uzunluğun çapa oranı 2.5 alınmıştır. Numuneler 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda ostenitlenmiş ardından 200-500°C arasında bir sıcaklığa hızlı soğutulmuştur. Su verme sırasında numunelerin ortasına yerleştirilmiş bir termokupl ile soğuma süresince sıcaklık değişimi tesbit edilmiş ve soğuma eğrileri çizilmiştir.

Elde edilen soğuma eğrileri ile, numune çapları (D:5-40mm), tuz banyosu sıcaklığı (T_B :230-410°C), ve kimyasal bileşim (c:%0.63-3.82 Ni, %0.26-0.74 Mo, %0.25-1.23 Mn) alınarak soğuma oranı r (°C/s) bulunmaya çalışılmıştır.

Dorazil'in yaptığı bu çalışma sonunda orta ve düşük alaşımlı küresel grafitli dökme demirler için kritik soğuma oranı ve süresi bulunmuştur.

$$\tau_{Ti} = 0.08D^{1.58} (T_A - T_i)^{0.71} (T_i - T_B)^{-0.66} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$r_{Ti} = \frac{1}{0.08} D^{-1.58} (T_A - T_i)^{0.29} (T_i - T_B)^{0.66} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

τ_{Ti} = Kritik soğuma süresi (s)

r_{Ti} = Kritik soğuma oranı (°C/s)

T_A = Ostenitleme sıcaklığı (°C)

T_B = Ostemperleme sıcaklığı (°C)

T_i = 700-500°C sıcaklık aralığında 50°C adımlar.

Dorazil bu çalışmasında çok sayıda numunenin sonuçlarını kullanmış ve %98 güvenilirlikle kritik soğuma oranı ve süresini hesaplamıştır. Bu denklemlerdeki sabit sayılar, kullanılan malzemelerin bileşimlerine ve deney sonuçlarına göre hesaplanmıştır.

Ostemperleme ısı işleminde bağımsız değişkenler D , T_A , T_B ve c , bağımlı değişkenler τ ve r 'dir. τ ve r değerleri ostemperleme kabiliyetinin göstergeleridir. Deneye tabi tutulacak parçalara ait değişkenler bilinirse, parçanın kritik soğuma oranı ve süresi bulunmuş olur. Bu değerlerin gerçekte olabirliği üzerine fikir yürütülerek, numunenin ostemperleme ısı işlemi sırasında tüm kesitinin izotermal sıcaklığa soğumuş olup olamayacağı önceden kontrol edilmiş olur.

3. OSTEMPERLEMİYİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Ostemperleme ısıı işleminin küresel grafitli dökme demirler üzerindeki başarılı uygulamaları, bu malzemelerin pekçok alanda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Ostemperleme ısıı işleminin boyunca meydana gelen oluşumlar araştırmalara konu olmuş, bu araştırmalar sonunda daha mükemmel yapılı ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir üretmek mümkün olmuştur.

Ostemperleme, dökümden ısıı işleme çok iyi kalite ve işlem kontrolü gerektiren bir süreçtir. Dökümün kalitesi, alaşım elementlerinin miktarı, alaşım elementlerinin segregasyonu, ostenitleme süre ve sıcaklığı, ostemperleme süre ve sıcaklığı, işleme tabi tutulan malzemenin boyutları ostemperlemeyi etkileyen parametrelerdendir.

3.1. Döküm Kalitesi ve Alaşım Elementlerinin Segregasyonunun Etkisi

Ostemperleme ısıı işlemine tabi tutulacak olan küresel grafitli dökme demir malzeme, ne kadar temiz ve homojen olursa, ısıı işlem şartlarının etkisini kontrol etmek ve sonuçta elde edilecek olan mekanik özellikleri iyileştirmek o kadar kolay olur.

Özellikle kalın kesitli parçalarda, ostemperleme sonucu beynit oluşumunu teşvik etmek için alaşım elementleri kullanılır. Alaşım elementlerinin segregasyonu ise yapının kırılabilirliğinin artmasına ve mekanik özelliklerinin kötüleşmesine neden olur (Morgan, 1987).

KGDD malzemenin katılaşması sırasında Cr, P, Mn ve Mo alaşım elementleri tane sınırlarında segregasyona neden olurlar (Morgan, 1987). Kesit kalınlaştıkça soğuma hızı düşeceği için segregasyon artar. Yapıda P miktarı çoksa fosfür/karbür kompleksinin artması ve martenzit oluşumunun teşvik edilmesi söz konusu olur. Bu olay özellikle sünekliğin azalmasına ve genel mekanik özelliklerin kötüleşmesine neden olur (Dorazil, 1991; Morgan, 1987). Alaşım elementlerinin segregasyonu, yapıdaki küresel grafit

sayısını artırarak azaltılabilir. Etkin bir inokülasyon işlemiyle, ostemperleme sonucu özellikler iyileştirilmiş olur.

Küresel grafitli dökme demirin özellikleri, mikroyapısından büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu malzemelerde mikroyapı üç temel unsurdan oluşur:

- Matris yapının fazları ve dağılımı,
- Grafit tanelerinin boyutu, şekli ve sayısı,
- Döküm sonrası yapıda oluşan hatalar (Karbürler, segregasyonlar, mikro gözenekler, v.s.)

Bu nedenle küresel grafitli dökme demirler, çok çeşitli mikroyapılarda üretilirler. Bunlar düşük mukavemetli ferritik yapılar, veya ostemperlenmiş yüksek mukavemetli beyritik yapılar olabilir. Bu malzemelerde matris yapının oluşumu ve sonuç özellikleri soğuma hızı, alaşım elementi cinsi ve miktarıyla yakından ilgilidir (Faubert, et.al., 1990).

Küresel grafitli dökme demirlerde, grafitin şekli nedeniyle darbe etkisi ve yorulma direnci gri dökme demire ve diğer grafitli dökme demirlere göre daha yüksektir. Matris yapının içeriği mekanik özellikler üzerine çok daha büyük etki yapar. Bu nedenle alaşım elementlerinin yapıda homojen olarak bulunması ve segregasyonun olmaması istenir. Yapılan araştırmalar bu konuyu destekler niteliktedir.

Alaşım elementi içeren demir-karbon sistemlerinde, bir taraftan sıvı fazdan katı faza geçiş sırasında gerekli enerji ihtiyacı, diğer taraftan karbonun termodinamik aktivitesiyle, alaşım elementlerinin arasındaki ilişki, alaşım elementlerinin segregasyonunu artırır. Buna rağmen katılaşma sırasında tüm alaşım elementlerinin segregasyonunu kabul edemeyiz. Fakat segregasyonun başlaması hem katılaşma sırasında hem de sıvı faz içinde sıvı ve katı çözelti arasındaki dengenin termodinamiğine bağlıdır (Morgan, 1987).

Yapıdaki bazı alaşım elementleri, yapıda daha kolay segregel olurlar, dolayısıyla bu alaşım elementlerinin iyi kontrol edilmesi gerekir. Özellikle yavaş soğumanın gerçekleşeceği büyük kesitli parçalarda Mn gibi, tane sınırlarında kolay segregel olan elementlerin kullanılmaması tercih edilmelidir (Gagne, 1985).

Genel bir ifadeyle, Fe-Y alaşımını göze alarak konuyu değerlendirebiliriz. Y hem katı hemde sıvı faz içinde sınırsız çözülebilir olsun. İki faz arasındaki denge şartlarında, sabit sıcaklık ve sabit basınç altında, Y alaşım elementinin katı ve sıvı faz içindeki serbest molar entalpilerinin eşit olduğu söylenebilir (Dorazil, 1991).

$$G_Y^L = G_Y^S \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Bu ifade yeniden düzenlenirse;

$${}^0G_Y^L + RT \ln \alpha_Y^L = {}^0G_Y^S + RT \ln \alpha_Y^S \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

${}^0G_Y^L, {}^0G_Y^S$: Y elementinin sıvı ve katı fazdaki serbest molar entalpisi

α_Y^L, α_Y^S : Y elementinin sıvı ve katı fazdaki termodinamik aktivitesidir.

$\alpha_Y = \gamma_Y \cdot X_Y$ kabul edilirse, 2 nolu eşitlik şöyle yazılabilir;

$${}^0G_Y^L + RT \ln \gamma_Y^L + RT \ln X_Y^L = {}^0G_Y^S + RT \ln \gamma_Y^S + RT \ln X_Y^S \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ve buradan;

$$RT \ln \frac{X_Y^L}{X_Y^S} = {}^0G_Y^S - {}^0G_Y^L + RT \ln \frac{\gamma_Y^S}{\gamma_Y^L} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

yazılır. Bu eşitlikte;

X_Y^L, X_Y^S : Y elementinin katı ve sıvı mol kesri,

γ_Y^L, γ_Y^S : Y elementinin sıvı ve katı fazdaki aktivite katsayısıdır.

Bu eşitlikte segregasyonun başlamasını ifade eden en önemli terim,

$$RT \ln \frac{X_Y^L}{X_Y^S}$$

dir. Bu ifade, Y elementinin sıvı fazdan katı faza geçişte atomlarının transferi için gerekli enerji miktarını ifade eder. Bu değer in büyüklüğü, katı ve sıvı fazdaki Y elementinin denge konsantrasyonu ile hesaplanabilir. Bu ifadenin daha geniş yazılımı;

$$RT \ln \frac{X_Y^L}{X_Y^S} = \Delta G_Y^{L \rightarrow S} \dots\dots\dots (3.5)$$

şeklinde dir.

Sıvı fazdan katı faza geçişte, karbonun transferi için gerekli enerji miktarı, fosfor ve kükürt dışındaki tüm elementlerde fazladır. Karbon sıvı faz içinde konsantre olur ve termodinamik aktivitesine bağlı olarak alaşım elementlerinin dağılmasını sağlar. Sıvıdan katıya daha enerjik olarak transfer olan elementler, karbonun sıvı faz içindeki aktivitesinin artmasına neden olurlar. Si, Ni, ve Al bu tür elementlerdir. Mn, Mo, Cr ve V elementleri ise karbonun sıvı faz içindeki aktivitesini azaltıcı yönde etki yaparlar (Dorazil, 1991). Karbonun sıvı faz içerisindeki aktivitesini azaltıcı yönde etki yapan elementler, katılaşma sırasında özellikle tane sınırlarında segregasyon olurlar. Bu tarz elementler, ostemperleme sırasında, ostenitin dengeli konuma gelmesi için ostenitleme boyunca yeterince karbon çözünmesine engel olurlar (Gagne, 1985).

3.2. Ostenitleme ve Ostemperleme Şartlarının Etkisi

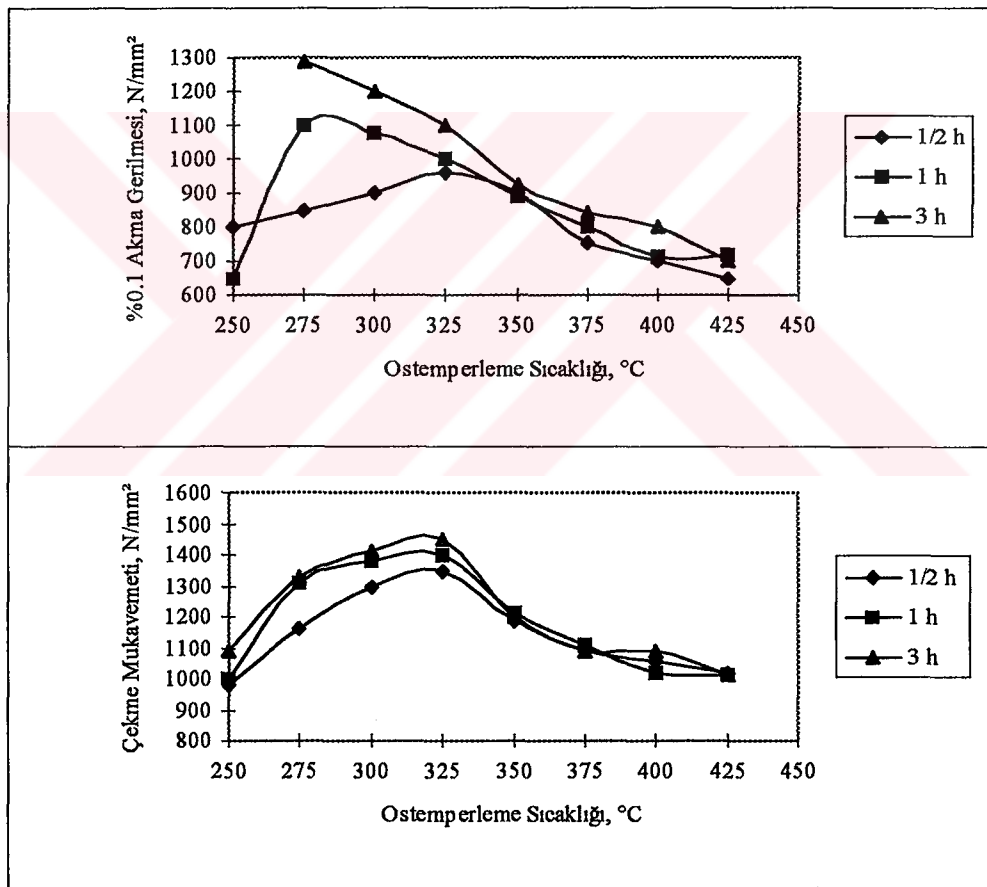
Ostemperleme sonucu tatmin edici mekanik özellikler elde edebilmek için, ısı işlem şartları da döküm şartları gibi oldukça iyi kontrol edilmelidir.

Ostenitleme sıcaklığı, ostemperlenmiş demirin mekanik özelliklerini ve yapısını doğrudan etkileyen ostenitin karbon oranı üzerinde etkilidir. Ostenitleme sıcaklığı arttıkça, ostenitin karbon oranı artar ve ostenitlenecek parça yüksek sıcaklıkta yeterli bir süre tutulursa, ostenitin arzu edilen karbon oranına ulaşılır (Gagne, 1985; Morgan, 1987). BCIRA'da yapılan araştırmalar sonucunda çekme mukavemeti ve süneklik için en mükemmel kombinasyonun 900-925°C sıcaklıklar arasında 1-3 saat ostenitleme olduğu gözlemlenmiştir (Harding and Gilbert, 1986). Ostenitleme sıcaklığı ve süresinin sözü geçen miktarlarında optimum özellik kombinasyonunu sağlamak mümkündür. Ostenitleme süresinin artmasıyla ostenitin karbon oranının artmasının yanında ayrıca mikro segregasyonlarda giderilmiş olur (Dorazil, 1991). Ostenitleme şartları işleme tabi tutulan dökme demirin başlangıç mikroyapısından da etkilenir. Başlangıçta matris yapı ferritik ise ostenitleme süresi daha uzun olmalıdır. Perlitik durumda ise süre daha kısa tutulabilir.

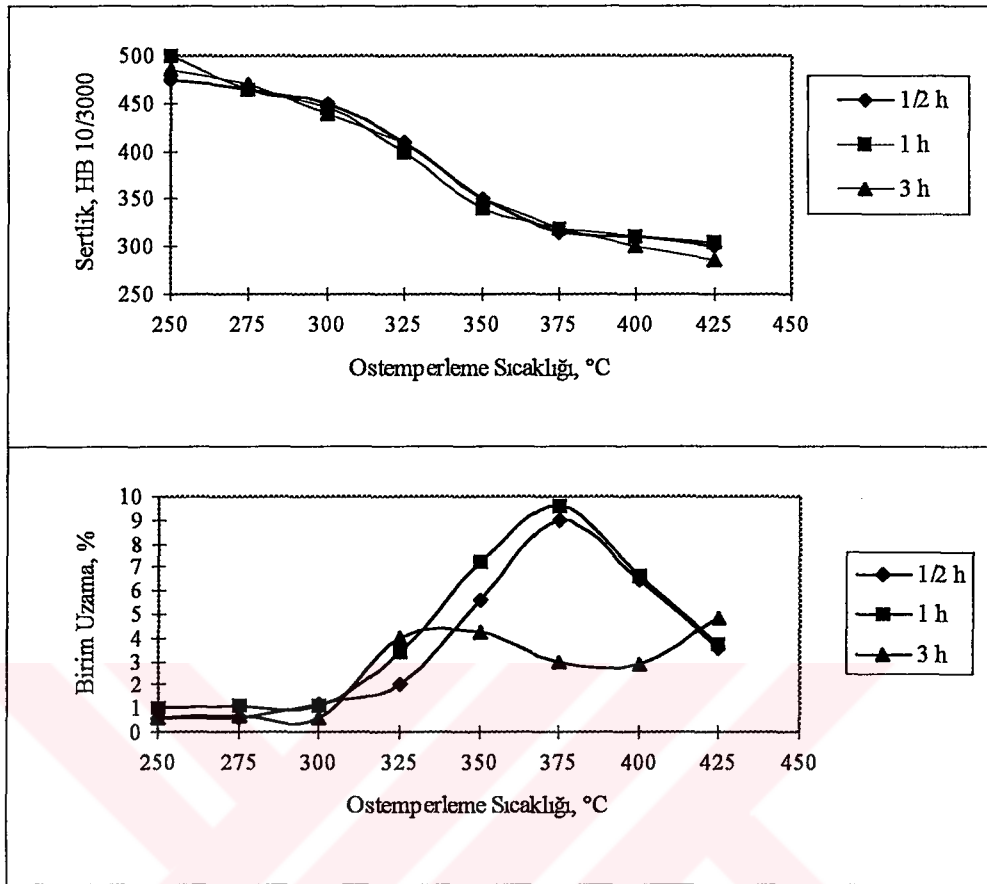
Eğer yapıda yeterince alaşım elementi varsa ostenitleme sıcaklığı 850°C civarında olabilir. 925°C'nin üzerindeki ostenitleme sıcaklıklarında, izotermal bekleme sıcaklığına hızlı soğutma sırasında yapıda bir miktar martenzit oluşabilir. Bu oluşum sünekliğin azalmasına neden olur. 900°C sıcaklığın altında ise malzemenin yapısına bağlı olarak ostenitleme tamamlanamayabilir. Bu ise tüm özelliklerde genel bir kötüleşmeye neden olacaktır. Bu nedenle ostenitleme 900°C civarında yeterince uzun bir süre yapılmalıdır (Morgan, 1987).

KGDD lerde ostemperleme şartlarının mekanik özelliklere etkisi Şekil 3.1 ve 3.2'de verilmiştir. 2. bölümde bahsedildiği gibi, ostemperleme sonucu elde edilecek yapı, ostemperleme sıcaklığından doğrudan etkilenir. 235-330°C sıcaklıklar arasında alt beynitik yapı 370-450°C sıcaklıklar arasında ise üst beynitik yapı oluşur. 330-370°C sıcaklıklar arasında oluşan beynit ise, her iki türden farklıdır. Bu tür beynitik yapının mekanik özellikler üzerine etkisi daha farklı olacaktır. En büyük çekme gerilmeleri 275-

325°C sıcaklıklar arasında elde edilir. Bu oluşuma sürenin doğrudan bir etkisi yoktur. Bu aralıkta oluşan beynitik yapının sünekliği ise genel olarak düşüktür. Süneklik üzerine en büyük etki ostemperleme süresinden gelir. Özellikle ostemperleme ısı işlem penceresi içinde durdurulan ve havada soğutulan numunelerde alt beynitik yapılarda oluşabilecek en büyük süneklik değerlerine ulaşılır. Üst beynitik yapılarda çekme mukavemeti daha düşüktür, fakat süneklik genel olarak yüksektir. Süneklik üzerine sürenin etkisi bu yapılarda, alt beynitik oluşumda olduğu gibidir. Üst beynitik oluşumlarda da en büyük süneklik değerleri ısı işlem penceresi içinde deneyi tamamlanan numunelerde elde edilmiştir (Morgan, 1987).



Şekil 3.1: OKGDD'lerde ostemperleme sıcaklığı ve süresinin akma ve çekme mukavemetine etkisi (Morgan, 1987).

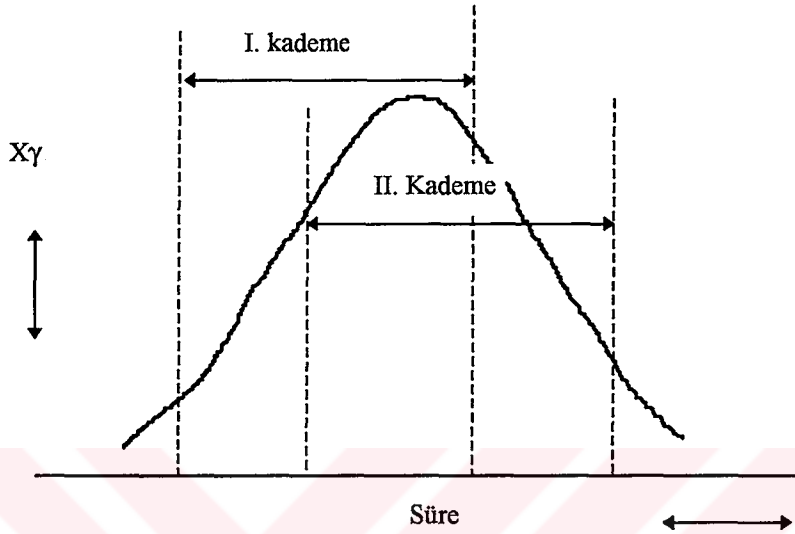


Şekil 3.2: OKGDD'lerde ostempereleme sıcaklığı ve süresinin sertlik ve birim uzamaya etkisi (Morgan, 1987).

Ostenitleme sıcaklığı ve süresi de ostempereleme sonuçları üzerinde oldukça etkilidir. 2. bölümde proses penceresi anlatılırken değinilen %90 ostenit hattı, ostenitleme sıcaklığı düşüğe, yukarı çıkar ve sonuçta ostenitin hacimsel miktarı ile ostempereleme süresi arasında çizilen reel değişim eğrisindeki I. aşama ve II. aşama kesişim bölgesi daralır (Şekil 3.3) (Moore, et.al., 1986).

Ostempereleme işleminde izotermal bekleme sıcaklığı ve süresi ele alındığında oluşan mikroyapıların süre ve sıcaklıktan etkilendiği görülmektedir. Kısa ostempereleme süreleri sonunda yapıda bir miktar martenzit oluştuğu gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak bazı ostenit bölgelerine^d yeterince karbon çözünmemiş olması ve bu nedenle beynitik dönüşümün bu kısımlarda uzun süreler gerektirmesi gösterilmektedir. Ostempereleme süresi arttıkça karbon difüzyonu nedeniyle, martenzit oluşumu azalır. Şekil 3.4'de bu

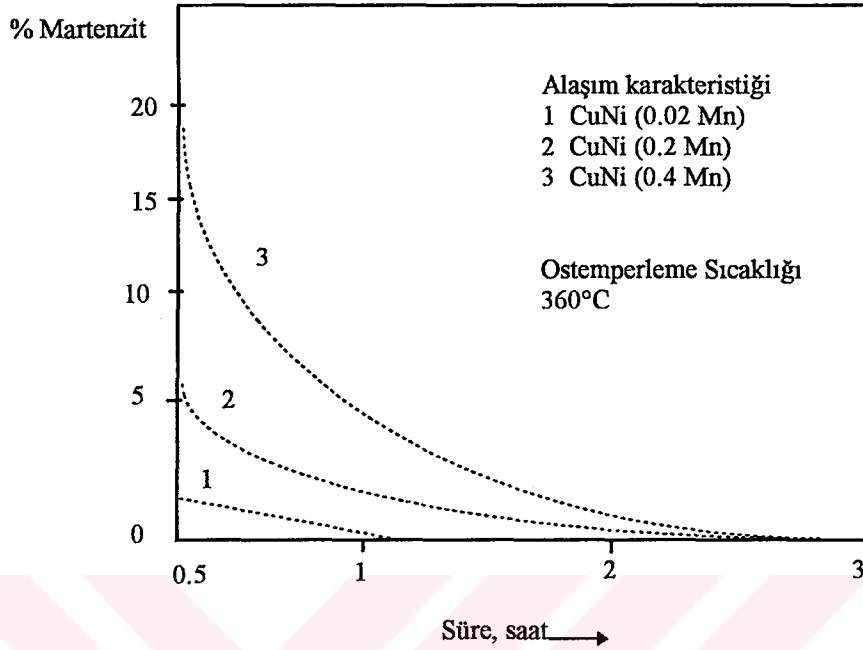
durum farklı Cu-Ni alaşımlarındaki dökme demirler için şematize edilmiştir. Mn içermeyen dökme demirlerde yapılan çalışmalarda ostemperlemenin 1. saatinden sonra yapıda martenzit oluşmadığı gözlenmiştir (Viau, et.al., 1987).



Şekil 3.3: Hacimsel ostenit miktarı ve ostemperleme süresi arasındaki reel ilişki (Moore, et.al., 1986).

3.3. Kimyasal Bileşimin Etkisi

Kimyasal bileşim ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin yapısında önemli rol oynar. Başlangıçtaki kimyasal bileşim, istenen sonuç özelliklere uygun olarak seçilmeli ve karbür içermeyen bir döküm yapısı elde edilmelidir. Eşdönüşümlerin sağlanmasıyla segregasyon minimum olmalıdır. Beynitik dönüşümün ikinci reaksiyonundan kaçınmak için proses penceresini büyüten alaşım elementleri tercih edilmelidir. Özellikle Ni ve Mo alaşım elementleri, ikinci reaksiyonu geciktiren ve proses penceresini genişleten elementlerdir (Darwish and Elliott, 1993). Aşağıda alaşım elementlerinin etkileri ele alınmıştır.

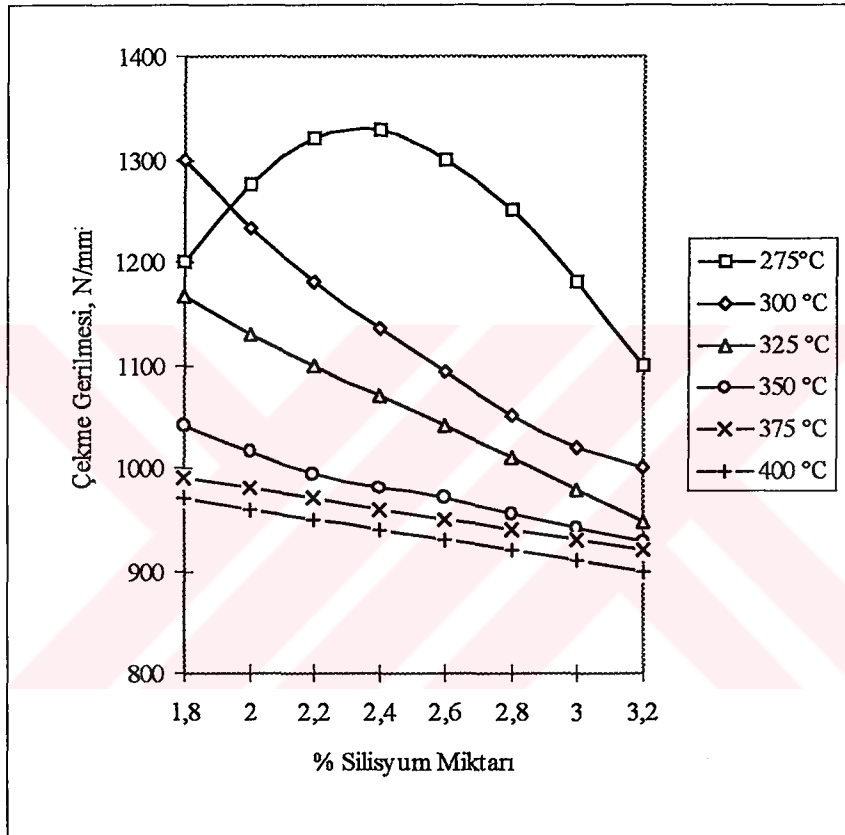


Şekil 3.4: 2.5 cm çaplı CuNi alaşımlı çubukta, 360°C ostemperleme sıcaklığında, ostemperleme süresine bağlı olarak oluşan martenzit miktarı (Viau, et.al., 1987).

Karbon: Karbon oranının %3-4'lere artması, ostemperleme sonucu elde edilecek çekme mukavemetini artırır. Süneklik azalır, sertlik ise değişmez (Morgan, 1987).

Silisyum: Yapıda bulunan Si miktarı %1.8-3.2 arasında olabilir. Si arttıkça çekme mukavemeti azalır. Buna rağmen süneklikte bir iyileşme olmaz. Sertlik ise değişmez. Şekil 3.5'de Si miktarının süneklik ve çekme mukavemeti üzerine etkisi çeşitli ostemperleme şartlarına bağlı olarak verilmiştir. Si miktarının artmasıyla çekme mukavemetinin azalması, Si arttıkça pro-ötektoid ferrit ve perlitin su verme ve ostemperleme boyunca oluşumunu desteklemesi nedeniyledir. Ferrit ve perlitin yüksek Si içeriği ile meydana gelen bu oluşumunu önlemek için alaşım elementi ilavesi yoluna gidilmelidir (Gagne, 1985; Morgan, 1987).

Yapılan çalışmalar Si miktarının kırılma tokluğu üzerinde büyük etkisinin olduğunu göstermiştir. Si miktarı %2.6-3 arasındayken çatlak başlama aralığı, δ_c , ve kırılma tokluğu yüzey gerilimi, K_{Ic} , %12-23 artmaktadır (Morgan, 1987). Bunun bir sebebi, yüksek Si içeriğinin Mn'nin oluşturduğu etkileri gidermesinden dolayıdır (Gagne, 1987).



Şekil 3.5: 275-400°C sıcaklıklar arasında 1 saat ostemperlenmiş malzemelerde Si miktarının çekme mukavemeti üzerine etkisi (Morgan, 1987).

Kırılma tokluğundaki bu artışın ostemperleme sonucu yapıda kalan kalıntı ostenitten dolayı olduğu da saptanmıştır (Dorazil, 1991).

Dorazil ve Luyendijk, Si miktarının artmasıyla darbe direncinde arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca Luyendijk, Si miktarının %1.87'den %2.4'e kadar artmasıyla darbe geçiş sıcaklığının -10°C'den -80°C'ye indiğini belirlemiştir.

Günümüze kadar yapılan çalışmalar, yüksek Si içeriğinin avantaj olduğunu göstermektedir. Pro-ötektoid ferrit ve perlit oluşumundan su verme sırasında kaçınmak için ise alaşım elementleri kullanılmalıdır. Ayrıca yüksek Si içeriği ötektik karbür oluşumunda engeller. Si miktarı üzerine yapılan çalışmalar %2.5-2.9 arasındaki miktarın eniyi sonuçları verdiğini göstermiştir.

Mangan: Mn miktarındaki artış KGDD'in sertleşebilme yeteneğini artırır. Mn miktarındaki artışın, ostemperleme sonucu elde edilecek çekme mukavemetini azalttığı görülmüştür. Sertlik üzerinde ise büyük bir etkisi yoktur (Morgan, 1987).

Mn'ın ötektik tane sınırlarında segregasyonu ve yapısal heterojenlikleri artırması, ostenitin bu kısımlarda dönüşümünün gecikmesine neden olur. Bu bölgelerde, sertliğin düşmesi ve malzemenin çekme mukavemetinin azalması bu nedenledir. Tane sınırlarında oluşan ostenit, Mn karbon çözünmesine engel olduğu için, dengeli değildir, ancak yüksek karbon içeriği ile bu bölgelerdeki ostenit dengelenebilir. Böylece Ms sıcaklığı 150°C seviyesine çekilebilir, bu da, ostemperleme ısı işleminden sonra tane sınırlarında kalan kalıntı ostenitin martenzite dönüşmesine neden olur. Martenzit oluşumu ise yorulma mukavemetini ve kırılma tokluğunu olumsuz yönde etkiler. Dorazil Mn miktarındaki artışın, segregasyonu artırdığını ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin kötüleştiğini iddia etmektedir (Dorazil, 1991).

Mn miktarı kesite bağlı olarak, kesit büyüdükçe özellikle tane sınırlarında daha kolay segregasyon olan bir elementtir. Bu nedenle, büyük kesitli parçalarda özellikle soğuma hızının artırılmasıyla bu segregasyon azaltılmış olur (Gagne, 1985).

Dorazil OKGDD'lerde Mn miktarının %0.6 civarında olmasını önermektedir. Karbür ve martenzitin ferrit plakaları arasında oluşumu ve dağılımı beynitik matriste sünekliği azaltır. Bu oluşumun temel nedeni yapıdaki yüksek Mn içeriğidir. Benzer gözlemler Harris ve Maitland tarafından da yapılmıştır. Onlar da OKGDD'lerde Mn miktarının en fazla %0.5 olması gerektiğini iddia etmişlerdir. Tüm gözlemler ince kesitli malzemeler üzerinde yapılmıştır. Kalın kesitli parçalarda ise soğuma yavaş olacağından,

segregasyon daha kolay olacaktır. Bu yüzden Mn miktarı kalın kesitli parçalarda %0.3'ü geçmemelidir (Gagne, 1985; Morgan, 1987).

Bakır: %1.5'un üzerinde katılan bakırın, 325-400°C sıcaklıklar arasında yapılan ostemperleme işlemlerinde çekme mukavemeti ve sertlik üzerine etkilerinin olduğu gözlenmiştir. Ostemperleme sıcaklığı 325°C'in altında ise süneklik Cu miktarı arttıkça artar. Fakat yüksek ostemperleme sıcaklıklarında Cu miktarının süneklik üzerine bir etkisinin olmadığı görülmektedir. OKGDD'lerde Cu kalıntı ostenit miktarı üzerine etki yapmamaktadır. 325°C'in altındaki işlemlerde bakırın karbür oluşumunu engellediği, bu yüzden sünekliği artırdığı bilinmektedir (Morgan, 1987).

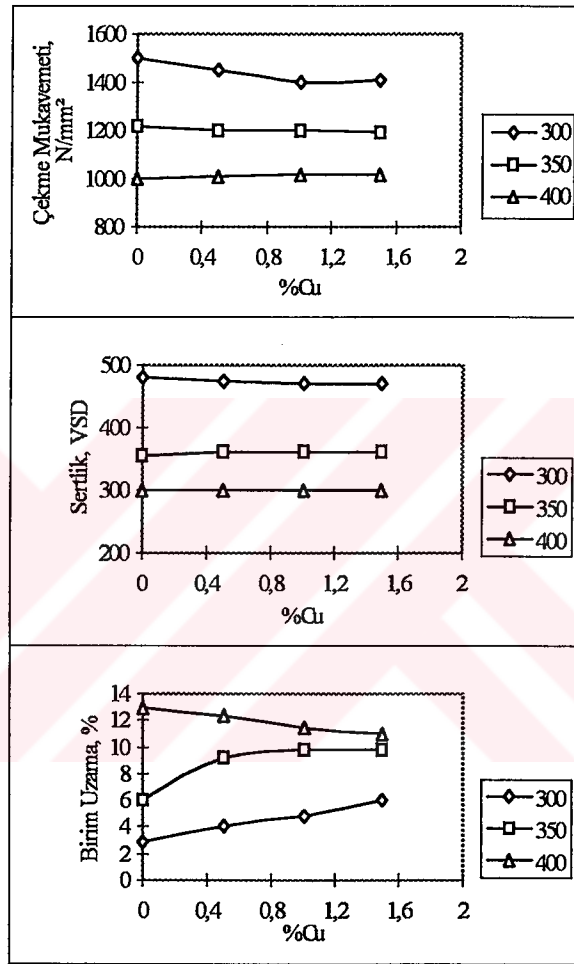
Ostemperleme ısıl işlemi sonunda optimum mekanik özellikler, %60-80 beynit, %20-40 kalıntı ostenit içeriğinde elde edilmektedir. Dorazil, %0.74-1.58 Cu içeren numuneler üzerinde yaptığı deneylerde, bakırın ostemperleme süresine bağlı olarak, çekme mukavemeti, birim uzama, sertlik ve kalıntı ostenit üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bakır miktarının artması çekme mukavemeti ve sertlik üzerinde belirgin değişimler yapmazken, birim uzama miktarını arttırmaktadır (Şekil 3.6) (Dorazil, et.al., 1982).

Nikel: %1'in altındaki Ni miktarının çekme mukavemeti, sertlik ve süneklik üzerine 300-400°C sıcaklıklar arasında yapılan ostemperleme işlemlerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Fakat Ni içeriği %1- 4 arasındayken 350°C'in altındaki ostemperleme işlemlerinde çekme mukavemetinin belirgin olarak düştüğü görülmektedir. %3.82 Ni içeren OKGDD'in özellikleri Şekil 3.7'de verilmiştir (Morgan, 1987; Dorazil, et.al., 1982).

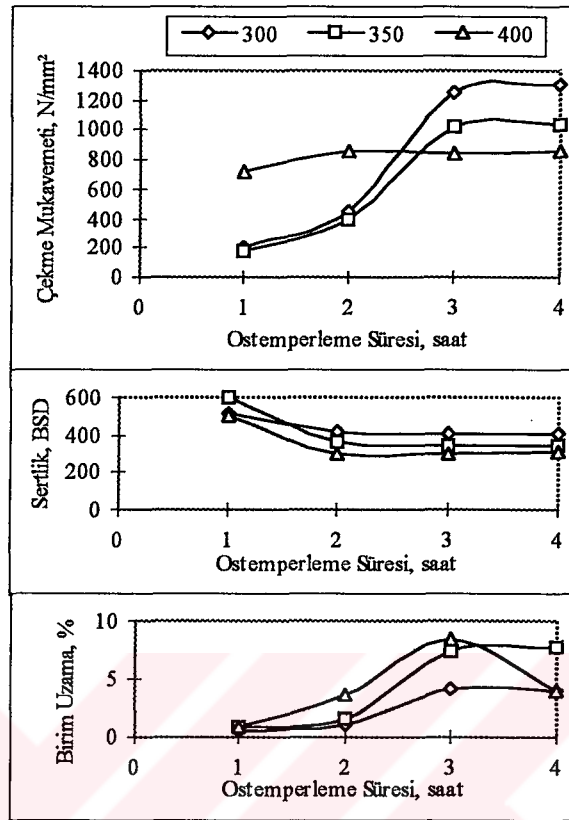
Alt beynitik yapılarda Ni, Cu'a benzer olarak karbür oluşumunu engeller. %2'nin üzerindeki Ni miktarlarında, segregasyonlar nedeniyle, havada soğutma sonucu martenzit oluşumu artar, bu da sünekliğin düşmesine neden olur (Viau, et.al., 1987).

Molibden: Mo miktarı arttıkça, çekme mukavemeti, sertlik ve süneklik azalır. %0.2'nin üzerindeki Mo içeriklerinde Mo tane sınırlarında segregasyon olur ve bu bölgelerde karbür oluşumunu teşvik eder. Mo, Mn ile benzer etkiler gösterir. Buna ek olarak Mo

sertleşebilme kabiliyetini artırır ve beynitik dönüşüm sıcaklığını (B_s) yükseltir (Morgan, 1987).

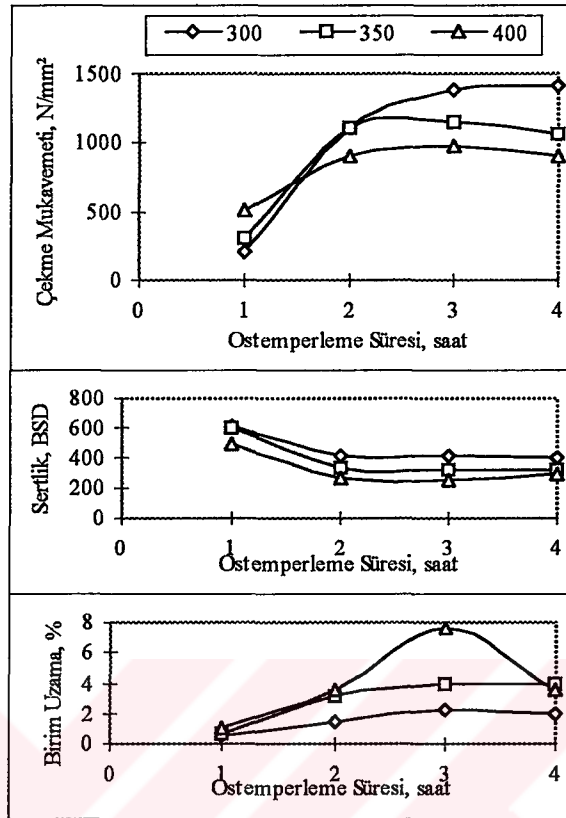


Şekil 3.6: OKGDD'lerde mekanik özelliklerin bakır miktarıyla değişimi (Dorazil, et.al., 1982).



Şekil 3.7: Ostempirleme sıcaklığı ve süresinin %3.82 Ni içeren KGDD’de çekme mukavemeti, sertlik, ve birim uzama üzerine etkisi (Dorazil, 1991).

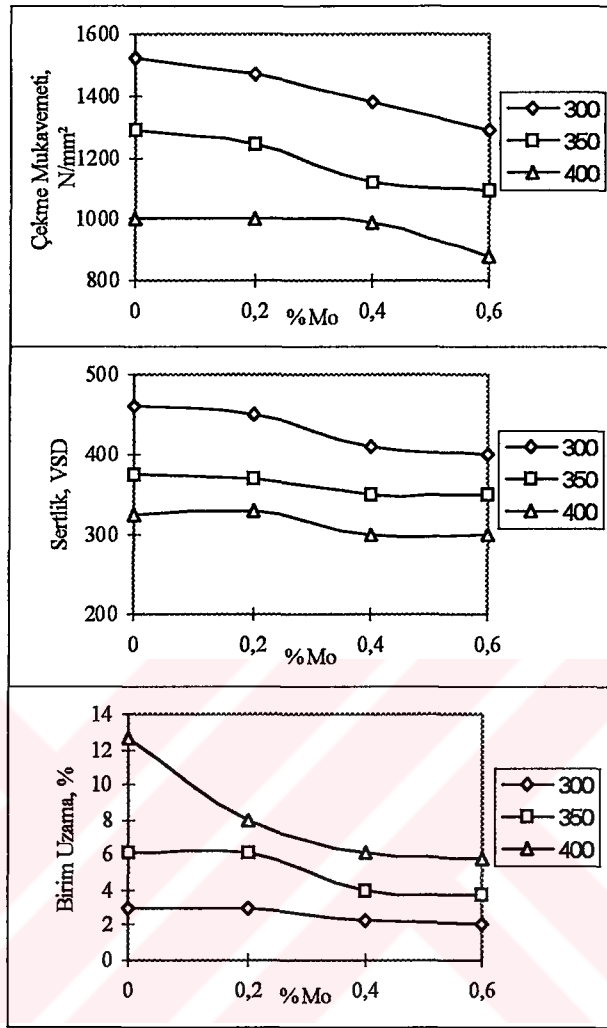
Şekil 3.8’de %0.36 Mo alaşım elementi içeren demirin ostempirleme süresine bağlı olarak sertlik, çekme mukavemeti, birim uzama ve kalıntı ostenit miktarındaki değişim şematize edilmiştir. Şekil 3.9’da Mo miktarına bağlı olarak çekme mukavemeti, birim uzama ve sertlik değişimleri şematize edilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi Mo alaşımli küresel grafitli dökme demirlerde, ostempirleme ısıl işlemi sonucu mekanik özelliklerin optimum değerleri kalıntı ostenitin en büyük olduğu yerlerde elde edilmektedir (Dorazil, Barta, et.al., 1982).



Şekil 3.8: Ostemperleme sıcaklığı ve süresinin %0.36 Mo içeren KGDD'de çekme mukavemeti, sertlik, ve birim uzama üzerine etkisi (Dorazil, et. al., 1982).

Krom ve Fosfor : Cr ve P ötektik tane sınırlarında kolaylıkla segregasyon alan elementlerdir. Bu nedenle tane sınırlarında karbür, fosfür ve karbür-fosfür komplekslerinin oluşumuna neden olurlar. Bu oluşumlar mekanik özellikleri kötü yönde etkiler. Bu etkiden korunmak için yapıdaki Cr ve P miktarının %0.05'in altında olması istenir (Morgan, 1987).

Küresel grafitli dökme demirlerde sertleşebilirliği olumlu yönde etkileyen elementler Cu, Ni ve Mo'dur. %0.3'lük Mo ilavesi, ostemperlenebilecek çap değerini ikiye katlar. Bu konuda Cu, Mo kadar etkin değildir. %1.5 Cu ilavesi ancak %0.3 Mo ilavesine eşdeğer etki yapar. Fakat yüksek Ni ilavesi Cu'dan daha etkindir. Sertleşebilirlik üzerine bakırın etkisi %1.5'dan sonra fazla değildir. Sertleşebilirlik üzerine alaşım elementlerinin etkileri Şekil 3.10'da gösterilmiştir (Lee, 1989).

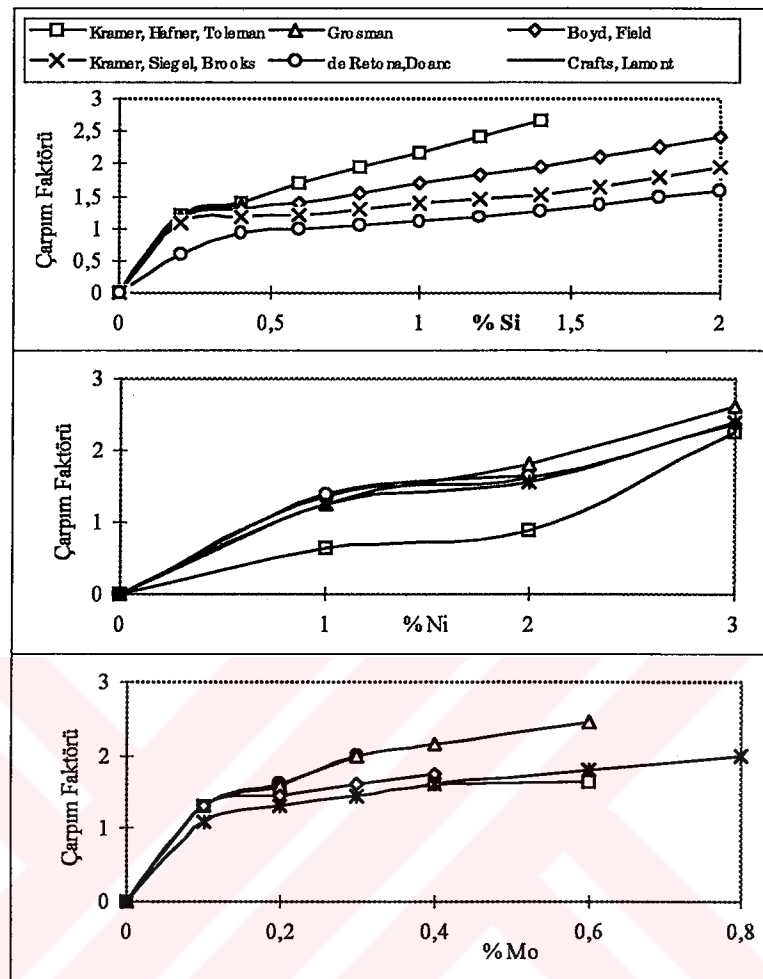


Şekil 3.9: OKGDD'lerde Mo içeriğine bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi (Dorazil, et.al., 1982).

Mn sertleşebilirliği artıran daha ucuz bir alaşım elementidir. Fakat tane sınırlarında daha kolay segregasyon olması nedeniyle kırılabilirliği artırdığından tercih edilmez.

Ostempereleme sonucu istenen özelliklere ulaşabilmek için alaşım elementlerinin etkileri çok iyi gözden geçirilmeli ve istenen özellikleri verebilecek miktarlar titizlikle seçilmelidir.

Tüm alaşım elementlerinin belli kombinasyonlarda yapıya ilavesinin, mekanik özelliklere ne tür etkiler yaptığı konusunda yapılmış birçok çalışma olmasına rağmen henüz yeterlilik sağlanamamıştır. Konunun bu kısmı henüz açıktır.



Şekil 3.10: KGDD'lerin sertleşebilirliği üzerine alaşım elementlerinin etkisinin çarpım faktörü üzerindeki etkisi (Lee, 1989).

4. OSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÖZELLİKLERİ

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini tesbit etmek üzere yapılmış çalışmalar, bu malzemelerin aynı matris yapıdaki çeliğe göre daha mukavim olduğunu göstermiştir. Bu durum OKGDD malzemeleri mühendisler için ilgi çekici malzemeler haline getirmektedir.

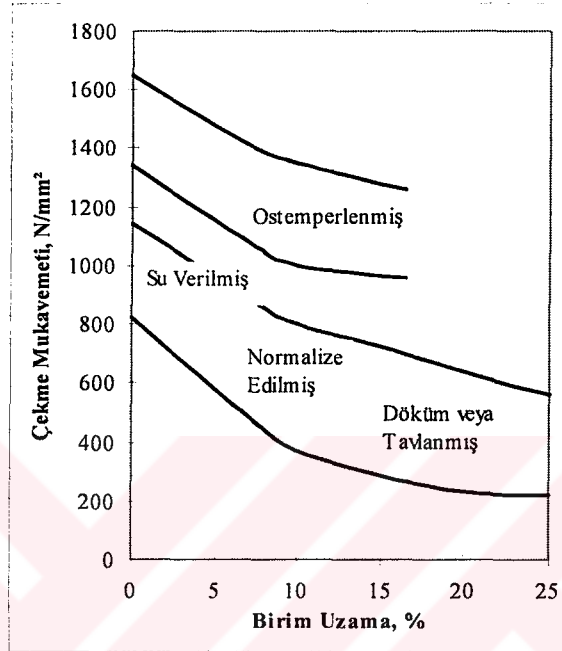
OKGDD malzemelerin mekanik özellikleri, üretimden ısıl işleme birçok etki altındadır. Döküm sırasında yapıya katılan alaşım elementleri, bu elementlerin segregasyona yatkın olup olmaması, ısıl işlemin yapılış şekli, parçanın boyutları sonuç mekanik özellikleri doğrudan etkileyen parametrelerdir.

Üçüncü bölümde, OKGDD'leri etkileyen parametreler ele alınmıştır. Bu bölümde ise özellikle mekanik özelliklerin ostemperleme şartlarıyla nasıl değişim gösterdiği, OKGDD'lerin avantajları, kullanım yerleri ve teknolojik önemleri ele alınmıştır.

4.1. Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri

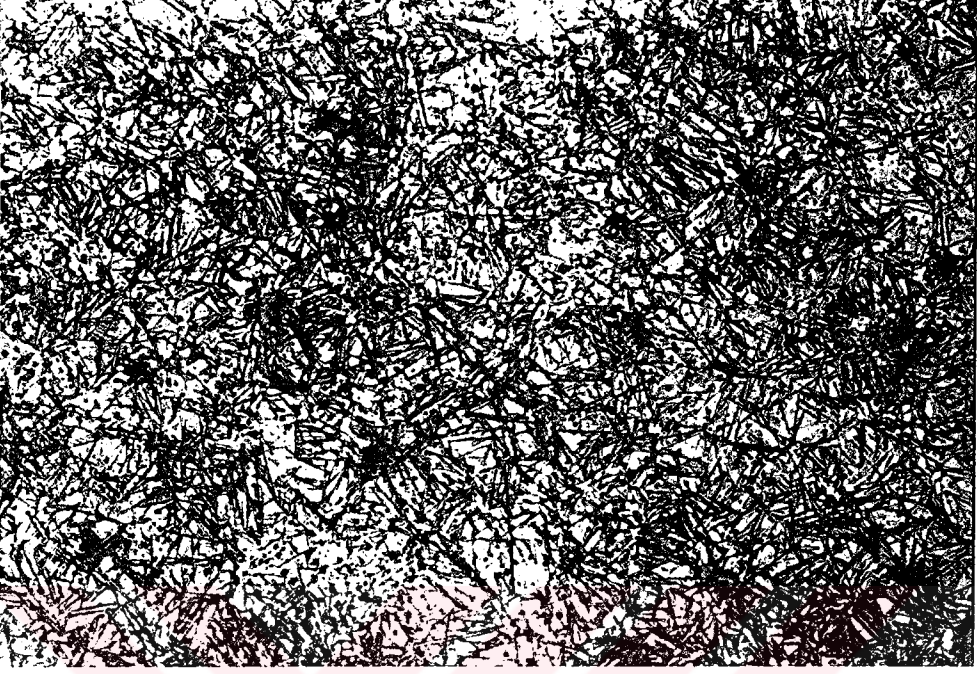
OKGDD'ler dökme demirler içinde en büyük mukavemete sahip malzemelerdir. Şekil 4.1'de OKGDD'lerin KGDD'lerle çekme mukavemeti mukayesesi yapılmıştır (Morgan, 1987).

OKGDD'lerde mekanik özellikler elde edilen yapıya ve işlem parametrelerine göre değişim gösterir. Alt beynitik yapılarda (Şekil 4.2) 500 VSD'nin üzerinde sertlik, 1200-1600 N/mm² arası çekme mukavemeti ve %1-3 kopma uzaması elde edilirken, üst beynitik yapılarda (Şekil 4.3) 280-320 BSD sertlik, 900-1050 N/mm² çekme mukavemeti ve %6-12 kopma uzaması elde edilebilmektedir (Harding and Gilbert, 1986).

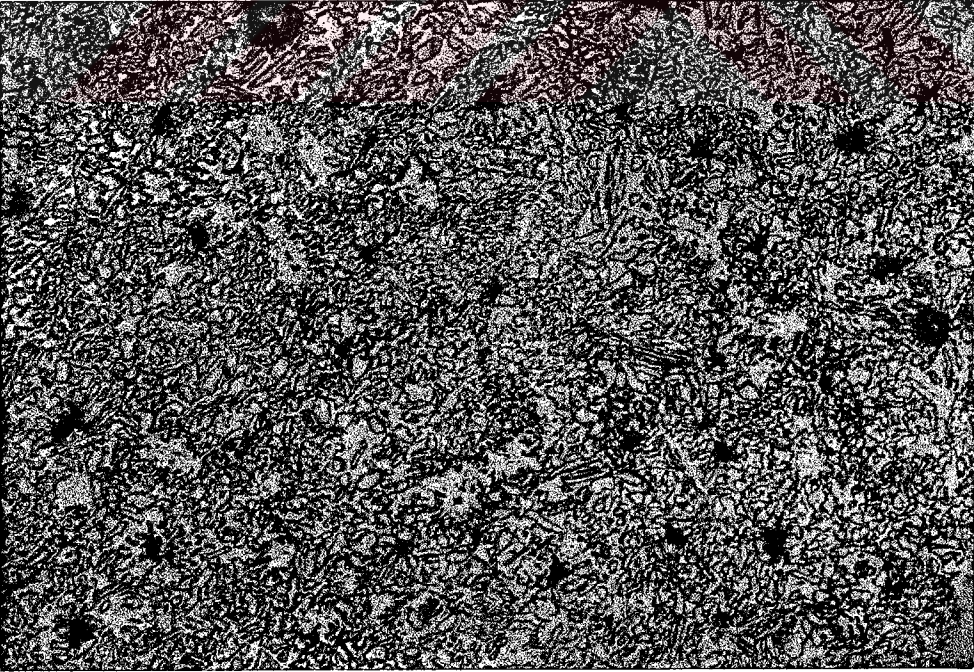


Şekil 4.1: KGDD'lerde çekme mukavemeti uzama ilişkisi (Morgan, 1987).

Harding, Gilbert, Janowak ve Dorazil yaptıkları çalışmalarda alt beynitik oluşumlarda elde edilen mekanik özelliklerin, üst beynitik oluşumlardan farklı olduğunu savunmuşlardır. Onlara göre, KGDD ostemperlendiği zaman, yapıda alaşım elementi olsun veya olmasın, alt beynitik oluşumlarda yüksek mukavemet düşük süneklik, üst beynitik oluşumlarda ise düşük mukavemet yüksek süneklik elde edilmektedir. Fakat bu görüşe karşı fikirlerde ortaya atılmıştır. Örneğin Hitchcox, 1986'da yaptığı çalışmada, yüksek performans dişlisi olarak kullandığı OKGDD'lerde, yüksek ostemperleme sıcaklıklarında, düşük ostemperleme sıcaklıklarına göre daha yüksek mukavemet elde ettiğini bildirmiştir (Hitchcox, 1986). Aynı şekilde Hamid, Uzlov, et.al., düşük Mn içeren KGDD'ler üzerinde yaptıkları çalışmalarda düşük ostemperleme sıcaklıklarında, mukavemetin belirgin olarak düştüğüne dikkat çekmişlerdir (Hamid, et.al., 1994).



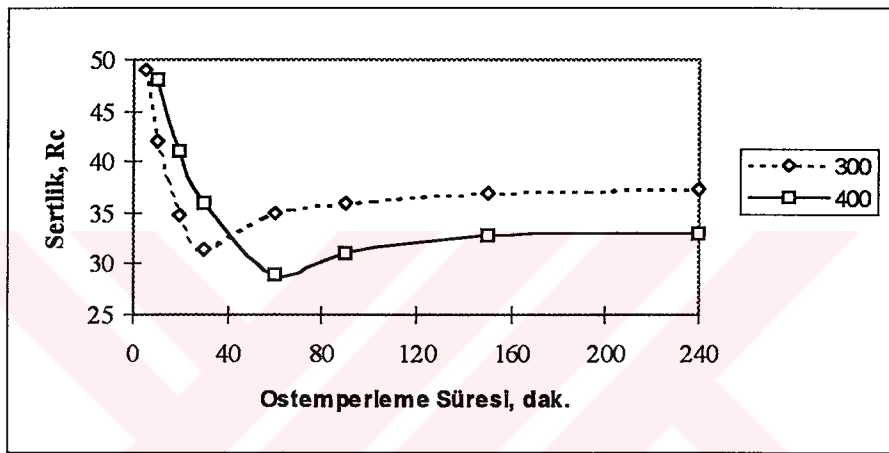
Şekil 4.2: OKGDD'de alt beynitik yapı (%3 Nital, 200X).



Şekil 4.3: OKGDD'de üst beynitik yapı (%3 Nital 200X).

4.1.1. Çekme özellikleri

OKGDD'lerde elde edilen çekme mukavemeti değerleri, başlangıç matris yapısıyla aynı çeliklerden ve dökme demirlerden daha yüksektir. Juneja, %0.8 Cu, %0.55 Mn içeren KGDD'lerde, sertliğin çekme mukavemeti ile paralel değiştiğini belirtmiş ve ostemperleme sıcaklığında 400°C'den 300°C'ye azalmanın, ostenitin hacimsel miktarını artırdığını ve bunun da sertliği belirgin olarak iyileştirdiğini öne sürmüşlerdir (Şekil 4.4) (Juneja, et.al.,1989).



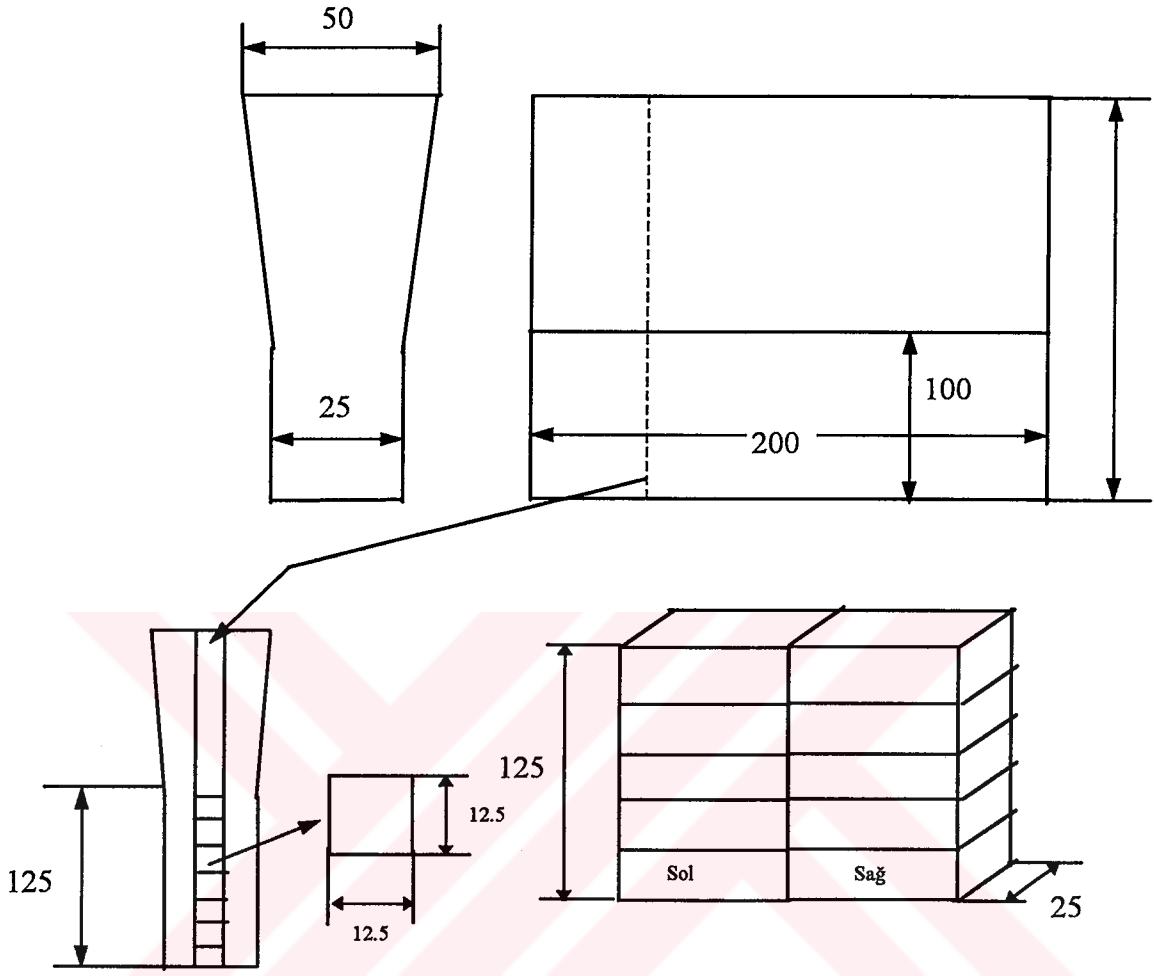
Şekil 4.4: %0.55 Mn, %0.8 Cu içeren KGDD'de sertliğin ostemperleme süresine ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi (Juneja, et.al.,1989).

Aynı şekilde Cu-Ni alaşımlı KGDD'lerin ostemperleme ısıl işlemi sonrası özelliklerini belirlemek üzere yapılan çalışmalarda, ostemperleme ısıl işlemiyle çekme özelliklerinin, parça boyutuna, ostemperleme sıcaklığına ve süresine bağlı olduğu görülmektedir. Ayrıca benzer çalışmalar kapsamında, çekme mukavemetinin, ne Ni ne de Cu miktarının bir fonksiyonu olmadığı, buna karşın başlangıç mikroyapıdaki ferrit miktarının çekme özellikleri üzerinde daha etkili olduğu belirtilmektedir. Tablo 4.1'de Cu-Ni alaşımlı KGDD malzemelerde elde edilebilecek en iyi çekme özellikleri verilmiştir. Tablo 4.1'deki veriler, Cu-Ni alaşımlı KGDD'lerde optimum çekme özelliklerinin 360°C de 2 saat ostemperleme sonucu elde edildiğini göstermektedir (Viau, et.al., 1987).

Tablo 4.1: 25 mm çaplı OKGDD lerin 2 saat 360°C’de ostemperlenmesi sonucu elde edilen çekme özellikleri (Viau, et.al., 1987).

Ostempereleme sıcaklığı/süresi °C/saat	Kimyasal Bileşim %	Kopma uzaması (%)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
360 / 2	Cu-Ni, 0.002 Mn	14	635	995
	Cu-Ni 0.4 Mn	10	607	987
	Ni-Mo 0.2 Mn	11	635	990
	1.48 Cu	5	725	1100
	0.6Cu-0.25Mn	9	700	1000
	0.96 Mn	3	620	970
310 / 2	Cu-Ni 0.02 Mn	7	860	1210
	Cu-Ni 0.4 Mn	6	775	1155
	Ni-Mo 0.2 Mn	6	890	1220

KGDD’lerin mekanik özellikleri, soğuma hızı ve matris yapısıyla yakından ilgilidir. Soğuma hızı arttıkça yapının perlitik olması çekme mukavemetini artıran unsurlar arasındadır. Ostempereleme sonuçları da başlangıç matris yapısından etkilenir. Şekil 4.5’deki Y-bloktan alınan numunelere uygulanan ostempereleme sonucunda, hızlı soğuyan kısımlardan alınan numunelerin başlangıç yapısının perlitik ferritik olduğu ve bu numunelerin ostempereleme sonucu çekme mukavemetlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna rağmen akma mukavemetinin belirgin bir değişim göstermediği gözlenmiştir (Hayrynen, et.al., 1992).



Şekil 4.5: 1" Y-Blok (Hayrynen, et.al., 1992).

Çekme özelliklerinden, kopmadaki birim uzamanın üst beynitik yapılarda (ostemperleme sıcaklığı 370-450°C) daha yüksek olduğu gözlenmektedir (Harding and Gilbert, 1986). Bu noktada gözardı edilmemesi gereken bir husus, ostemperleme süresinin etkisidir. Ostemperlemenin ikinci aşaması boyunca kırılabilirliğin artması sünekliği azaltır. Bu nedenle proses penceresi içinde en iyi birim uzama değerleri elde edilir (Darwish and Elliott, 1993).

4.1.2. Yorulma özellikleri

Moore, Rundman ve Hyrynen tarafından, oldukça temiz ferritik yapılı küresel grafitli dökme demirler üzerinde yapılan deneyler sonunda, ostemperlemeyle yorulma mukavemetinin çok iyileştiğini ileri sürmüşlerdir. Watmough, yaptığı çalışmalarda KGDD ile GDD arasında yorulma ömrünün %70 farklılık gösterdiğini, OKGDD'lerin ise KGDD'lerden daha iyi yorulma özellikleri verdiğini söylemektedir.

Fuller, perlitik KGDD'in yorulma mukavemetinin, küresel grafitli olmayan demirlerden daha yüksek olduğunu kanıtlamıştır. Aynı çalışmada dökme demirin grafit şeklinin yorulma ömrünü etkilediği, küresel olmayan grafitler için yorulma ömrünün azaldığı ileri sürülmüştür.

Sofue et.al., Fuller'in grafit tane boyutu, şekli, inklüzyon miktarı, matris yapı ve matris sertliğinin yorulmaya etkileri konusunda yaptığı çalışmaları baz alarak denemeler yapmışlardır. Bulgularına göre, grafit tane sayısının azalması, küresel grafitlerin bozunmasını ve metalik olmayan inklüzyonların azalmasını sağlamakta böylece yorulma mukavemeti optimize edilebilmektedir.

Palmer, KGDD'lerin kesit boyutuyla yorulma ömrünün nasıl değiştiğini araştırmış ve çap arttıkça yorulma mukavemetinin düştüğünü ileri sürmüştür. Ayrıca bu olay grafit tane sayısının ve mikrosegregasyonların artmasına sebep olmakta bu da yorulma mukavemetini azaltmaktadır.

Aynı şekilde OKGDD'lerde de kesit büyüdükçe yorulma mukavemeti azaldığı gözlenmektedir. Mayer ve Barberat yaptıkları çalışmada OKGDD lerde kesit kalınlığı arttıkça, yorulma mukavemetinin azaldığını göstermişlerdir.

Kovacs, OKGDD'lerin yorulma mukavemetinin diğer dökme demirlerden yüksek olduğunu bu nedenle ağır hizmet taşıtlarının krank mili uygulamalarında kullanılabildiğini ileri sürmüştür.

OKGDD'lerde yorulma mukavemetine etki eden faktörler özetle, şöyle sıralanabilir (Janowak, et.al., 1990):

- Küresel grafitlerin şekli, küresellik azaldıkça yorulma mukavemeti düşer,

- Yorulma ömrü inklüzyonların azalmasıyla, grafit tanelerinin çapının küçülmesiyle, matris yapının mikrosertliğinin artmasıyla artar,
- Yapılan çalışmalar, ticari dökümlere göre, laboratuvar şartlarında yapılan dökümlerin yorulmaya karşı yaklaşık %10 daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle döküm işlemi kontrol altında tutulmalı ve temiz olmalıdır,
- Grafitlerin büyüklüğü, küreselliği ve dağılımı yorulma mukavemetini etkilemektedir,
- Parça büyüklüğü yorulma mukavemetini etkilemektedir.

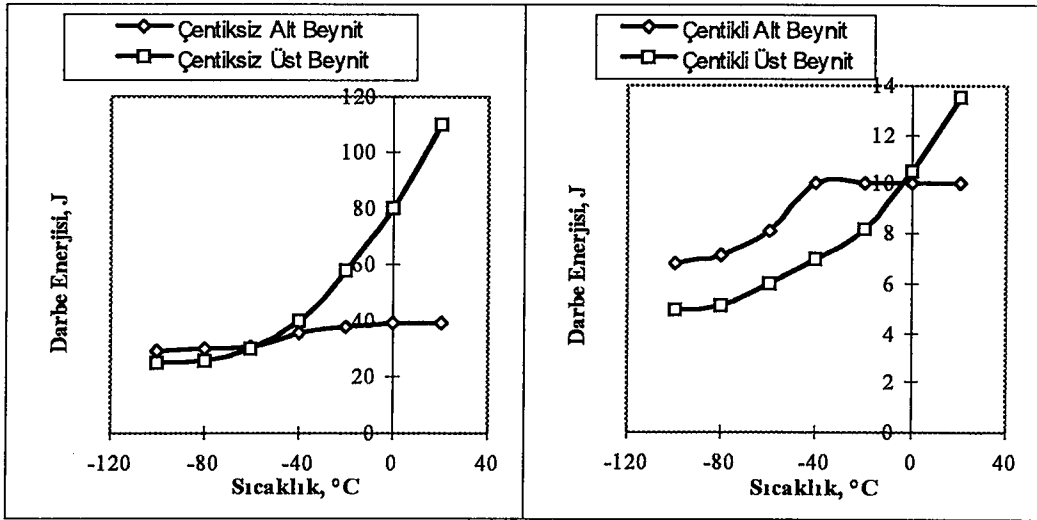
Bunların dışında, henüz uygulama örneği olmamakla beraber laboratuvar denemelerimizde, termal çevrimli ostenitleme ısı işlemine tabi tutulan KGDD'lerin ostemperlenme ısı işlemi sonunda yorulma ömürlerinin, normal yöntemle ostenitlenen numunelerden 2-3 kat daha iyi olduğu gözlenmiştir (Komaç, v.d., 1996).

4.1.3. Darbe ve sertlik özellikleri

OKGDD'lerde temel ısı işlem parametreleri olan ostenitleme sıcaklığı, ostenitleme süresi, ostemperleme sıcaklığı ve ostemperleme süresi, sertlik ve darbe özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir.

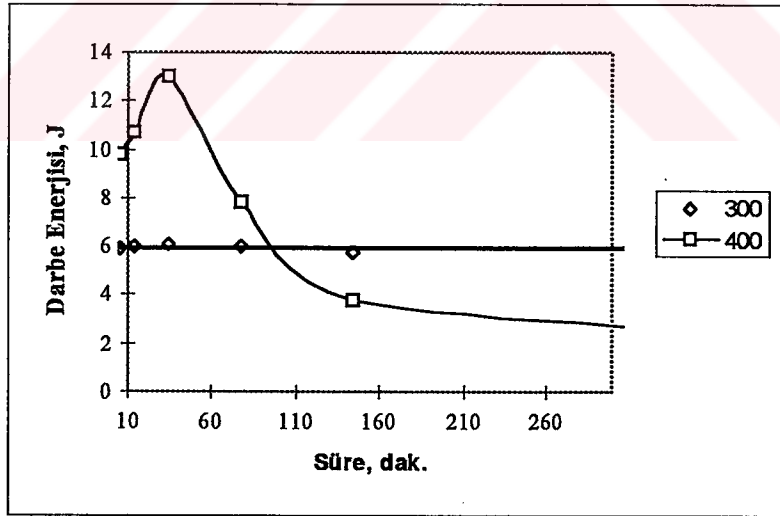
Alaşımli ve alaşımsız KGDD'lerin ostemperlenmesinde, ostenitleme sıcaklığı arttıkça hem sertlik hem de darbe direnci azalmaktadır. Ostenitleme süresi arttıkça sertlik azalırken, darbe direncinde artış gözlenmektedir (Özel ve Kısakürek, 1991).

Çentikli ve çentiksiz darbe numuneleri üzerinde yapılan deneylerde -100, -40°C arasında alt ve üst beynitik yapıların hemen hemen aynı darbe direncine sahip oldukları, -40°C'den büyük sıcaklıklarda (oda sıcaklığında ve üzerinde) üst beynitik yapıların daha büyük darbe direnci değerleri verdiği görülmektedir (Şekil 4.6) (Dorazil, 1991).



Şekil 4.6: Darbe testi sıcaklığının darbe direncine etkisi (Dorazil, 1991).

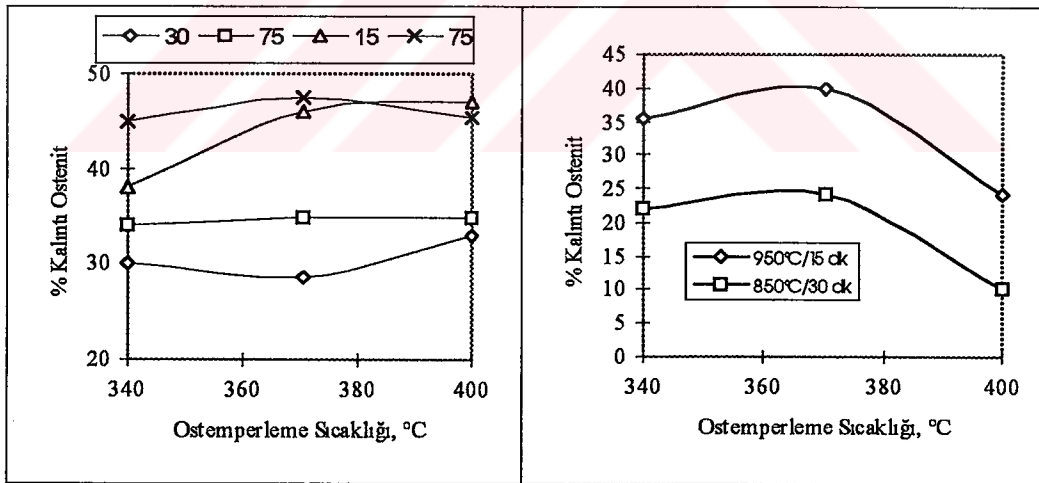
Şekil 4.7'de alaşımsız KGDD'ler için Charpy V-çentikli numune ile oda sıcaklığında yapılan darbe deneyinde elde edilen darbe direnci değerlerinin ostemperleme süresine bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 4.7: Oda sıcaklığında V-çentikli Charpy numunesinin darbe enerjisinin ostemperleme süresine bağlı değişimi (Janowak and Gundlach, 1983).

Alaşımli veya alaşımsız bütün KGDD'lerde ostemperleme süresi arttıkça sertlik düşmektedir. Ayrıca alt beynitik yapıdan üst beynitik yapıya doğru sertlik azalma göstermektedir (Janowak and Morton, 1984).

Shea ve Ryntz yaptıkları çalışmalarda OKGDD'lerin darbe özelliklerinin ostentleme ve ostemperleme şartları dışında, Si miktarıyla ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek Si içeren (>%2) çeliklerdeki gibi KGDD'lerde de beynit oluşumunun gerek karbür çökmesiyle desteklenmemiş, gerekse karbür oluşumu sınırlı olan beynitik ferritin çekirdekleşme ve büyümesinden ibaret olduğuna inanılmaktadır. Bu durumda ferrit büyürken, kalan ostenit karbonca zenginleşir ve böylece kararlılığı artar. Silisyumun daha fazla olması karbür oluşumunu bastırarak ve bunun sonucunda ostemperlenmiş yapıda daha fazla ostenit gözlenebilecektir (Şekil 4.8). Her durum için Si artışıyla darbe özelliklerinin iyileşmesi bu iki nedene bağlanabilir. Tavlanmış KGDD'lerde ise bunun tam aksine ferritin gevrekleşmesi nedeniyle darbe mukavemeti, artan Si ile düşmektedir. Bu durum 850°C'de ostentlemenin tamamlanmamasına ve yapının kalıntı ferrit içermesine bağlanabilir (Shea and Ryntz, 1986).



Şekil 4.8: %1.57 Si içeren KGDD'de, ostentleme sıcaklığındaki artışın ostemperleme sonrası oluşan kalıntı ostenit miktarına etkisi (Shea and Ryntz, 1986).

4.2. OKGDD lerin Teknolojik Önemi ve Uygulama Alanları

OKGDD'lerin ilk uygulama örnekleri otomotiv sanayiinde verilmiştir. OKGDD'lerin ilk kullanım örneğini General Motors firması ürettiği Pontiac araçların bazı dişli aksamlarında kullanarak vermiştir. Bu örneği takiben, ağır hizmet şartlarında çalıştırılan kamyonlarda dişli olarak kullanım örnekleri yaygınlaşmıştır.

OKGDD'lerin, aşınma ve yorulma mukavemetlerinin yüksek olması bu malzemelerin dişli imalatında kullanımını yaygınlaştırmıştır.

OKGDD'lerle ilgili çalışmalar arttıkça kullanım alanları da artış göstermiştir. Özellikle büyük dişli çarklarda yüzeyleri sertleştirilmiş çelik malzemeler yerine, OKGDD malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır.

General Motors firmasının 1976'da Pontiac otomobillerin arka aks hipoid pinyon ve fener dişlilerini yüzeyi sementasyonla sertleştirilmiş çelik yerine OKGDD'den imal etmesi bu malzemeye olan ilginin artmasına neden olmuştur (Harding and Gilbert, 1986). Oysa beynitik yapıli KGDD'lerin ilk örneği 1947 yılında Millis, Gagnebin ve Pilling tarafından verilmiştir (Dorazil, 1991). General Motors'u takiben birçok firma OKGDD malzemeleri çeşitli alanlarda kullanmaya başlamıştır.

Fischer (İsviçre) ve Fiat (İtalya), Avrupa'da OKGDD malzemenen dişli kullanan öncü firmalar arasındadır. Amerika'da 30'u aşkın firma OKGDD kullanımı konusunda bir konsorsiyum yapmış bu konsorsiyuma ABD hükümeti 1.1 milyon dolarlık araştırma desteği vermiştir. Amerika'da Cummins Engine Co. yüzeyi indüksiyonla sertleştirilmiş çelik malzemelerin ve dövme çelik malzemelerin yerine OKGDD malzemelerden yapılmış dişliler kullanmıştır (Hager, 1984).

OKGDD'lerin motor parçası olarak bir diğer kullanım alanı ise krank milleri olmuştur. Volvo, Mercedes, Daimler Benz ve General Motors ağır hizmet araçlarında dövme çelik krank milleri yerine, OKGDD krank millerini tercih etmektedirler. Amerikan Ford firması da OKGDD krank millerini, ağır hizmet kamyonları, çekiciler, tarım araçları ve süperşarjlı yarış araçlarında kullanmışlardır (Harding and Gilbert, 1986).

OKGDD'lerin otomotiv endüstrisi dışında da uygulama alanları vardır. Buzdolabı kompresörlerinin krank milleri, tarım makinalarında kullanılan saban, tırmık

gibi kazıcılar, yükleyici ağır hizmet iş makinalarının kepçe dişleri sivil kullanım alanlarının diğer örnekleridir. Amerikan Abrams M1 tanklarının bu malzemeden imal edilmiş süspansiyon çubukları ve paletlerle donatıldığı ve kullanıldığı bilinmektedir (Çelik, v.d., 1990).

Demiryollarında kullanılan vagonların ve maden arabalarının tekerleri, lokomotiflerde fren pabuçları olarak kullanımlara da rastlanmaktadır (Harding and Gilbert, 1986; Çelik, v.d., 1990).

OKGDD malzemeler teknolojik önemleri ve kullanım yerleri giderek artan malzemelerdir. OKGDD malzemeleri bu denli önemli yapan avantajları şöyle sıralanabilir (Harding and Gilbert, 1986; Özel, 1991; Dorazil, 1991; Morgan, 1987; Kovacs, 1990):

- KGDD, çeliğe göre üretimi ucuz olan ve üretim prosesi kolay olan bir malzemedir,
- Hassas kalıplama yöntemleri kullanıldığı zaman, yüzey işleme gerekmeksizin kullanıma alınabilir,
- Kolay işlenebilen ve işleme maliyeti düşük olan bir malzemedir,
- Ostemperleme ısı işlemi, hem ısı işlem prosesi olarak kolay, hem de kısa süreli bir ısı işlem olduğu için, sementasyonla yüzeyi sertleştirilmiş malzemelere alternatif olarak kullanılabilir,
- Dişli imalatında dövme çelik malzemeye göre, OKGDD malzemenin üretim maliyeti %50 daha düşüktür,
- Aynı boyuttaki dövme çelik malzemedan %10 daha hafiftir,
- Yapıda bulunan grafitler titreşim sönümleyici etkileriyle kullanım yerinde sessiz çalışmayı sağlar,
- Yağlama etkisinin zayıf olduğu kullanım yerlerinde bile aşınma ömürleri dövme çelik malzemedan yüksektir,
- KGDD malzemelerin çentik duyarlılığı daha azdır, bu nedenle yüzeylerinin çelikler kadar iyi işlenmesi gerekmez,

- OKGDD'lerin yorulma ömürleri yüksektir. Aşınma ömürleri ise kullanım sırasında kalıntı ostenitin martenzite dönüşmesi nedeniyle yüksektir (300 BSD sertlikteki OKGDD'lerin 500 BSD sertlikteki dövme çeliğe eşdeğer aşınma mukavemeti gösterdiği bilinmektedir).
- OKGDD'lerin elastisite modülü aynı matris yapıdaki çeliğin elastisite modülünün %70-80'i kadardır,
- Otomotiv sanayiinde yaygın olarak kullanılan parçaların içinde en iyi mukavemet özelliklerini OKGDD'ler vermektedir.



5. SİNİRSEL AĞLAR (NEURAL NETWORKS)

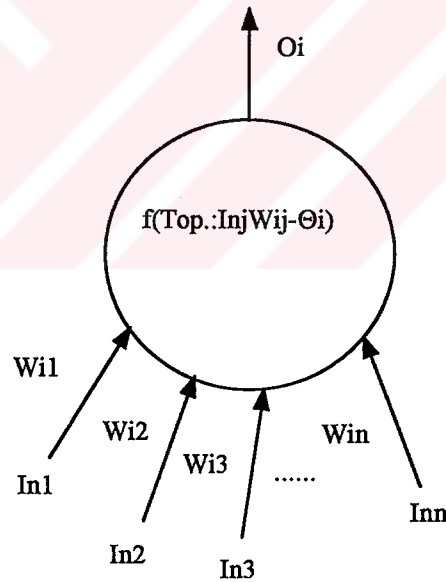
Teknolojideki sürekli değişimler her gün yeni tekniklerle problemlerin çözümünü gündeme getirmektedir. Pek çok mühendislik probleminin çözümünde, istatistiksel yöntemlerin kullanılması uzun zamandan beri kullanılan bir yöntemdir. Fakat istatistiksel yöntemler, problemi doğrudan etkileyen parametrelerin sayısı çok büyük değerlerde olduğunda ve bu parametrelerle sonuç arasında karmaşık veya çoğu zaman tanımlanamayan bir ilişki olduğunda yetersiz kalmaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmalar sonunda problemlerin genetik algoritmalar, sinirsel ağlar ve yapay zeka gibi tekniklerle çözülmesi gündeme gelmektedir. Son zamanlarda özellikle bilgisayar teknolojisinin yaygın olarak kullanılmaya başlaması, yüksek hızlarla işlem yapabilen bilgisayarların üretilmesi, daha karmaşık çözüm yöntemlerinin de kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Sinirsel ağlar, genetik algoritmalar ve yapay zeka, kullanılmakta olan klasik yöntemlere alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sinirsel ağ modelleri, problemi etkileyen parametrelerin, sonuca nasıl etki ettiğini matematiksel olarak saptamak esasına dayanır. Problemi etkileyen parametreler girdi birimleri veya nöronları olarak isimlendirilir. Problemin sonucu ise çıktı birimi veya çıkış nöronudur. Girdi ve çıktı arasında matematiksel ilişki kurulurken, girdideki herbir nöronla çıkış nöronu arasında kurulan bağlantı fonksiyonu için hesaplanan katsayılar o bağlantıların ağırlıkları olarak isimlendirilir. Girdi ve çıktı birimleri arasında kullanılan ara kademeler gizli tabaka olarak isimlendirilir. Bu durumda girdi nöronları ara kademe nöronlarıyla irtibatlanır, ara kademe nöronları da çıktı nöronuyla irtibatlanır. Öğrenme oranı, keskinlik parametresi ve momentum parametresi değerleri, çıktı nöronunda elde edilen değerle, istene değer arasında fark olduğu zaman, ağırlık değerlerini güncellemede kullanılan katsayılarıdır. Örneğin öğrenme oranı küçük seçilirse ağırlıklar küçük aralıklarla güncellenmiş olur, büyük seçilirse büyük aralıklarla güncellenmiş olur. Eşik değeri ise ağırlıkların güncellenmesi sırasında kısır döngüyü önleyen katsayıdır (Stephen, 1994).

5.1. Yapay Sinirsel Ağların Temel Terimleri

Yapay sinirsel ağ, insan beyninin biyolojik çalışmasını temsil eden matematik bir modeldir. Bir yapay sinirsel ağda üç temel unsur vardır; nöron, bağ ve öğrenme kuralı (Dağlı, 1994).

1) **Nöronlar:** Nöron, biyolojik sinir sisteminde ana birimlerin fonksiyonunu ifade eden bir cihazdır. Nöronlar diğer nöronlardan ve çevreden gelen sinyalleri toplar ve işler, ardından bir üst seviyenin nöronlarına geçişi sağlarlar. Bütün nöronlar pek çok giriş sinyalini eşzamanlı olarak toplayabilen, fakat, bağlantı ağırlık değerlerine, giriş sinyaline, eşik değerine ve hareket fonksiyonuna bağlı olarak yalnızca bir çıkış sinyali verebilen cihazlardır. Şekil 5.1’de şematik olarak bir nöron gösterilmektedir (Hertz, et.al., 1993).



Şekil 5.1: Sinirsel ağda şematize bir nöron şekli (Dağlı, 1994).

- I_{ij} : J. nöronun gelen giriş sinyali
- W_{ij} : I ile J nöronu arasındaki bağlantı ağırlık değeri,
- Θ_i : I. nöron için eşik değeri,
- O_i : I. nöronun çıkış sinyal değeri
- $f(.)$: hareket fonksiyonu,

Nöronlar üç temel sınıfa ayrılırlar; giriş nöronları, çıkış nöronları ve gizli nöronlar. Giriş nöronları, çevreden ve diğer nöronlardan verileri toplayan nöronlardır. Çıkış nöronları, sistem dışına sinyal yollayan nöronlardır. Giriş ile çıkış arasında sistem içindeki nöronlar gizli nöronlardır (Dağlı, 1994).

Nöronun içinde olduğu hareket fonksiyonunun amacı, nöronları belirlenmiş bir çıkış aralığında sınırlamaktır. Dört genel hareket fonksiyonu vardır: Doğrusal, eğrisel, adım ve s (sigmoid) fonksiyonu (Dağlı, 1994).

- *Doğrusal fonksiyon* : $f(x)=a.x$; a reel sayı

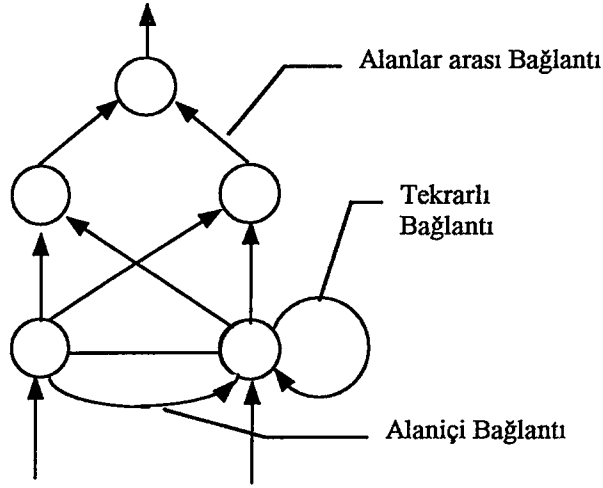
- *Eğrisel fonksiyon* : $f(x)=\begin{cases} a.x; x \in [-b, b] \\ \max; x \in [b, \infty) \\ \min; x \in (-\infty, -b] \end{cases}$

- *Adım fonksiyonu* : $f(x)=\begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$

- *S-fonksiyonu* : $f(x)=\frac{1}{1+e^{-x}}$

2) Bağlantılar: Bağlantı; ağ mimarisinin, kendi içinde veya bir nöronun diğerine bir doğrultuda sinyali büyütürken yollayan bir parçasıdır. Her bağlantı için atanmış bir ağırlık değeri vardır. Ağ içinde nöronları taşıyan üç farklı bağlantı şekli vardır (Şekil 5.2) (Caudill, 1988; Hertz, et.al., 1993);

- *Alan içi bağlantılar* : Aynı tabaka içinde nöronları birbirine bağlar.
- *Alan arası bağlantılar*: Farklı tabakalardaki nöronları birbirine bağlar.
- *Tekrarlı bağlantılar*: Nöronları kendi içinde ilişkilendiren bağlantılardır.



Şekil 5.2: Sinirsel ağlarda bağlantı şekilleri (Dağlı, 1994).

3) Öğrenme kuralı: Bir yapay sinirsel ağ sisteminde öğrenme, ağırlık matrisindeki değişimleri hesaba katarak, tüm parametrelerin birbiriyle ilişkilendirilmesini sağlayarak gerçekleşir. Öğrenme denetimli ve denetimsiz olmak üzere iki şekilde olabilir (Dağlı, 1994; Rumelhart, et.al., 1986).

Denetimli öğrenme, çıkış sinyallerini kontrol edip, giriş sinyallerini içeren veri grubunu kullanarak ağ sistemini eğitir. Ağ sisteminin ağırlık matrisi, genel ağ sistemi hatası, kabul edilebilir hata düzeyinden (ϵ) büyük oldukça, güncellenir ve işlemler tekrar edilir. Güncelleme yöntemi, hatayı düzelterek öğrenme, kuvvetlendirilmiş öğrenme ve tahmini öğrenme şeklinde olabilir. Hatayı düzelterek öğrenme, çıkış nöronunun gerçek değeriyle arzu edilen değeri arasındaki farkı kullanarak tüm ağırlık matrisinin yeniden düzenlenmesi esasına dayanır. Kuvvetlendirilmiş öğrenme tekniğinde rassal olarak belirlenen ağırlıkların verdiği sonuçların uygunluğuna bakılır. Bu amaçla elde edilmesi beklenen sonuç değerleriyle hesaplanan sonuç değerleri karşılaştırılır. Eğer aradaki fark yapılan ardışık işlemler boyunca azalıyor bu, doğru yönde gidildiğini gösterir ve ağırlıklar kuvvetlendirilir. Değilse zayıflatılır. Tahmini öğrenmede; ağırlık matrisi, ağ sisteminin sonuç değerinin hesaplanmasından sonra rassal olarak belirlenir. Eğer sonuç

değer bir öncekinden daha düşükse, değişim kabul edilir, aksi halde değişim olası dağılımın nasıl olacağı tahmin edilerek bulunur (Dağlı, 1994; Hertz, et.al., 1993).

Denetimsiz öğrenme çoğunlukla tercih edilmez. Yalnızca yerel bilgi kontrolunda güvenli sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Bu üç temel teknik, çeşitli sinirsel ağ sistemlerinin başarıyla kurulmasında ve sonuçlandırılmasında kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında geri yayımlı denetimli öğrenme kuralı kullanılmıştır.

5.2. Geri Yayınım (Backpropagation)

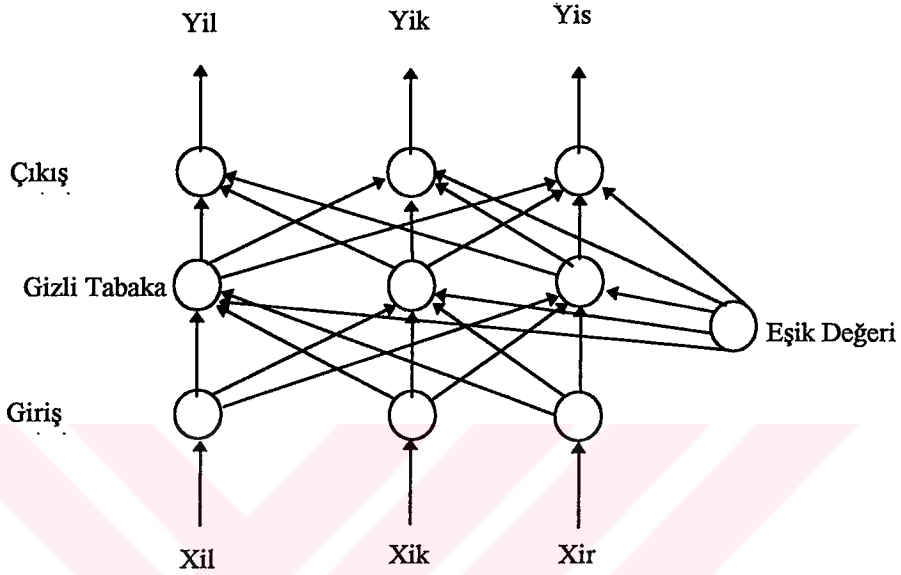
Geri yayınım, beklenen sonuç değer ile hesaplanan, sonuç değer ile arasındaki farkı gözönüne alarak, sistemdeki gizli tabaka nöronlarına bir sonraki ardıştırmada üretecekleri sinyali düzeltmeleri için sinyal gönderme işlemidir. Bu süreç doğrusal değildir ve sondan başlanarak her defasında bir önceki tabakaya bilgi (sinyal) aktararak başa ulaşana kadar devam eder (Rumelhart, et.al., 1986).

Aslında geri yayınım her ardıştırmaya için kullanılacak ağırlıkların güncellenmesi işlemidir. Bu işlem çeşitli kurallara bağlı olarak yapılabilir. Genelleştirilmiş delta kuralı kullanılan en güncel ve güvenilir olanıdır.

Geri yayınımın temel yapısında giriş, çıkış ve gizli tabaka olmak üzere en az üç tabaka vardır. Gizli tabaka sayısı birden fazla sayıda olabilir (Şekil 5.3). Gizli tabaka sayısı ile ilgili bir zorunluluk genellikle yoktur. Bununla beraber ağ sisteminin daha fazla gizli tabakayla daha yüksek performans göstererek çalıştığına dair bir bilgi de yoktur (Dağlı, 1994).

Geri yayınımda öğretilen veri grubunun, çıkış tabakası nöronlarının arzu edilen çıkış değeri tariflenir. Bununla beraber, gizli tabaka nöronlarının çıkış değerlerini tariflemek mümkün değildir. Bu nedenle çıkış tabakasında üretilen hata, gizli tabakalarda

geri yayınımlı ihtiyaç haline getirir. Gizli tabakadaki her nöron, çıkış tabakasında üretilen hatanın yalnızca bir kısmını kapsar (Dağlı, 1994).



Şekil 5.3: Geri yayınının yapısı (Dağlı, 1994).

5.3. Genelleştirilmiş Delta Kuralı

Genelleştirilmiş delta kuralı, geri yayınımda ağırlık güncellemede kullanılan yöntemlerden biridir. Yöntemin işleyişi aşağıda adımlar halinde verilmiştir;

Adım 1. Ağ sistemindeki tüm nöronların çıkış değerleri hesaplanır;

$$O_i = f\left(\sum_{j=1}^n I_j W_{ij} - \Theta_i\right)$$

Adım 2. Ağ sisteminin toplam hatası hesaplanır;

$$\text{Hata} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (y_i - O_i)^2$$

k: Çıkış tabakasındaki nöron sayısı,

y_i : I. nöronun arzu edilen çıkış değeri

Adım 3. Çıkış tabakası için ağırlık değişimleri değerleri hesaplanır;

$$\Delta W_{ij} = \eta \cdot \delta_j \cdot O_i$$

$$\delta_j = (y_i - O_j) f'(net_j)$$

η : Öğrenme oranı (0-1 arasında bir değer)

Adım 4. Gizli tabaka için ağırlık değişimi değerleri hesaplanır;

$$\Delta W_{ji} = \eta \cdot \delta_j \cdot O_i$$

$$\delta_j = \sum_k (\delta_k \cdot W_{kj}) f'(net_j)$$

Adım 5. Değişim değerlerine göre ağırlıklar güncellenir;

$$W_{ij}^{yeni} = W_{ij}^{Eski} + \Delta W_{ij}$$

Adım 6. Toplam hata kabul edilebilir düzeye gelinceye kadar bu işlemlerin tekrar edilir (Dağlı, 1994; Hertz, et.al., 1993; Rumelhart, et.al., 1986).

Yukarıda belirtilen süreç, seçilen çözüm fonksiyonuna bağlı olarak, hesaplanır. Ortaya çıkan toplam hata değeri istenen düzeye ininceye kadar işlemler sürekli tekrar edilir. Genellikle bir kaç milyon kez işlemin tekrar edilmesi gerekir. Bu yüzden yapay sinirsel ağ sistemleriyle problem çözmede, çözülecek probleme uygun bir bilgisayar programının yazılması ve kullanılması esastır.

Bu yöntemle çözümlenmeye çalışılan problemde, ostemperleme ısı işlemine etki eden temel parametreler, ostemperleme sıcaklığı, ostemperleme sıcaklığı, ostemperleme süresi ve alaşım elementleri miktarı (Cu, Ni ve Mo) giriş değerleri olarak verilmiş, birinci

Çözümde oluşacak beynit miktarları, ikinci çözümde oluşacak sertlik miktarları çıkış değeri olarak girilmiştir. Ağ sisteminden elde edilmek istenen bilgi, hangi parametrenin sonuç değerin oluşumuna hangi oranda katkıda bulunduğunu tespit etmektir.

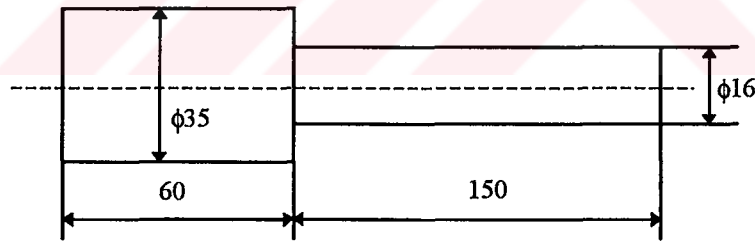


6. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda Cu, Ni, ve Mo alaşım elementlerinin, küresel grafitli dökme demirin ostemperlenmesi sonucu mikroyapıya ve sertliğe etkisini incelemek amaçlanmıştır. Deneyler farklı oranlarda Cu, Ni ve Mo alaşım elementleri içeren dökme demir malzemeler üzerinde, farklı ostemperleme şartlarında yapılmış ve sonuçlar sinirsel ağ sistemleri yardımıyla yorumlanmıştır.

6.1. Deneyselerde Kullanılan Malzemeler

Deneyselerde Cu, Ni ve Mo alaşım elementlerini ayrı ayrı içeren 22 farklı bileşimde döküm malzeme kullanılmıştır. Döküm malzemeler Şekil 6.1'deki gibi dökülmüştür. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 6.1'deki gibidir. Döküm malzemeler Körfez Döküm Sanayii'nde 500 kg kapasiteli bir indüksiyon ocağı kullanılarak dökülmüştür. Numunelerin kimyasal bileşimleri aynı fabrikada spectral analiz cihazıyla tesbit edilmiştir.



Şekil 6.1: Deney numunelerinin şekli

Ostemperleme ısıl işlemi nötr tuz banyosu içinde yapılmıştır. Tuz banyosu bileşimi ağırlıkça %40 KNO₃, %40 NaNO₂ ve %20 NaNO₃ içermektedir. Tuz banyosu her on deneyde bir yenilenmiştir.

Tablo 6.1: Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri.

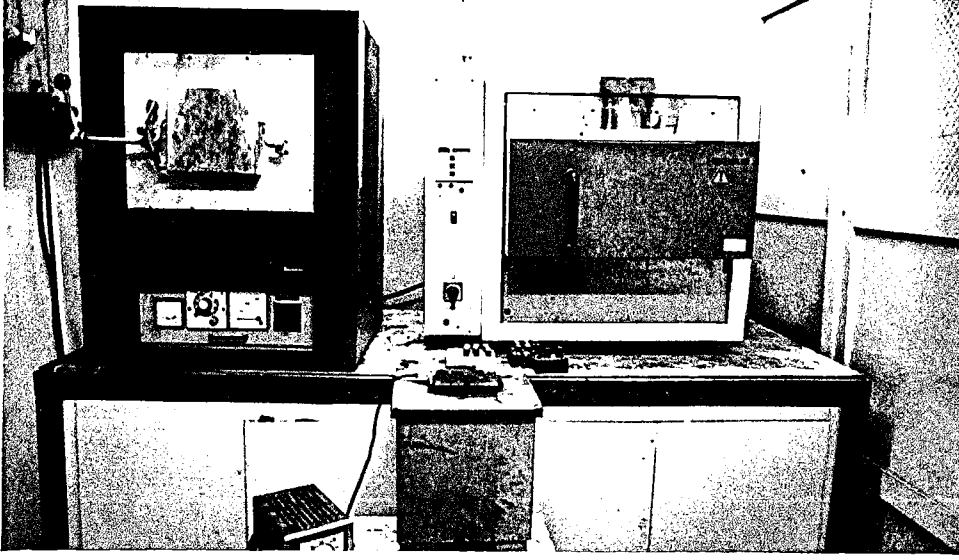
NO	Fe	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cu	Mg
1	92.9	3.45	2.61	0.224	0.032	0.006	0.000	0.062	0.144	0.043
2	93.1	3.28	2.20	0.388	0.030	0.011	0.000	0.574	0.112	0.048
3	92.3	3.06	2.30	0.204	0.032	0.009	0.007	1.640	0.024	0.053
4	90.3	3.19	2.44	0.393	0.030	0.009	0.000	3.090	0.117	0.048
5	92.8	3.32	2.42	0.403	0.032	0.010	0.008	0.024	0.720	0.051
6	92.5	3.39	2.65	0.256	0.034	0.008	0.006	0.018	0.951	0.054
7	92.0	3.52	2.21	0.411	0.030	0.013	0.005	0.018	1.440	0.048
8	93.4	3.28	2.19	0.314	0.031	0.008	0.388	0.017	0.031	0.055
9	93.3	3.10	2.31	0.206	0.033	0.007	0.671	0.018	0.056	0.046
10	92.8	3.23	2.19	0.340	0.032	0.006	0.990	0.021	0.104	0.042
11	92.6	3.08	2.32	0.251	0.033	0.007	0.000	0.614	0.670	0.053
12	89.2	3.05	2.59	0.310	0.031	0.009	0.003	3.020	1.460	0.056
13	92.6	3.09	2.44	0.250	0.032	0.007	0.398	0.640	0.114	0.040
14	90.4	3.13	2.05	0.286	0.035	0.008	0.965	2.830	0.067	0.041
15	92.1	3.40	2.08	0.277	0.041	0.016	0.428	0.627	0.696	0.047
16	89.4	3.20	2.65	0.338	0.033	0.011	0.420	2.960	0.648	0.054
17	91.1	3.11	2.60	0.266	0.032	0.010	0.428	0.582	1.470	0.059
18	88.2	3.42	2.63	0.448	0.029	0.016	0.386	3.120	1.420	0.045
19	91.3	3.37	2.40	0.267	0.044	0.014	0.962	0.598	0.693	0.049
20	88.5	3.47	2.64	0.352	0.033	0.010	0.959	2.910	0.711	0.038
21	90.6	3.17	2.54	0.332	0.033	0.012	0.963	0.575	1.430	0.056
22	88.0	3.38	2.63	0.330	0.034	0.015	0.926	2.840	1.440	0.051

6.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Deneylerde ısıl işlem ve inceleme olarak iki temel kademedeki çalışma yapılmıştır. Isıl işlemler için, ostenitlemede Heraeus KS-1251 fırın, ostenperlemede Emko- potalı fırın kullanılmıştır (Şekil 6.2).

Metaloğrafi deneyleri için numune hazırlama aşamasında Struers kesme, zımparalama ve parlatma cihazları kullanılmıştır. Dağlama %2'lik Nital ve Vilella (1 gr pikrik asit, 5 ml HCL, 100 ml etanol) ayraçları kullanılarak yapılmıştır.

Metaloğrafik incelemeler için Olympus PMG-3 metalograf ve Leco-2001 görüntü analiz cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.3).



Şekil 6.2: Deneysel çalışmalarda kullanılan fırınlar.



Şekil 6.3: Metalografik çalışmalarda kullanılan görüntü analiz sistemi.

Sertlik ölçümleri Wolpert-Probat otomatik Rockwell sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır.

6.3. DeneYlerin Yapılışı

Ostemperleme ısııl işlemleri iki kademedede yapılmıştır. Birinci olarak ostenitleme ısııl işlemleri 850 ve 950°C sıcaklıklarda 1 saat süreyle, ikinci olarak ostemperleme ısııl işlemleri 250, 350 ve 450°C sıcaklıklarda ve 0.5, 1, 2, 3, 4 saat sürelerle yapılmıştır. Ostenitleme ısııl işleminde numuneler özel bir çelik kap içinde fırına konarak fırınla beraber ostenitleme sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. Ostenitleme süresi tamamlandıktan sonra ostemperleme işlemleri için numuneler çok hızlı bir şekilde tuz banyosuna alınmıştır. Deney çizelgesi tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2: Deney çizelgesi

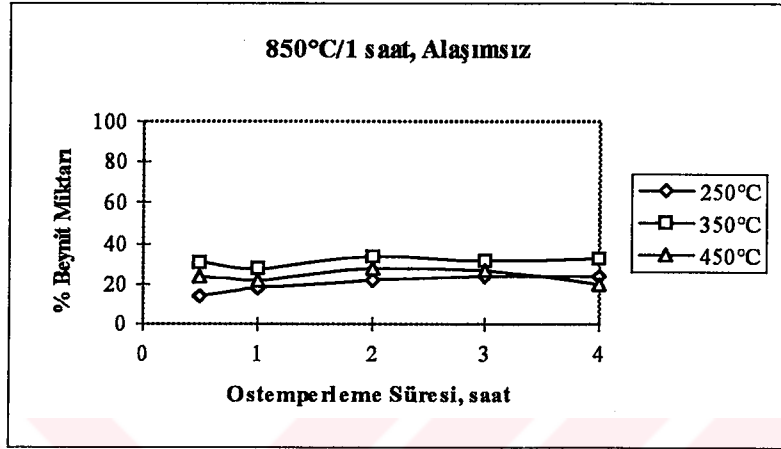
Ostenitleme Sıcaklığı, °C	Ostenitleme Süresi, saat	Ostemperleme Sıcaklığı, °C	Ostemperleme Süresi, saat
850	1	250	0.5
			1
			2
			3
			4
850	1	350	0.5
			1
			2
			3
			4
850	1	450	0.5
			1
			2
			3
			4
950	1	250	0.5
			1
			2
			3
			4
950	1	350	0.5
			1
			2
			3
			4
950	1	450	0.5
			1
			2
			3
			4

Ostenitleme ısı işleminde numuneler iki farklı sıcaklıkta ve ostemperleme işleminde üç farklı sıcaklık ve beş farklı sürede deneye tabi tutulmuş, bu prosedür her bileşim için ayrı ayrı tekrar edilmiştir.

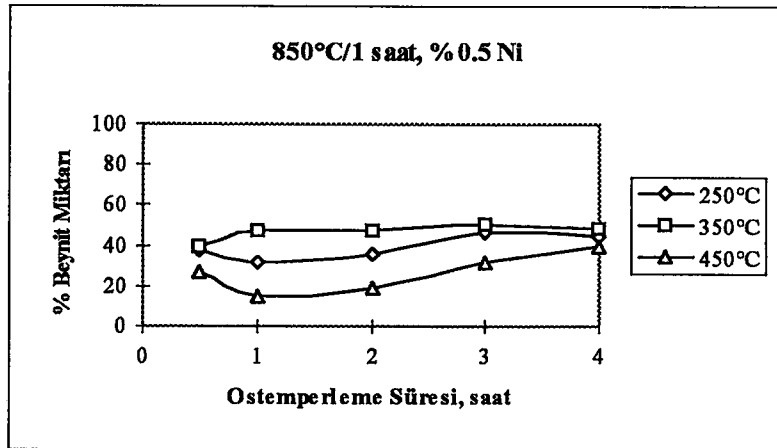
Isıl işlemler tamamlandıktan sonra, numunelerin incelenecek yüzeyleri sırasıyla 180, 320, 500, 800 ve 1000 Mesh'lik zımparalarla aşındırılmıştır. Ardından 7 μ m'lik elmas pasta ile parlatma yapılmış ve yüzey %2'lik nital ile dağlanmıştır. Birinci dağlamadan sonra numuneler 1 μ m'lik elmas pasta ile tekrar parlatılmış ve vilella ayraç ile tekrar dağlanarak görüntü analiz cihazında incelenmiştir. Görüntü analiz cihazında inceleme ile numuneler üzerinde oluşmuş beynit miktarları, metalografik olarak belirlenmiştir. Her numune üzerinde sekiz ayrı ölçüm yapılmış ve ortalama değer bulunmuştur. Metalografik incelemeleri tamamlanan numuneler sertlik ölçümüne tabi tutulmuştur. Sertlik ölçümünde de numune başına beş ölçüm yapılarak ortalama değerler alınmıştır.

6.4. Deney Sonuçları

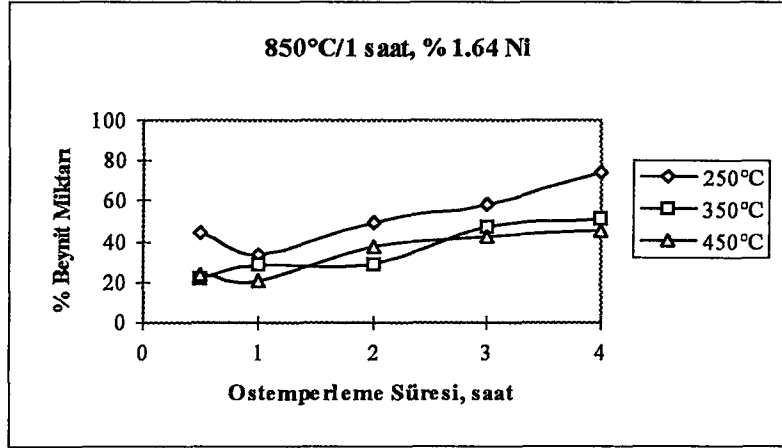
Yapılan deneyler sonunda elde edilen sonuçlar MS-EXCEL V5.0 programı ile tablo halinde yazılmış ve sonuçlar arasındaki ilişkiler, diyagramlar halinde ifade edilmiştir. Diyagramlarda 850°C'de ostenitlenen numunelerin beynit miktarlarının ostemperleme süresiyle değişimi ele alınmış, 950°C'de ostenitlenen numunelerin hem beynit miktarlarının hemde sertliklerinin ostemperleme süresiyle değişimi ele alınmıştır. Şekil 6.4-6.25'de 850°C'de ostenitlenmiş numunelere ait ostemperleme süresi-beynit miktarı eğrileri çizilmiştir. Şekil 6.26-45'de 950°C'de ostenitlenmiş numunelere ait ostemperleme süresi-beynit miktarı ve ostemperleme süresi sertlik değişimi eğrileri çizilmiştir. Toplam 480 numune deneye tabi tutulmuştur. Bu numunelerin tümüne ait mikro fotoğraflar çekilmiş ve incelenmiştir. Numunelerin tümüne ait fotoğrafları çalışma kapsamında vermek mümkün olmayacağı için, ostenitleme , ostemperleme şartlarından ve alaşım elementlerinden dolayı yapıda meydana gelen değişimleri temsil eden 32 fotoğraf seçilmiştir. Bu fotoğraflar Şekil 6.46-6.61'de verilmiştir.



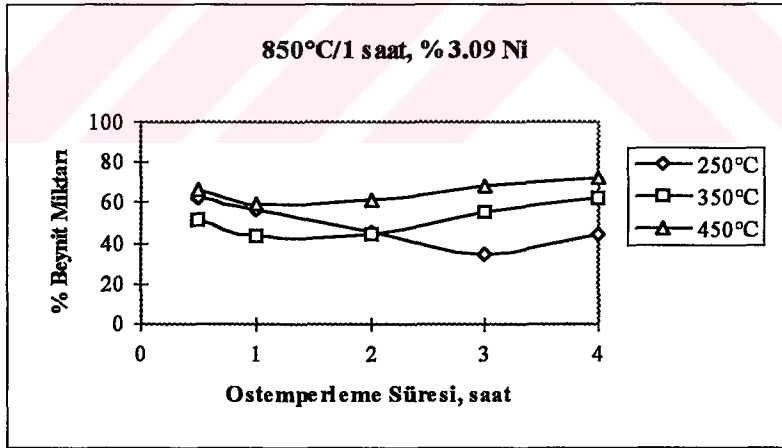
Şekil 6.4: 850°C'de ostenitlenmiş alaşımız KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



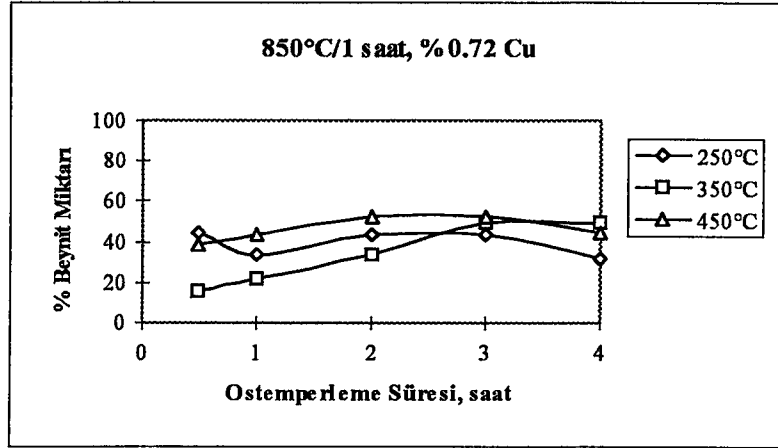
Şekil 6.5: 850°C'de ostenitlenmiş %0.5 Ni alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



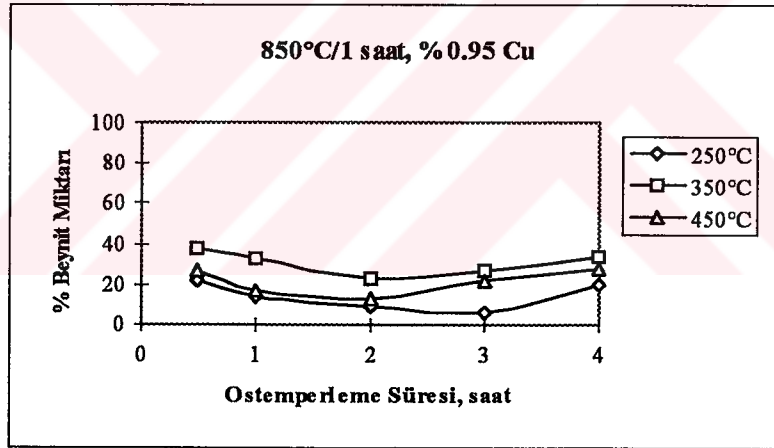
Şekil 6.6: 850°C'de ostenitlenmiş %1.64 Ni alaşımlı KGDD'de ostempereleme sonucu oluşan beynit miktarının ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



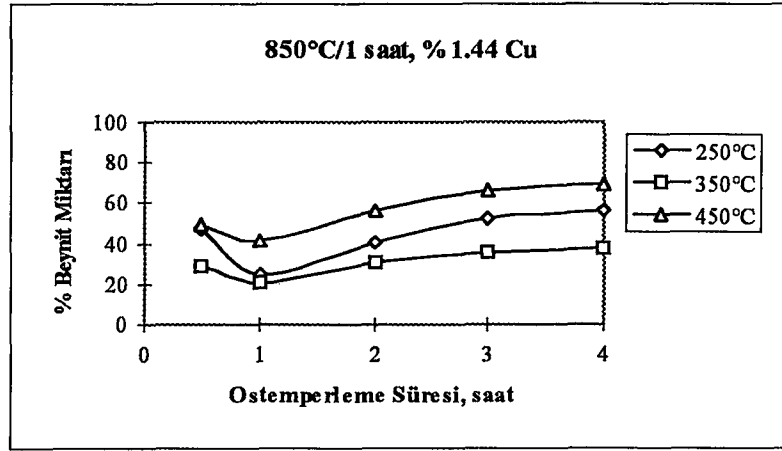
Şekil 6.7: 850°C'de ostenitlenmiş %3.09 Ni alaşımlı KGDD'de ostempereleme sonucu oluşan beynit miktarının ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



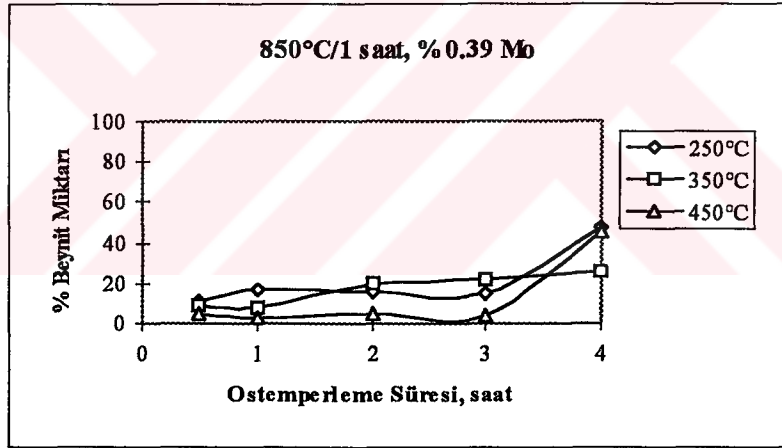
Şekil 6.8: 850°C’de ostenitlenmiş %0.72 Cu alaşımlı KGDD’de ostempereleme sonucu oluşan beynit miktarının ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



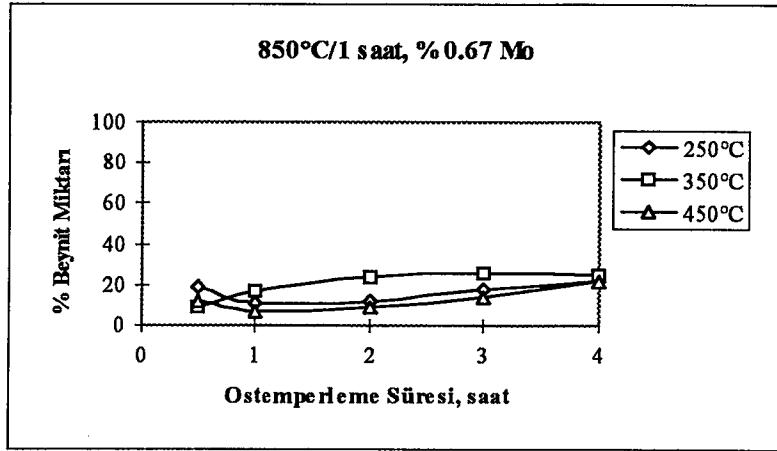
Şekil 6.9: 850°C’de ostenitlenmiş %0.95 Cu alaşımlı KGDD’de ostempereleme sonucu oluşan beynit miktarının ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



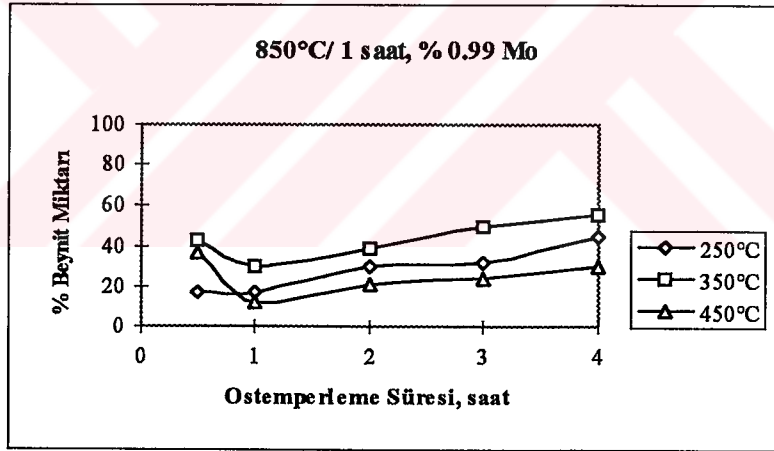
Şekil 6.10: 850°C'de ostenitlenmiş %1.44 Cu alaşımlı KGDD'de ostempirleme sonucu oluşan beynit miktarının ostempirleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



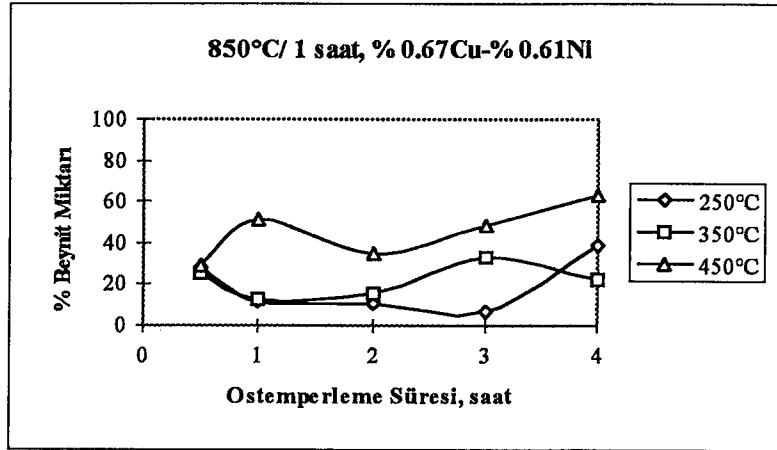
Şekil 6.11: 850°C'de ostenitlenmiş %0.39 Mo alaşımlı KGDD'de ostempirleme sonucu oluşan beynit miktarının ostempirleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



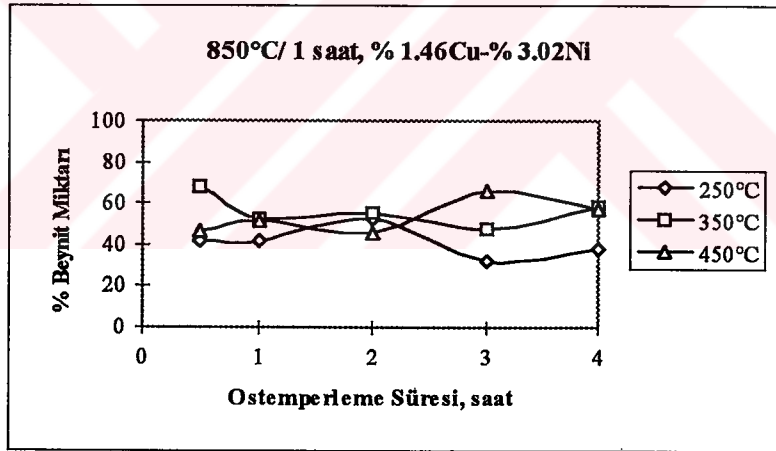
Şekil 6.12: 850°C'de ostenitlenmiş %0.67 Mo alaşımlı KGDD'de ostempereleme sonucu oluşan beynit miktarının ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



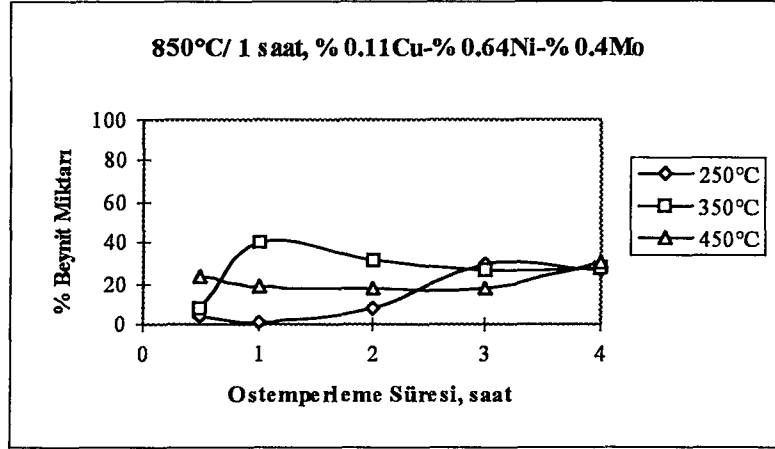
Şekil 6.13: 850°C'de ostenitlenmiş %0.99 Mo alaşımlı KGDD'de ostempereleme sonucu oluşan beynit miktarının ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



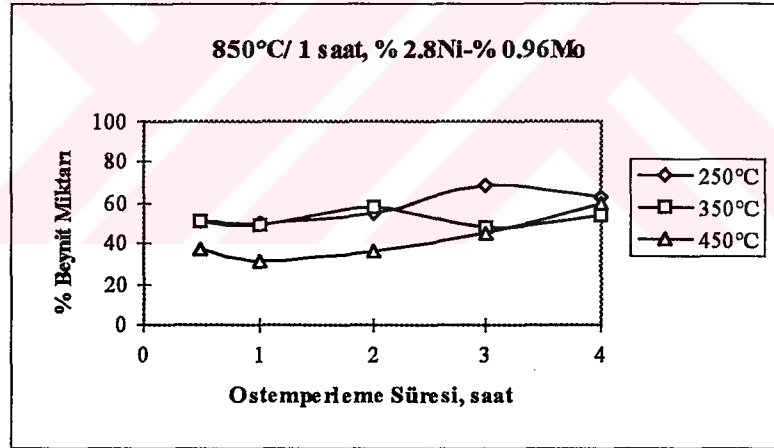
Şekil 6.14: 850°C'de ostenitlenmiş %0.67 Cu %0.61 Ni alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



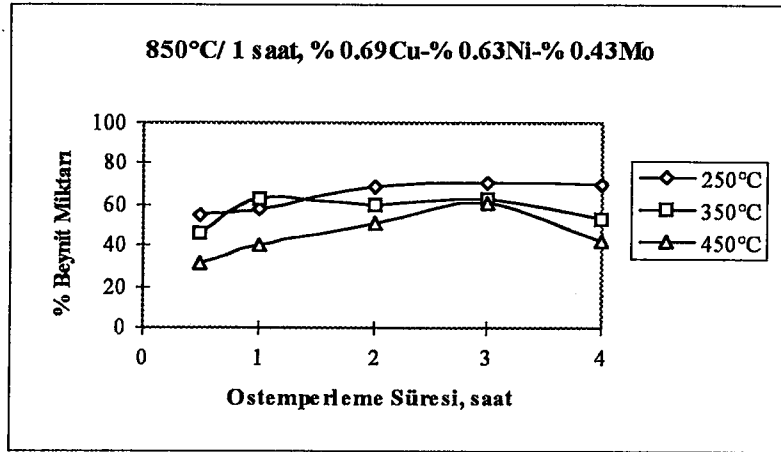
Şekil 6.15: 850°C'de ostenitlenmiş %1.46 Cu %3.02 Ni alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



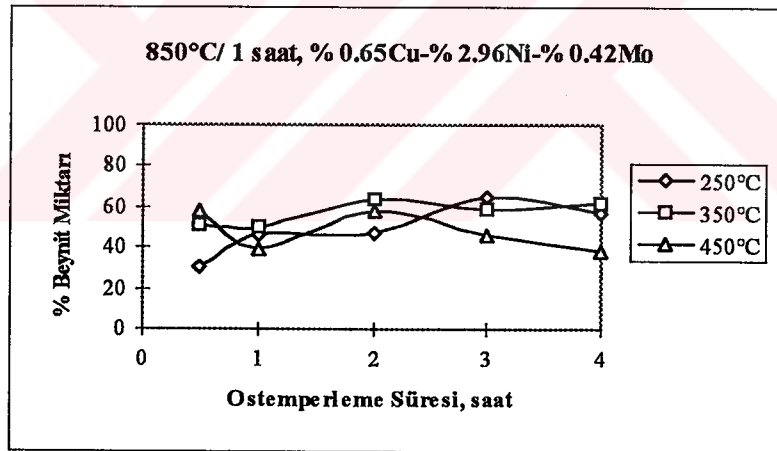
Şekil 6.16: 850°C'de ostenitlenmiş %0.11 Cu, %0.64 Ni, %0.4 Mo alaşımlı KGDD'de ostempereleme sonucu oluşan beyrit miktarının ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



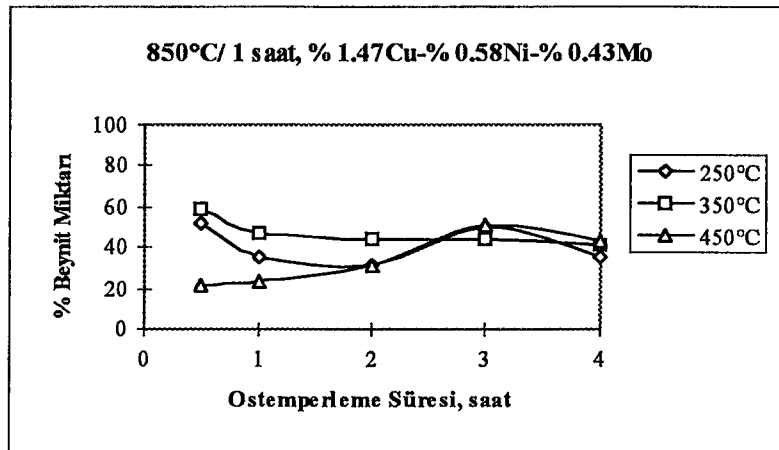
Şekil 6.17: 850°C'de ostenitlenmiş %2.8 Ni, %0.96 Mo alaşımlı KGDD'de ostempereleme sonucu oluşan beyrit miktarının ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



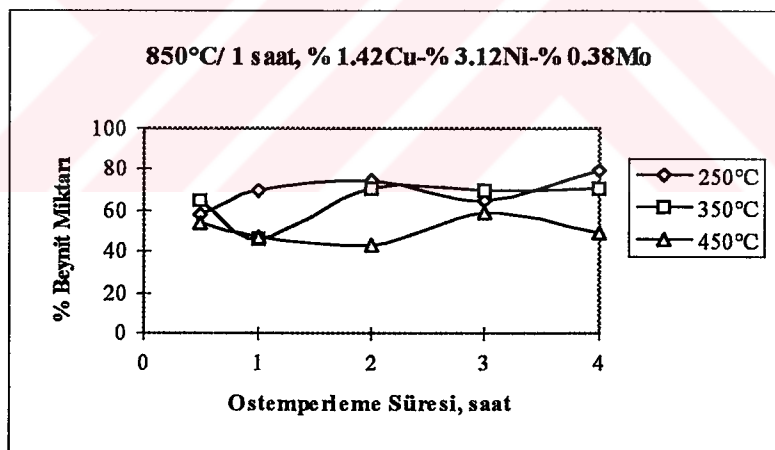
Şekil 6.18: 850°C'de ostenitlenmiş %0.69 Cu, %0.63 Ni, %0.43 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



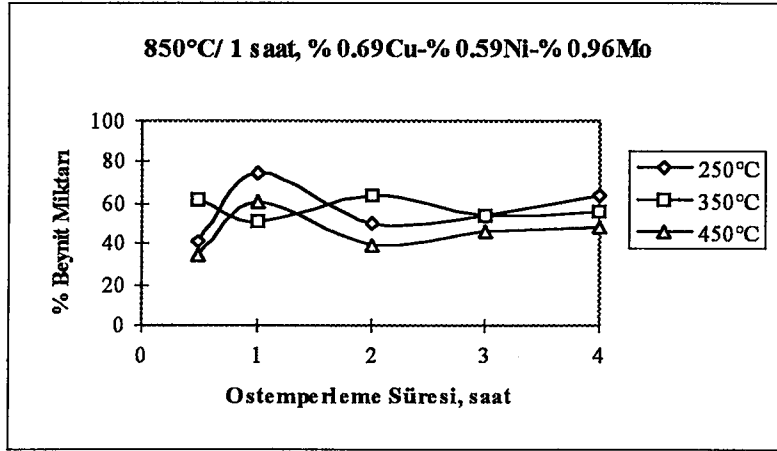
Şekil 6.19: 850°C'de ostenitlenmiş %0.65 Cu, %2.96 Ni, %0.42 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



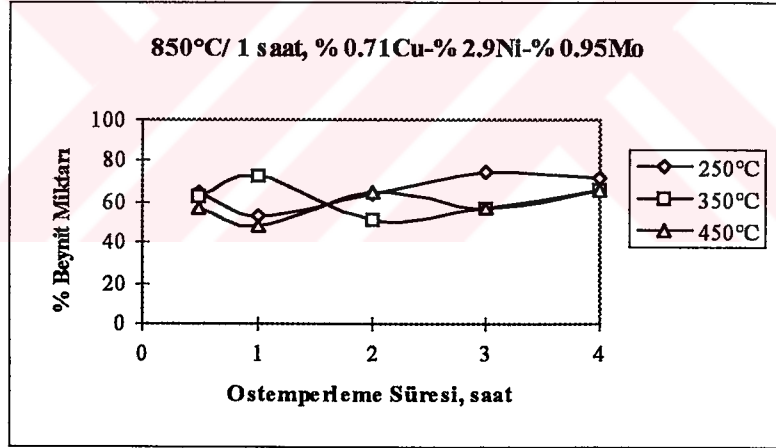
Şekil 6.20: 850°C'de ostenitlenmiş %1.74 Cu, %0.58 Ni, %0.43 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



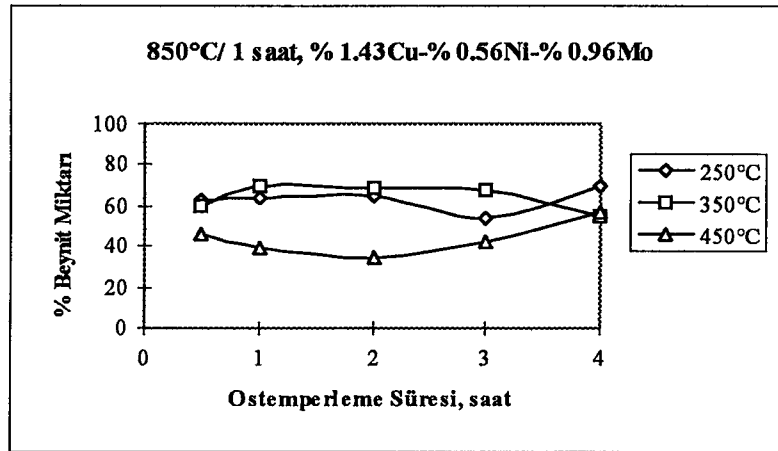
Şekil 6.21: 850°C'de ostenitlenmiş %1.42 Cu, %3.12 Ni, %0.38 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



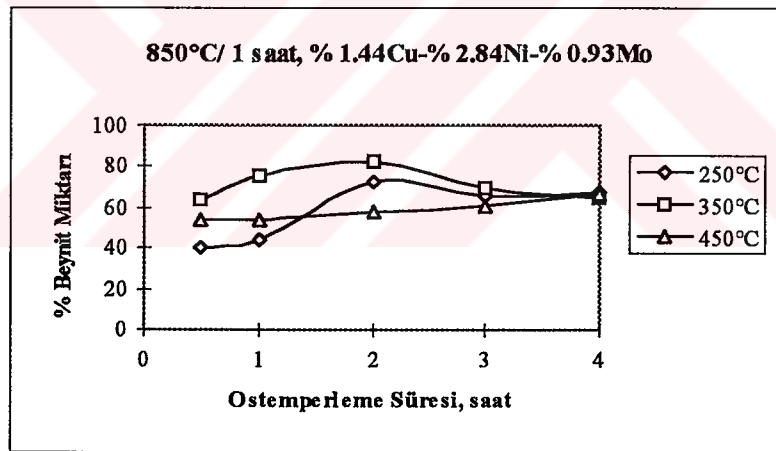
Şekil 6.22: 850°C'de ostenitlenmiş %0.69 Cu, %0.59 Ni, %0.96 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



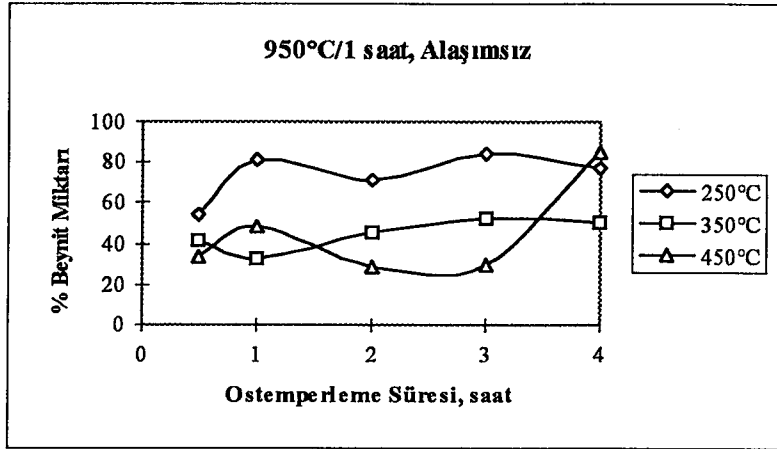
Şekil 6.23: 850°C'de ostenitlenmiş %0.71 Cu, %2.9 Ni, %0.95 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



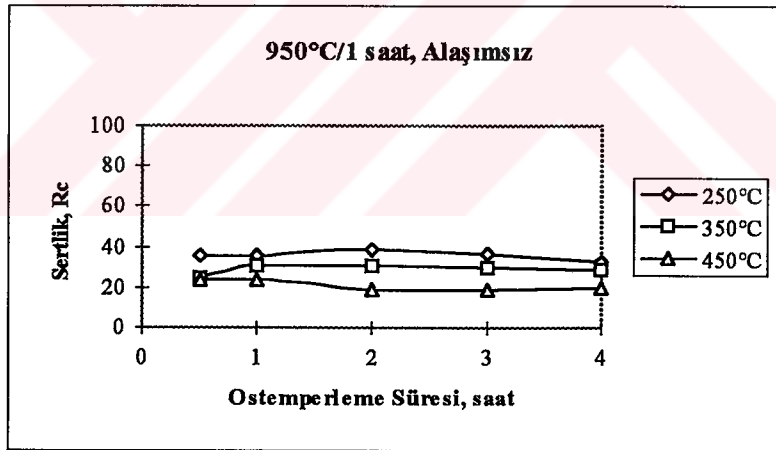
Şekil 6.24: 850°C'de ostenitlenmiş %1.43 Cu, %0.56 Ni, %0.96 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



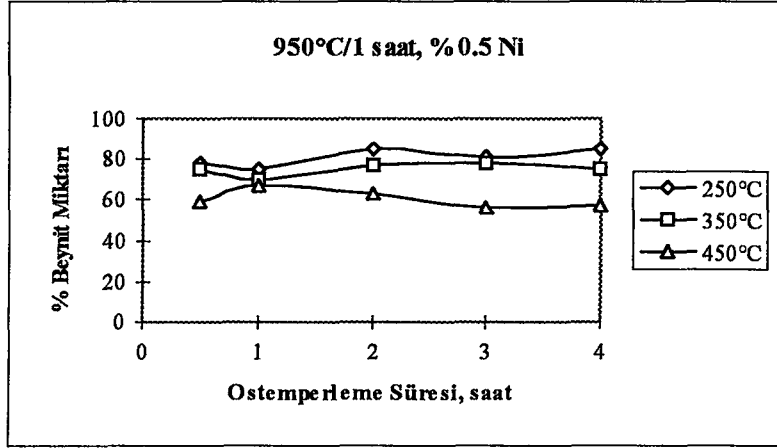
Şekil 6.25: 850°C'de ostenitlenmiş %1.44 Cu, %2.84 Ni, %0.93 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



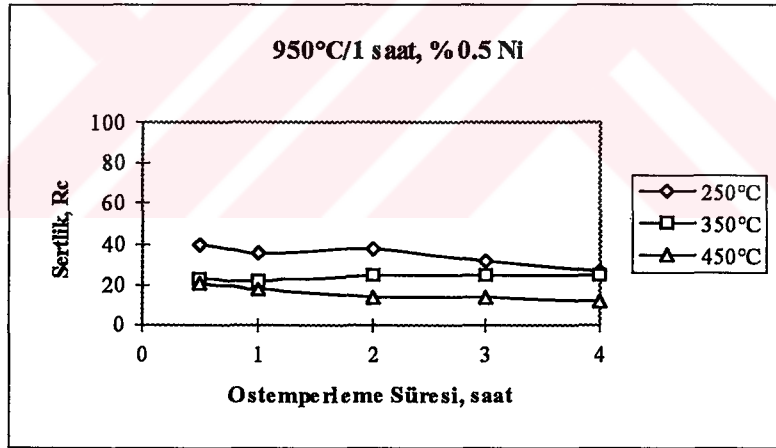
Şekil 6.26: 950°C’de ostenitlenmiş alaşimsız KGDD’de ostempirme sonucu oluşan beynit miktarının ostempirme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



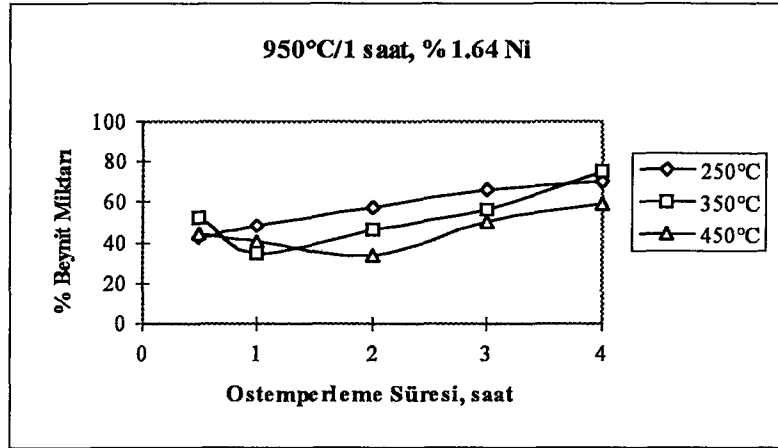
Şekil 6.27: 950°C’de ostenitlenmiş alaşimsız KGDD’de ostempirme sonucu oluşan sertliğin ostempirme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



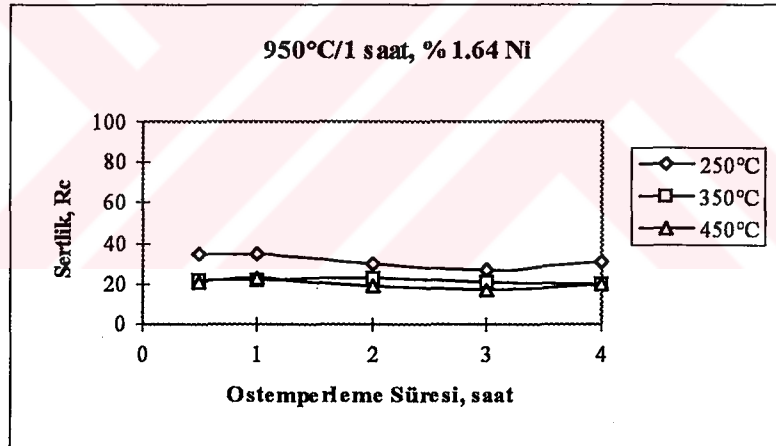
Şekil 6.28: 950°C'de ostenitlenmiş %0.5 Ni alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



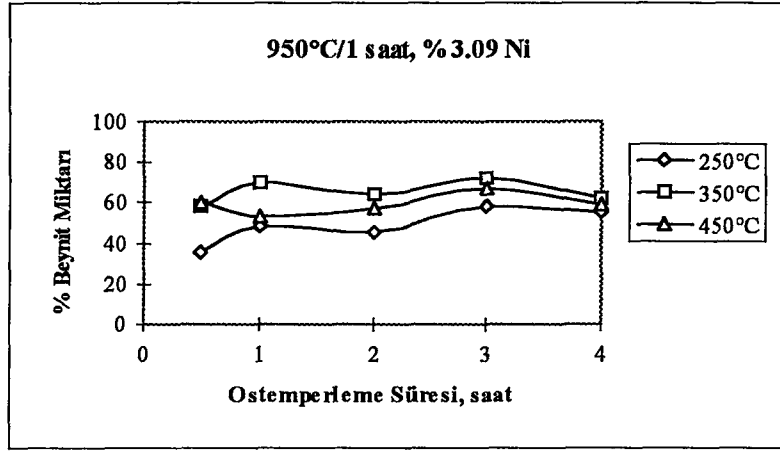
Şekil 6.29: 950°C'de ostenitlenmiş %0.5 Ni alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan sertliğin ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



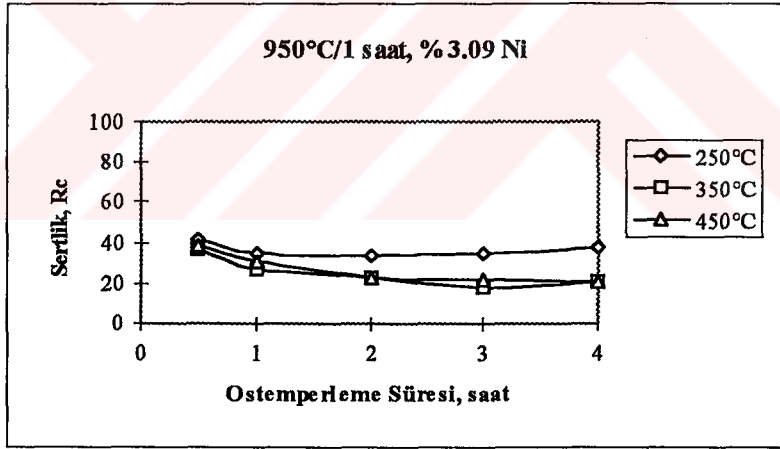
Şekil 6.30: 950°C’de ostenitlenmiş %1.64Ni alaşımı KGDD’de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



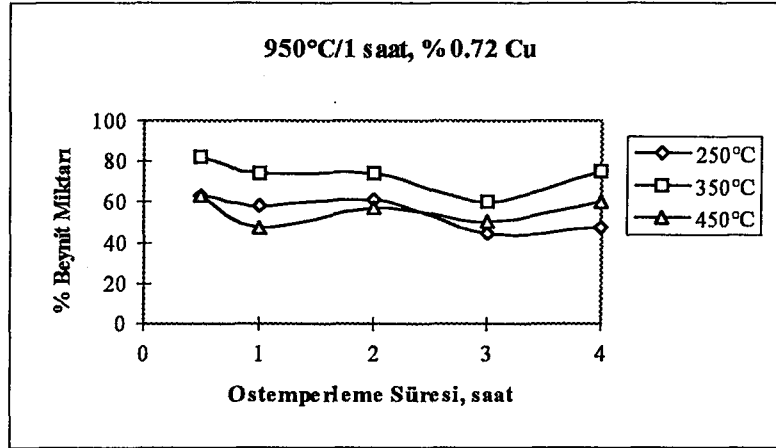
Şekil 6.31: 950°C’de ostenitlenmiş %1.64Ni alaşımı KGDD’de ostemperleme sonucu oluşan sertliğin ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



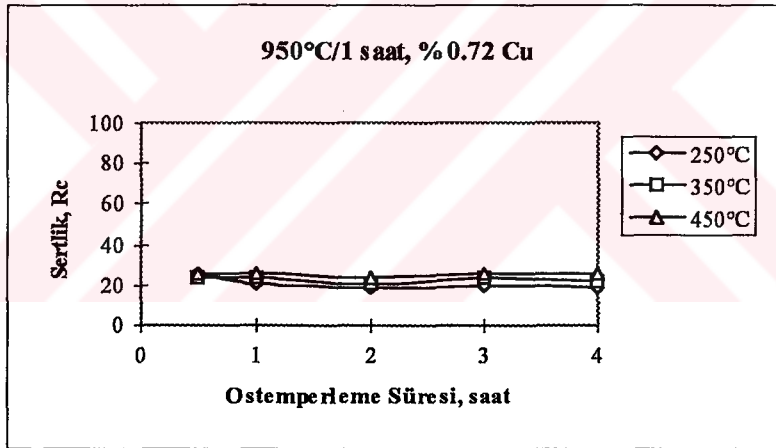
Şekil 6.32: 950°C’de ostenitlenmiş %3.09 Ni alaşımlı KGDD’de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



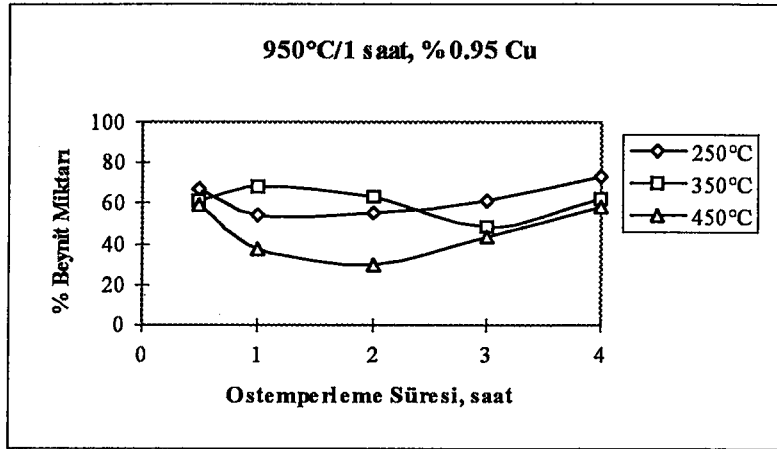
Şekil 6.33: 950°C’de ostenitlenmiş %3.09 Ni alaşımlı KGDD’de ostemperleme sonucu oluşan sertliğin ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



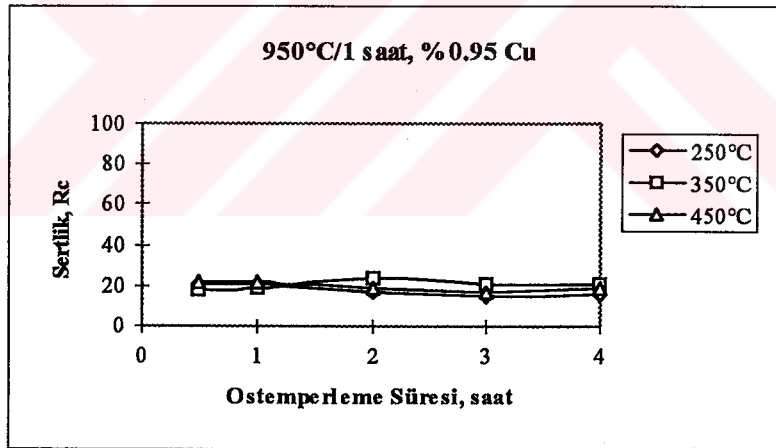
Şekil 6.34: 950°C'de ostenitlenmiş %0.72 Cu alaşımı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



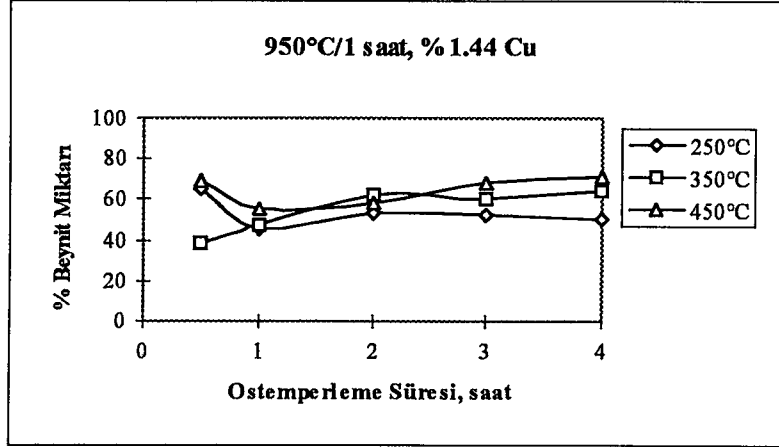
Şekil 6.35: 950°C'de ostenitlenmiş %0.72 Cu alaşımı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan sertliğin ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



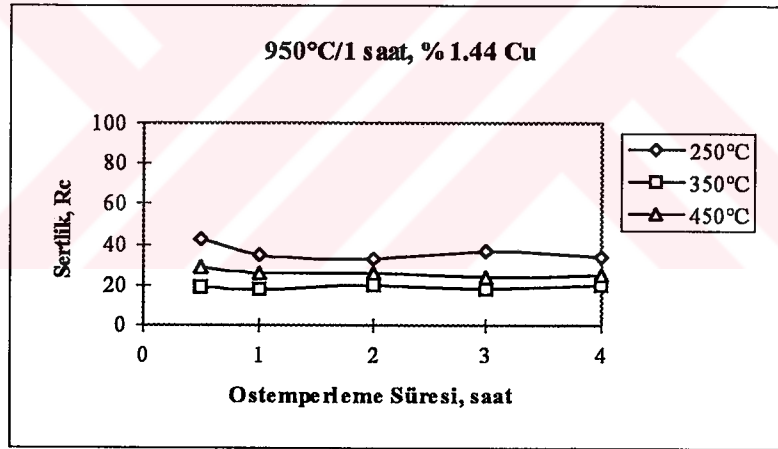
Şekil 6.36: 950°C'de ostenitlenmiş %0.95 Cu alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



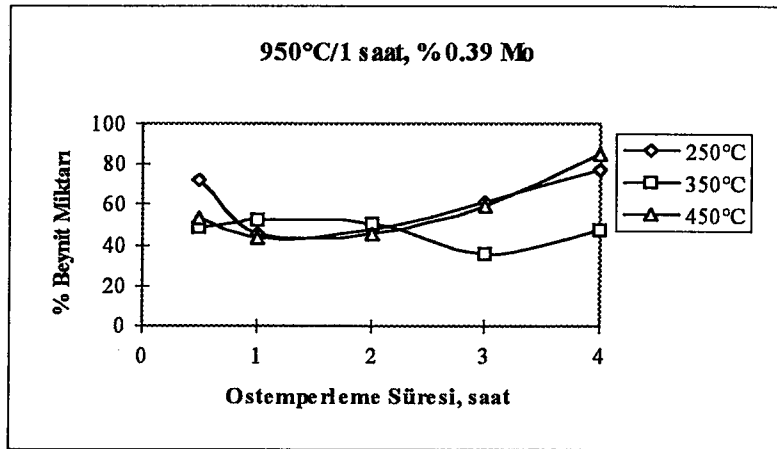
Şekil 6.37: 950°C'de ostenitlenmiş %0.95 Cu alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan sertliğin ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



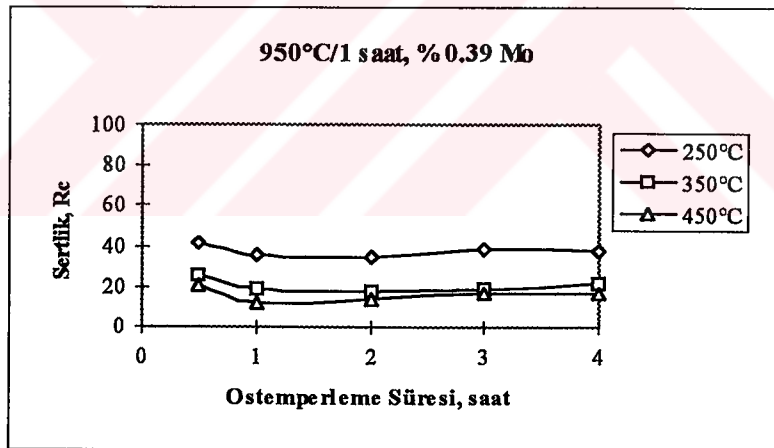
Şekil 6.38: 950°C’de ostenitlenmiş %1.44 Cu alaşımli KGDD’de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



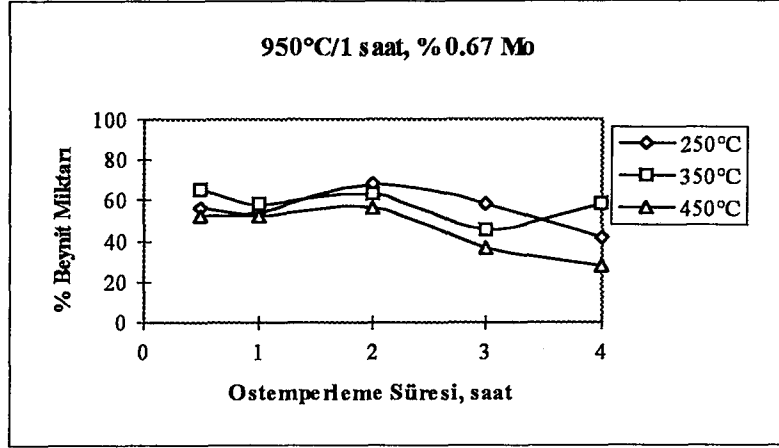
Şekil 6.39: 950°C’de ostenitlenmiş %1.44 Cu alaşımli KGDD’de ostemperleme sonucu oluşan sertliğin ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



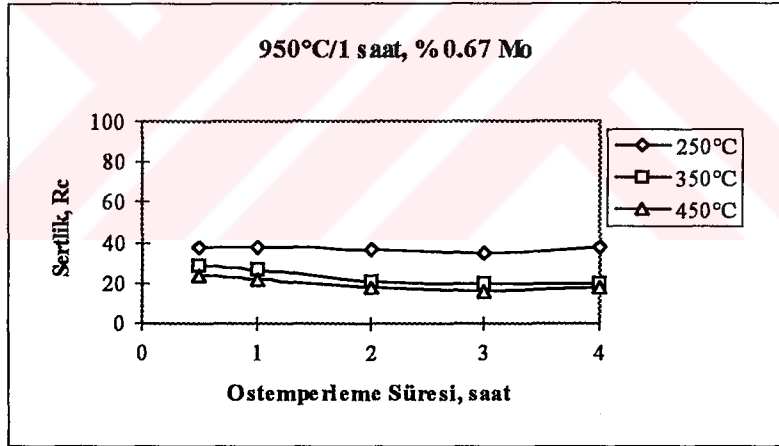
Şekil 6.40: 950°C'de ostenitlenmiş %0.39 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



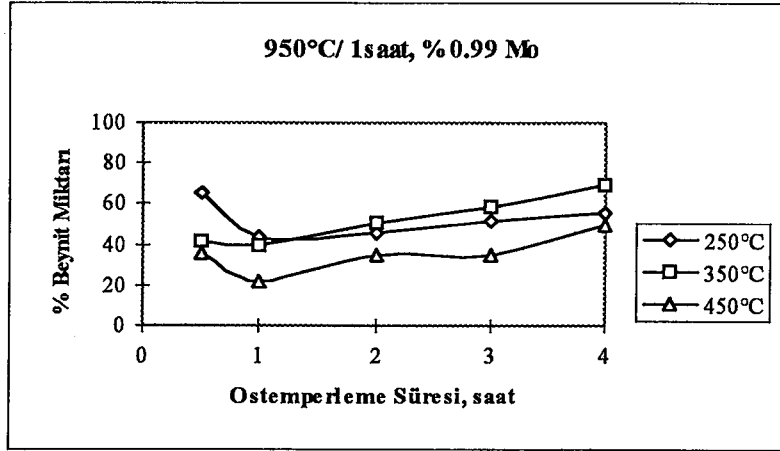
Şekil 6.41: 950°C'de ostenitlenmiş %0.39 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan sertliğin ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



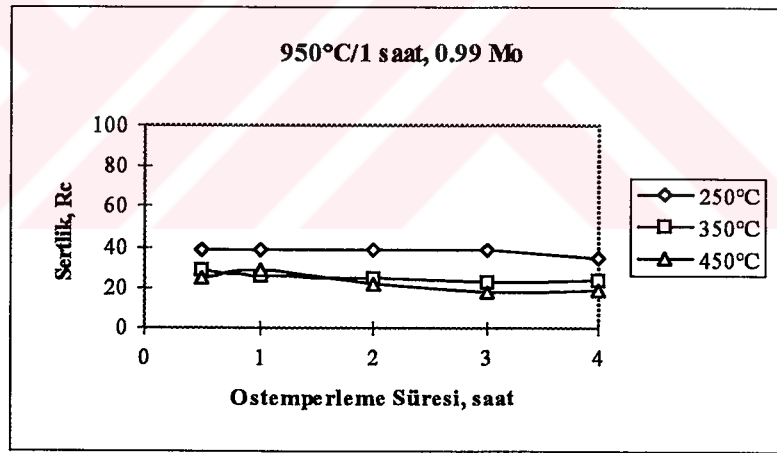
Şekil 6.42: 950°C'de ostenitlenmiş %0.67 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarının ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



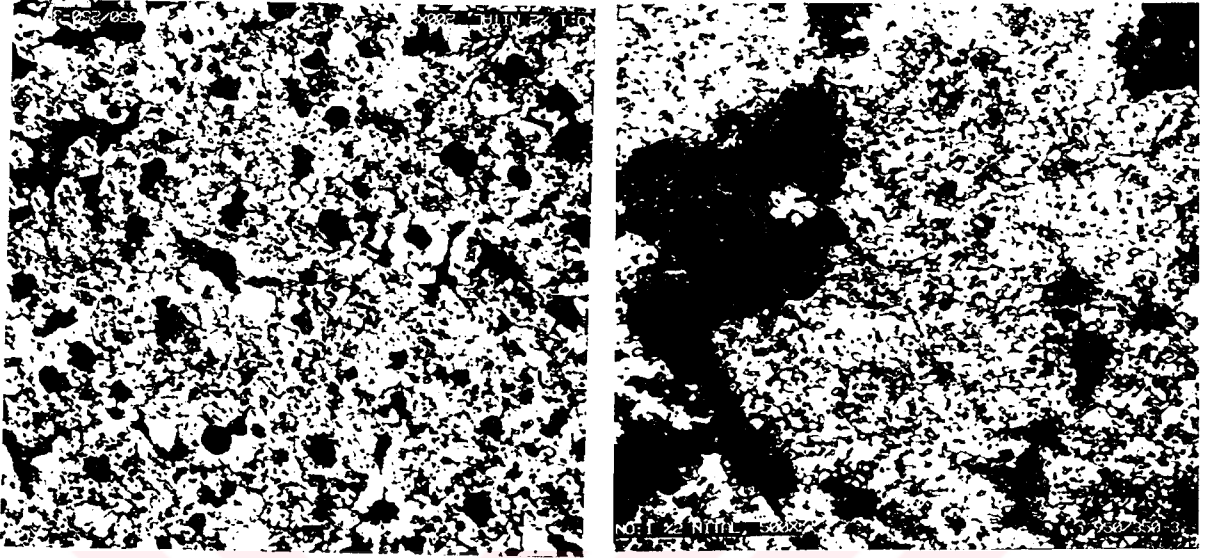
Şekil 6.43: 950°C'de ostenitlenmiş %0.67 Mo alaşımlı KGDD'de ostemperleme sonucu oluşan sertliğin ostemperleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



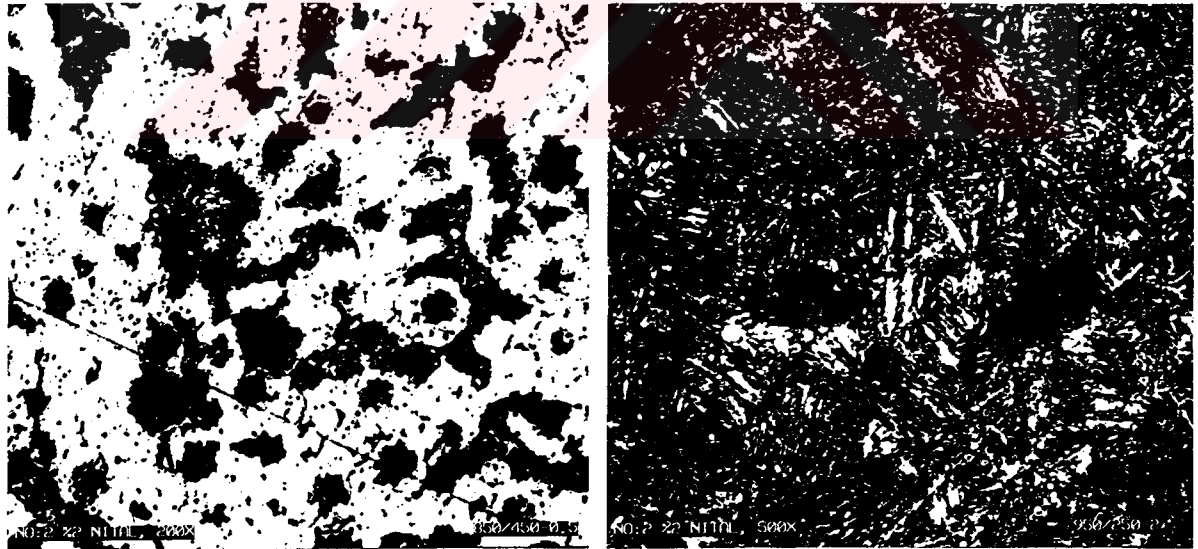
Şekil 6.44: 950°C'de ostenitlenmiş %0.99 Mo alaşımlı KGDD'de ostempereleme sonucu oluşan beynit miktarının ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



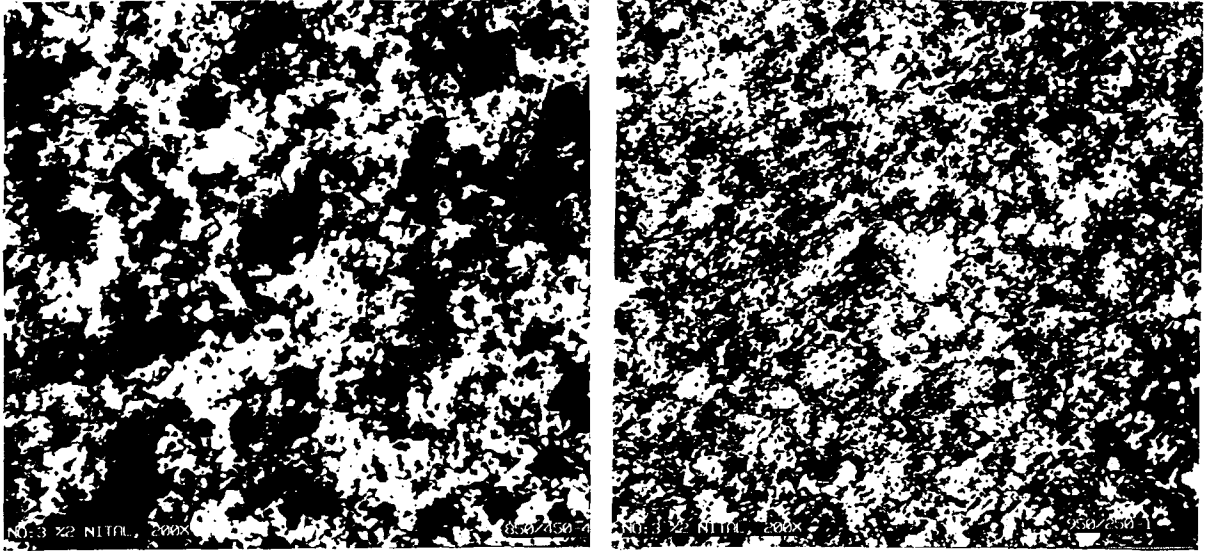
Şekil 6.45: 950°C'de ostenitlenmiş %0.99 Mo alaşımlı KGDD'de ostempereleme sonucu oluşan sertliğin ostempereleme süresi ve sıcaklığıyla değişimi.



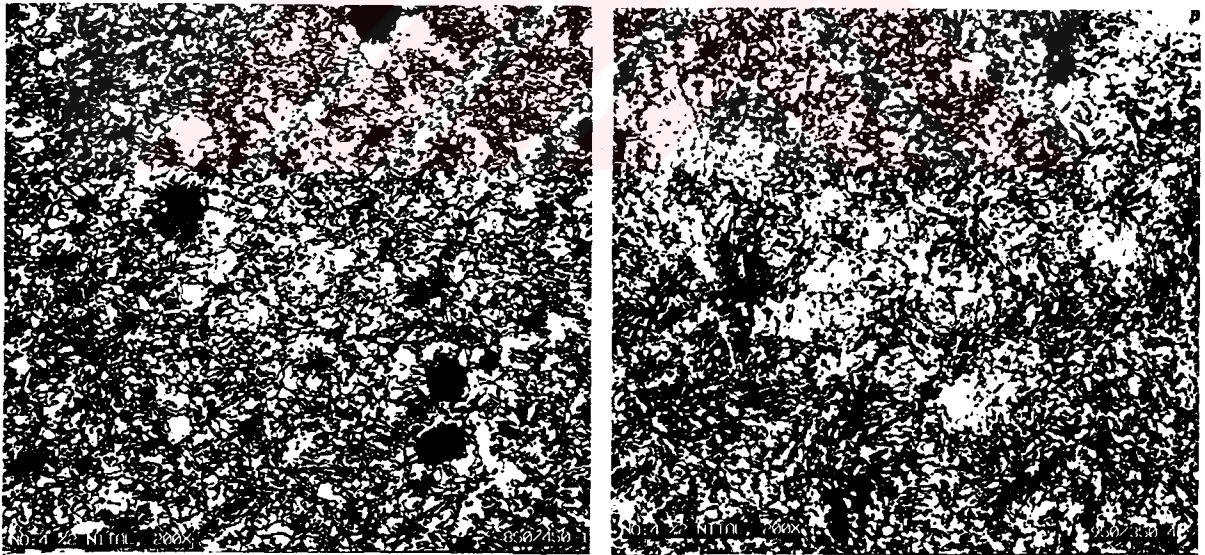
Şekil 6.46: a) Alaşımsız, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 3 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) Alaşımsız, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 350°C'de 3 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 500X).



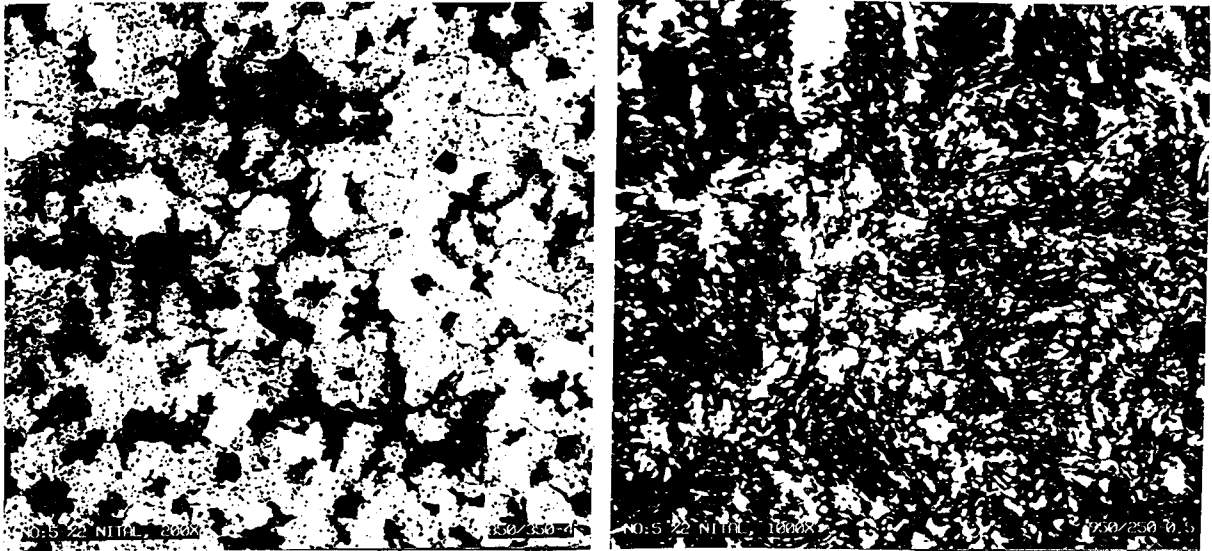
Şekil 6.47: a) %0.5 Ni alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 450°C'de 0.5 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) %0.5 Ni Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 2 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 500X).



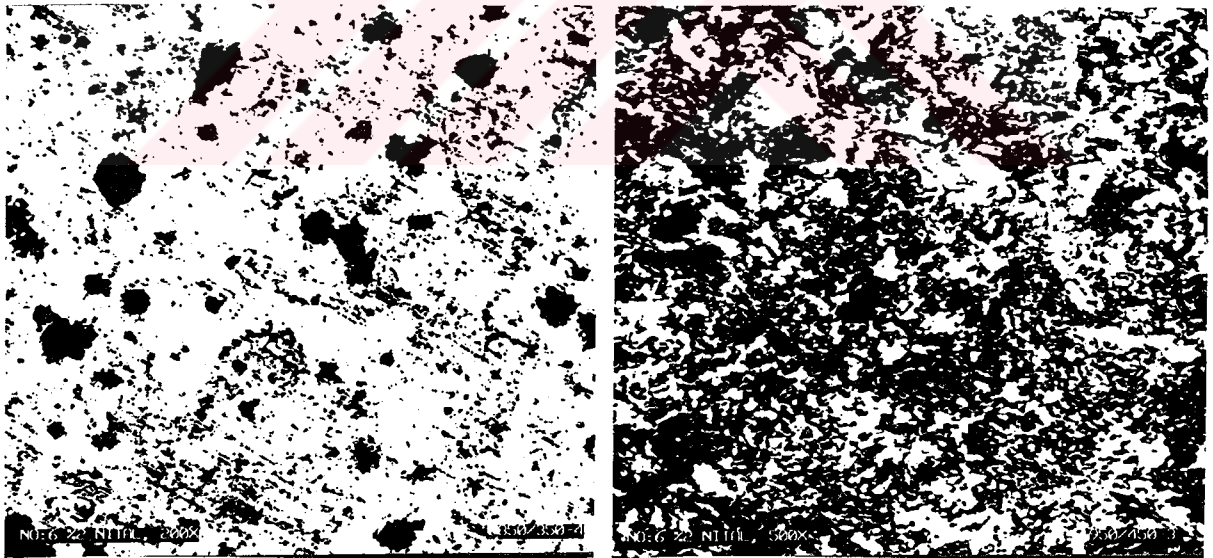
Şekil 6.48: a) %1.64 Ni alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 450°C'de 4 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) %1.64 Ni Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 1 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 200X).



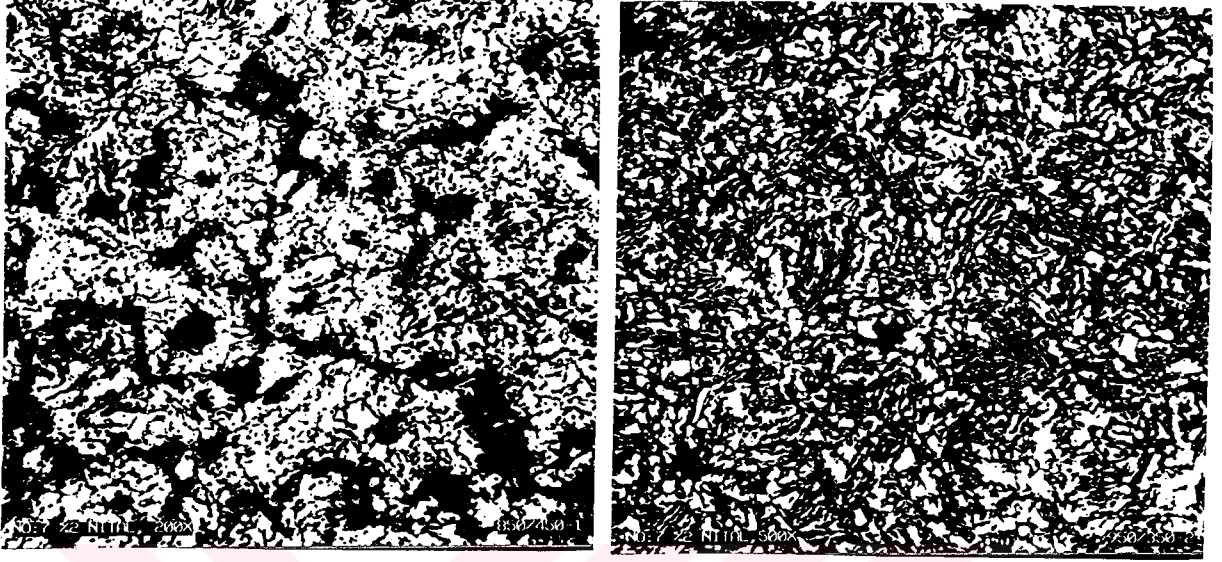
Şekil 6.49: a) %3.05 Ni alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 450°C'de 1 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) %3.05 Ni Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 350°C'de 4 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 200X).



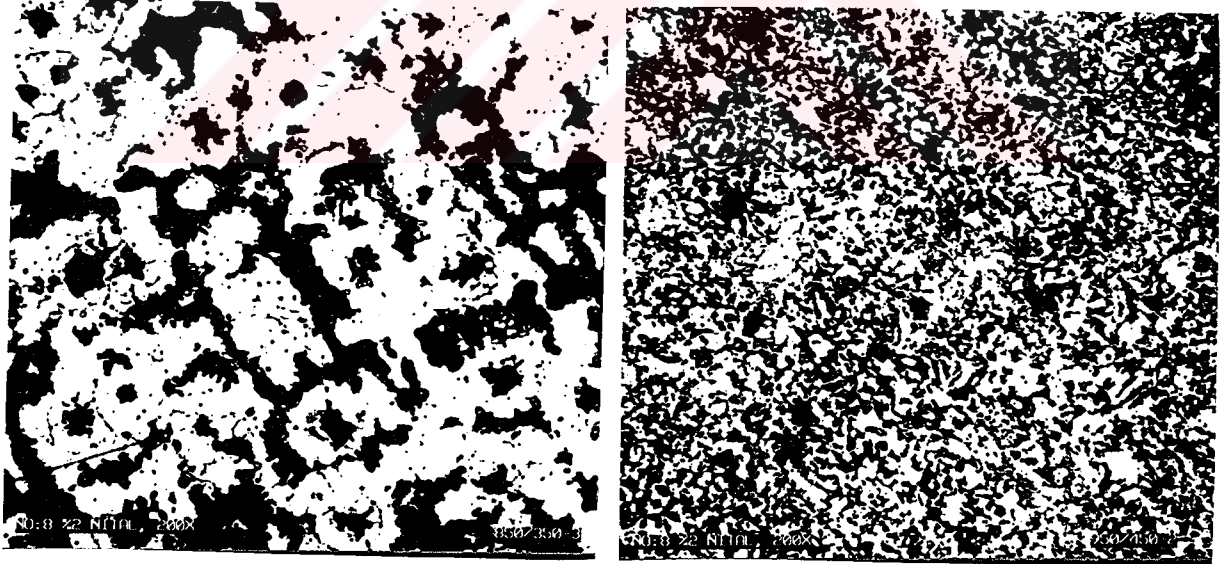
Şekil 6.50: a) %0.72 Cu alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 350°C'de 4 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) %0.72 Cu Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 0.5 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 1000X).



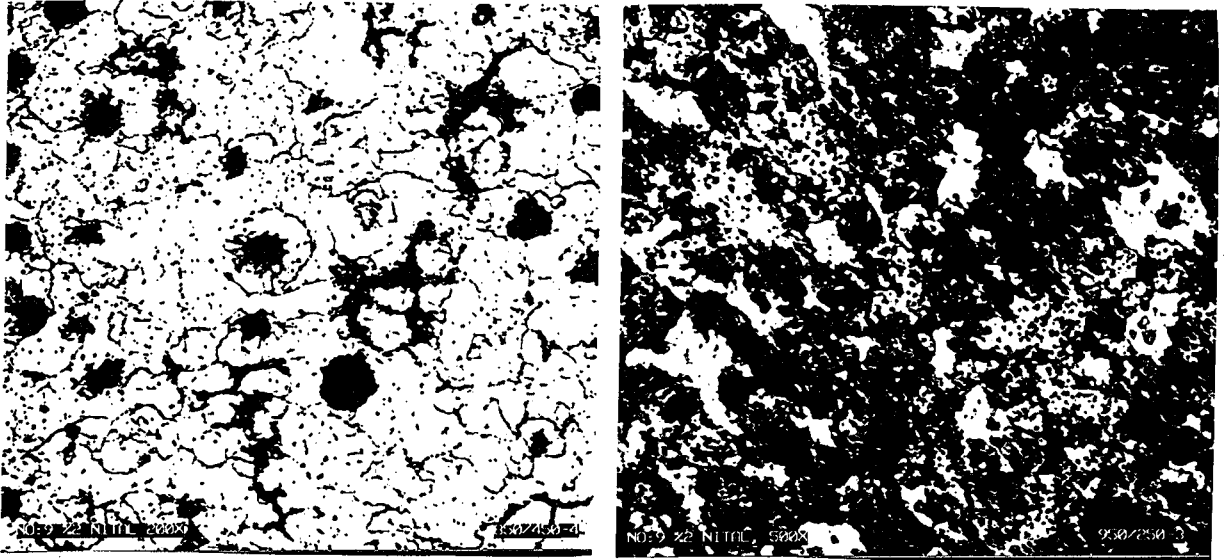
Şekil 6.51: a) %0.95 Cu alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 350°C'de 4 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) %0.95 Cu Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 450°C'de 3 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 500X).



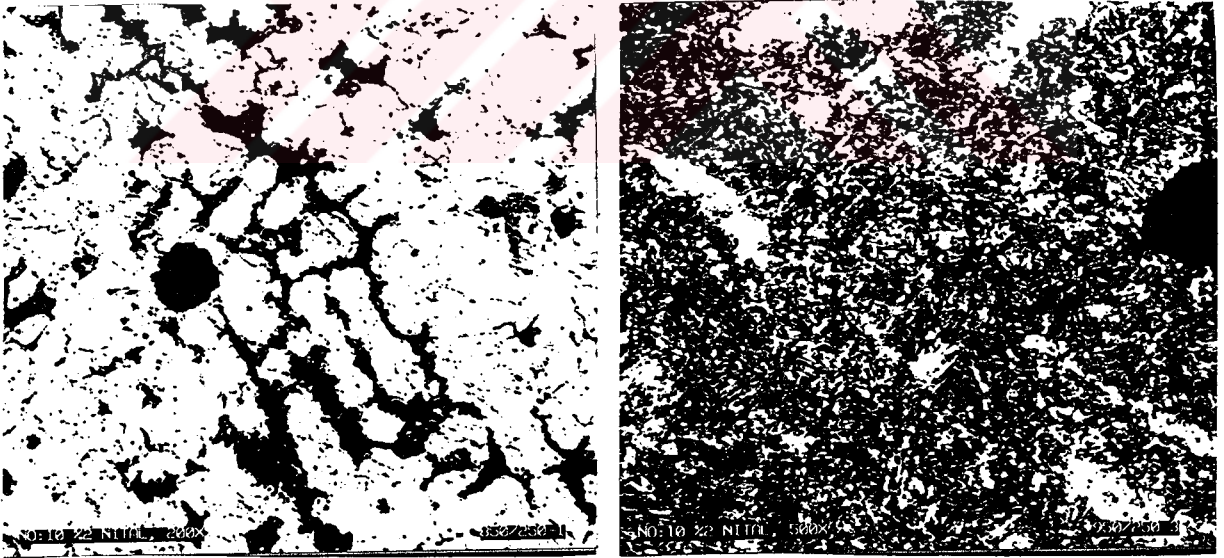
Şekil 6.52: a) %1.44 Cu alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 450°C'de 1 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) %1.44 Cu Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 350°C'de 2 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 500X).



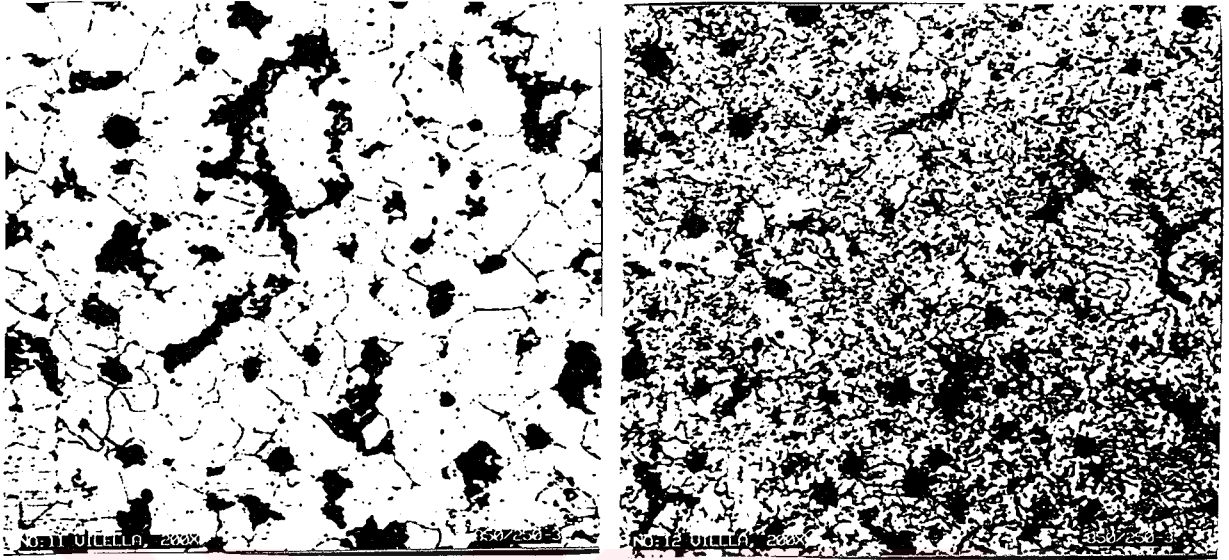
Şekil 6.53: a) %0.39 Mo alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 350°C'de 3 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) %0.39 Mo Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 450°C'de 2 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 500X).



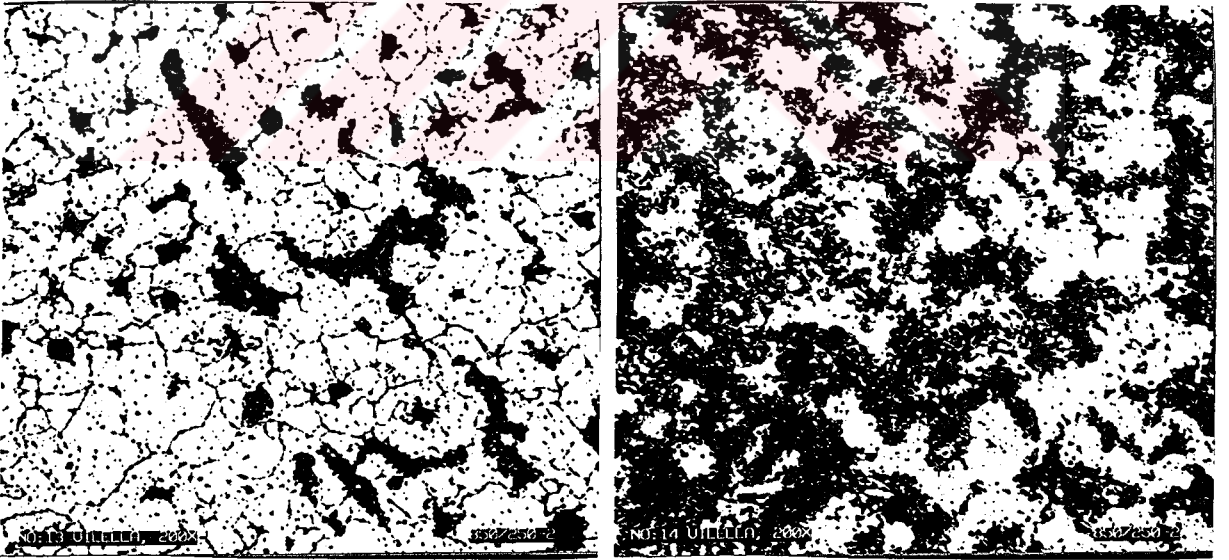
Şekil 6.54: a) %0.67 Mo alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 450°C'de 4 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) %0.67 Ni Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 3 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 500X).



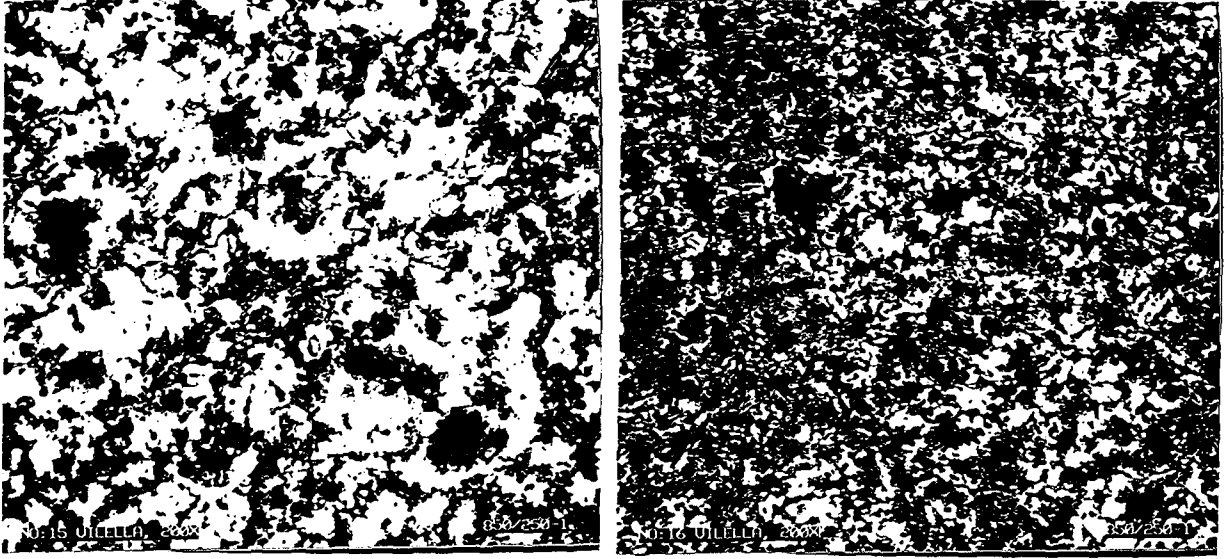
Şekil 6.55: a) %0.99 Mo alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 1 saat ostemperlenmiş (%2 Nital, 200X), b) %0.99 Mo Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 3 saat ostemperlenmiş (%2, Nital, 500X).



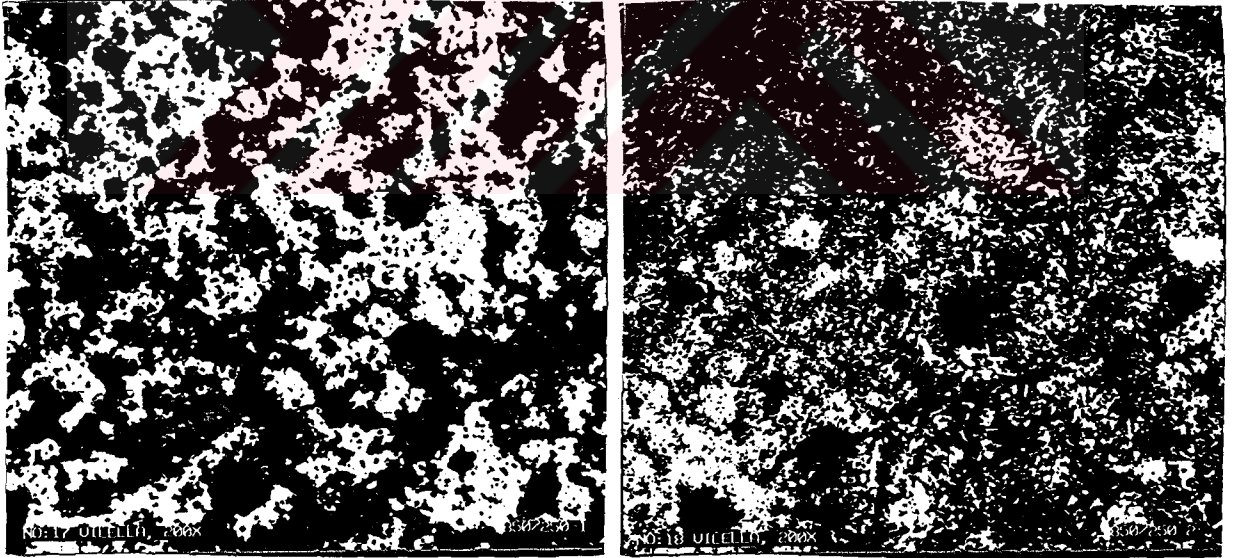
Şekil 6.56: a) %0.67 Cu, %0.61 Ni alaşımlı, 850°C’de 1 saat ostenitlenmiş, 250°C’de 3 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X), b) %1.46 Cu, %3.02 Ni Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C’de 3 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X).



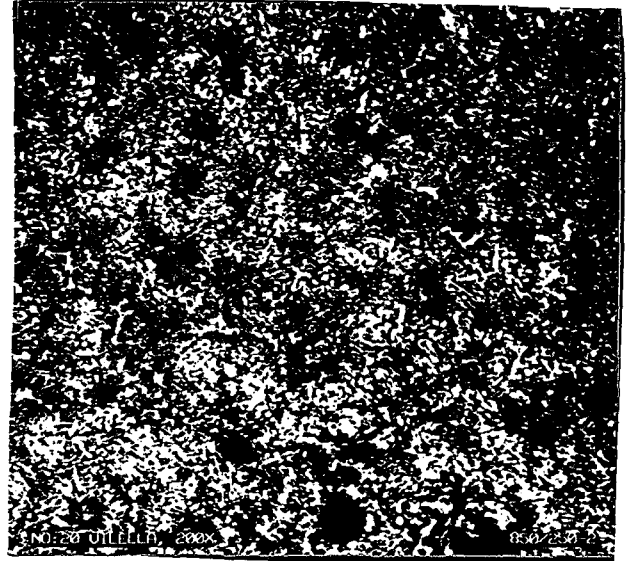
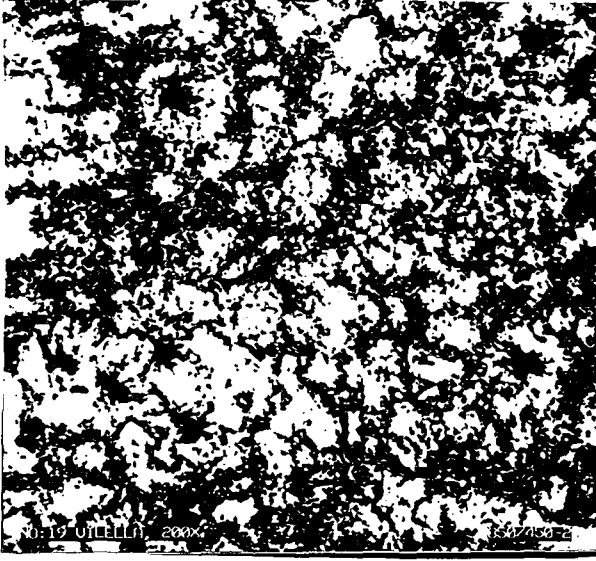
Şekil 6.57: a) %0.11 Cu , %0.64 Ni, %0.4 Mo alaşımlı, 850°C’de 1 saat ostenitlenmiş, 250°C’de 2 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X), b) %0.96 Mo, %2.8 Ni Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C’de 2 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X).



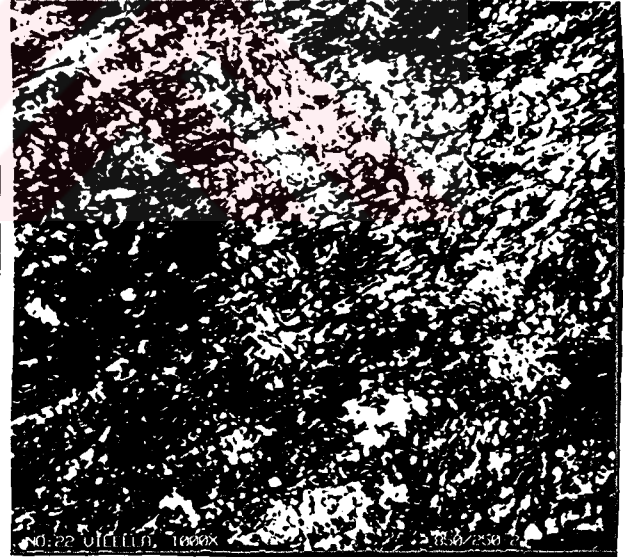
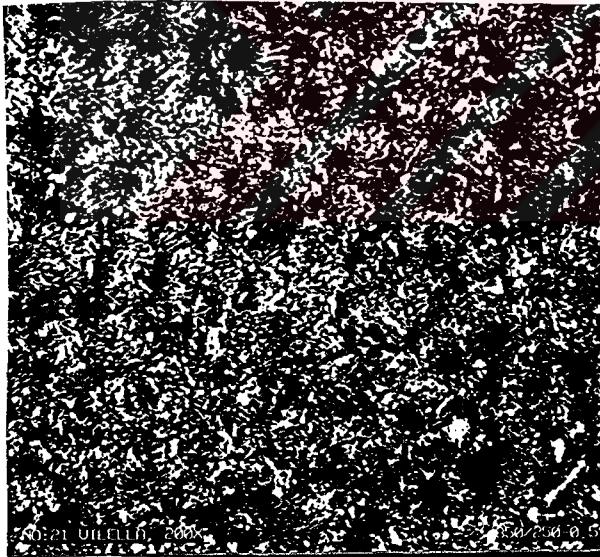
Şekil 6.58: a) %0.69 Cu, %0.63 Ni, %0.43 Mo alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 1 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X), b) %0.65 Cu, %2.96 Ni, %0.42 Mo Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 3 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X).



Şekil 6.59: a) %1.47 Cu, %0.58 Ni, %0.43 Mo alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 1 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X), b) %1.42 Cu, %3.12 Ni, %0.38 Mo Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 2 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X).



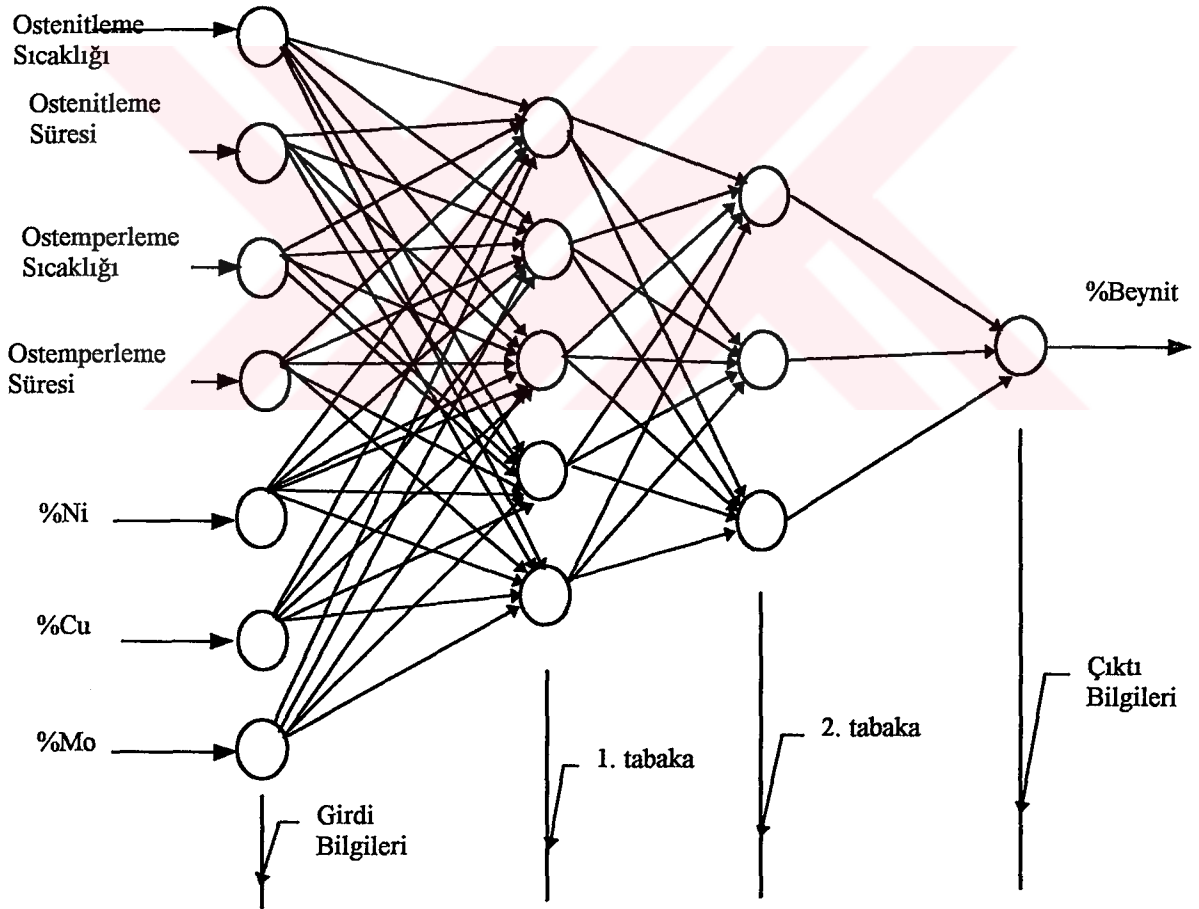
Şekil 6.60: a) %0.69 Cu, %0.59 Ni, %0.96 Mo alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 450°C'de 2 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X), b) %0.71 Cu, %2.9 Ni, %0.95 Mo Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 2 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X).



Şekil 6.61: a) %1.43 Cu, %0.56 Ni, %0.96 Mo alaşımlı, 850°C'de 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 0.5 saat ostemperlenmiş (Vilella, 200X), b) %1.44 Cu, %2.84 Ni, %0.93 Mo Alaşımlı, 950°Cde 1 saat ostenitlenmiş, 250°C'de 2 saat ostemperlenmiş (Vilella, 1000X).

6.5. Deneysel Sonuçlarının Sinirsel Ağ Sistemiyle Değerlendirilmesi

Elde edilen deneysel sonuçları, sinirsel ağ sisteminde üç gruba ayrılarak incelenmiştir. Birinci grupta 850°C’de ostenitlenmiş numunelerin ostemperleme sonucu oluşan beynit miktarları değerlendirilmiş, ikinci aşamada 950°C’de ostenitlenmiş numunelerin ostemperleme sonucu beynit miktarları ve üçüncü grupta 950°C’de ostenitlenmiş numunelerin ostemperleme sonucu sertlik değerleri değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde 5.bölümde detayları verilen genelleştirilmiş delta kuralı ve sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Bir veri grubu için kurulan sinirsel ağ motifi Şekil 6.62’de verilmiştir.



Şekil 6.62: Deneysel sonuçlarında, 1 gruba ait sinirsel ağ motifi.

Değerlendirme işlemini deneylerde kullanılan Şekil 6.62'deki motif üzerinde anlatmak mümkün olduğu halde işlem yoğunluğu nedeniyle bazı noktaların gözden kaçabileceği düşünülmüş ve işlem daha basit bir örnek ile anlatılmıştır.

6.5.1. Değerlendirme Algoritması

Deney sonuçlarının sinirsel ağ sistemiyle değerlendirilebilmesi için aşağıdaki algoritmaya uygun çalışan Turbo Pascal v7.0 program yazılmıştır. Programda orijinal pascal kütüphane dosyalarından yararlanıldığı için bazı menüler İngilizce'dir.

1. Girdi verilerinin okutulması;

Girdi bilgileri Tablo 6.2 ve 6.3 deki bilgilerin ilk yedi sütunu formata uygun olarak ASCII dosyalara yüklenmiş ve bu değerler programa I_i girdi bilgileri olarak okutulmuştur.

2. Çıktı bilgilerinin okutulması;

Çıktı bilgileri Tablo 6.2 ve 6.3'deki sekizinci sütunun ASCII dosyaya aktarılması ile oluşturulmuş ve Y_i çıktı bilgileri olarak programa okutulmuştur.

3. Ağırlık matrisinin oluşturulması;

Program kademe sayısını sorguladıktan sonra, girdi ve çıktı arasındaki motifleri belirler, ardından atanması gereken ağırlık sayısını hesaplar ve ağırlık matrisini -1 ile +1 arasından rassal sayılar atayarak oluşturur. Ağırlık değerleri W_{ij} olarak gösterilmiştir.

4. Rassal olarak eşik değeri atanır (θ_i)

5. Öğrenme oranı, momentum oranı ve keskinlik parametresi değerleri rassal olarak atanır (Bu değerler 0-1 arasında belirlenir).

$$6. O_i = f\left(\sum_{j=1}^n I_j W_{ij} - \theta_i\right)$$

$$f = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

fonksiyonları kullanılarak her kademe için çıktı değerleri hesaplanır.

7. Kademe, kademe çıktı değerlerinin hesaplanması tamamlanarak çıktı değerine ulaşılır. Sonuç olarak hesaplanan çıktı değeri O_i ile beklenen çıktı değeri Y_i mukayese edilir. eğer hata istenen sınırlar içindeyse işlem durdurulur, aksi halde ağırlıklar güncellenir.

$$\text{Hata} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (Y_i - O_i)^2$$

8. Ağırlıkları güncelleştirmek için;

$$\delta_i = (Y_i - O_i) f'(net_j) \text{ hesaplanır,}$$

$$\Delta W_{ij} = \eta \cdot \delta_i \cdot O_i \text{ ağırlık farkı hesaplanır.}$$

η : Öğrenme oranı

9. Yeni ağırlık değerleri hesaplanır (geriye doğru);

$$W_{ij}^{\text{Yeni}} = W_{ij}^{\text{Eski}} + \Delta W_{ij}$$

10. İkinci kademe için;

$$\delta_j = \sum_k (\delta_k W_{kj}) f'(net_j) \text{ formülü ile hesaplanır ve bu kademe içinde ağırlıklar}$$

güncellenir.

11. Yeni ağırlık matrisine göre, yeni çıktı değerleri hesaplanır ve işlem, hata istenen düzeye inene kadar devam ettirilir.

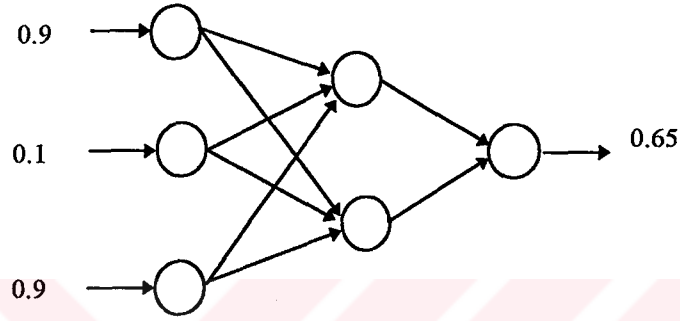
Yukarıda verilen algoritmanın daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıda bir örnek verilmiştir (Dağlı, 1994):

Girdi değerleri: $I [0.9 \ 0.1 \ 0.9]$

Çıktı değeri: $Y [0.65]$

Öğrenme oranı: $\eta: 0.5$ (seçildi)

Probleme ait ağ motifi şekil 6.63'de verilmiştir.



Şekil 6.63: Örnek probleme ait ağ motifi.

Rassal ağırlık matrisi: 1. kademe, $W^1 = \begin{bmatrix} 0.058 & -0.249 \\ -0.281 & -0.332 \\ 0.352 & 0.471 \end{bmatrix}$

2. kademe, $W^2 = \begin{bmatrix} 0.231 \\ -0.399 \end{bmatrix}$

Rassal eşik değerleri: $\theta^1 = [-0.187 \ -0.478]$

$\theta^2 = [0.399]$

Kullanılacak fonksiyon, sigmoid fonksiyonudur:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

$$f'(x) = \frac{e^{-x}}{(e^{-x} + 1)^2}$$

Tüm verilerden hareketle yapılan işlemler;

1) 1,2, ve 3 numaralı nörondan girişi yapılan değerler ve ağırlık matrisi yardımıyla 4 ve 5 numaralı nöronların alacağı giriş değerlerinin hesaplanması:

$$\text{Genel fonksiyon: } O_i = f\left(\sum_{j=1}^n I_j W_{ij} - \theta_i\right)$$

$$O_1^1 = f[0.9 \times 0.058 + 0.1(-0.281) + 0.9 \times 0.352 - (-0.187)]$$

$$O_1^1 = f(0.5279) = \frac{1}{1 + e^{-0.5279}} = 0.629$$

$$O_2^1 = f[0.9 \times (-0.249) + 0.1(-0.332) + 0.9 \times 0.471 - 0.478]$$

$$O_2^1 = f(-0.3114) = \frac{1}{1 + e^{0.3114}} = 0.423$$

$$O_1^2 = f[0.629 \times 0.231 + 0.423(-0.399) - 0.399]$$

$$O_1^2 = f(-0.422478) = \frac{1}{1 + e^{0.422478}} = 0.396$$

4. nöron girdi değeri: 0.629

5. nöron girdi değeri: 0.423

6. nöron girdi değeri: 0.396

Beklenen çıktı değeri $Y=0.65$, elde edilen çıkış değeri $O=0.396$ dir.

Bu durumda, mevcut ağırlık matrisini güncelleştirmek gerekmektedir. Ağırlık matrisi yenilenirken mutlaka sondan başa doğru gidilir (Geri yayılım).

2) Ağırlık matrisinin güncellenmesi:

$$\text{Genel fonksiyon: } \delta_i = (Y_i - O_i) f'(net_j)$$

$$\delta^2 = (0.65 - 0.396) \cdot f'(0.396)$$

$$\delta^2 = (0.65 - 0.396) \cdot \frac{e^{-0.396}}{(1 + e^{-0.396})^2} = 0.061$$

$$\Delta W_{ij} = \eta_i \delta_i O_i$$

$$W_1^2 = 0.5 \times 0.061 \times 0.629 = 0.019$$

$$W_2^2 = 0.5 \times 0.061 \times 0.423 = 0.013$$

$$\Delta W^2 = \begin{bmatrix} 0.019 \\ 0.013 \end{bmatrix}$$

3) Yeni ağırlık değerlerinin 2. tabaka için hesaplanması

$$W_1^2 = W_{1Eski}^2 + \Delta W_1^2$$

$$W_1^2 = 0.231 + 0.019 = 0.250$$

$$W_2^2 = -0.399 + 0.013 = -0.386$$

4) δ^2 , W^2 değerlerinin kullanılmasıyla, δ^1 değerleri hesaplanır.

$$\text{Genel fonksiyon: } \delta_j = \sum_k (\delta_k W_{kj}) f'(\text{net}_j)$$

$$\delta_1^1 = 0.061 \times 0.250 \times f'(0.629)$$

$$\delta_1^1 = 0.061 \times 0.250 \times \frac{e^{-0.629}}{(1 + e^{-0.629})^2} = 0.003$$

$$\delta_2^1 = 0.061 \times (-0.386) \times \frac{e^{-0.423}}{(1 + e^{-0.423})^2} = -0.006$$

$$\delta^1 = [0.003 \quad -0.006]$$

5) Birinci tabaka ağırlık matrisini güncelleştirmek için ΔW^1 fark ağırlık matrisi oluşturulur;

$$\text{Genel fonksiyon: } \Delta W_{ij} = \eta_i \delta_i O_i$$

$$\Delta W_1^1 = 0.5 \times 0.003 \times 0.9 = 0.0013$$

$$\Delta W_2^1 = 0.5 \times 0.003 \times 0.1 = 0.00015$$

$$\Delta W_3^1 = 0.5 \times 0.003 \times 0.9 = 0.0013$$

$$\Delta W_1^2 = 0.5 \times (-0.006) \times 0.9 = -0.0027$$

$$\Delta W_2^2 = 0.5 \times (-0.006) \times 0.1 = -0.0003$$

$$\Delta W_3^2 = 0.5 \times (-0.006) \times 0.9 = -0.0027$$

$$\Delta W^1 = \begin{bmatrix} 0.0013 & -0.0027 \\ 0.00015 & -0.0003 \\ 0.0013 & -0.0027 \end{bmatrix}$$

6) Güncelleştirilmiş W^1 ağırlık matrisi şöyledir:

$$W^1 = \begin{bmatrix} 0.0593 & -0.2517 \\ -0.2808 & -0.3323 \\ 0.3533 & 0.4683 \end{bmatrix}$$

7. Aynı işlem adımlarıyla yeni ağırlık değerleri kullanılarak sonuç çıktı değeri tekrar hesaplandığında,

$$O^2 = [0.4] \text{ bulunur.}$$

8) Hata hesabı yapılarak, işlemin devam ettirilip ettirilmeyeceğine karar verilir;

$$\text{Hata} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (Y_i - O_i)^2$$

$$\text{Hata} = \frac{1}{2} (0.65 - 0.4)^2 = 0.03$$

Bu çevrim, sonuçta bulunan değerle, aranan değer arasındaki hata istenen sınırlara gelinceye kadar devam ettirilir.

Tablo 6.3: Deney sonuçlarımıza ait değerlendirmede birinci grup öğrenme verileri.

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostemperleme Süresi saat	Ostemperleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %
850	1	0,144	0,062	0,000	0,5	250	13,9338
850	1	0,144	0,062	0,000	1	250	17,5694
850	1	0,144	0,062	0,000	3	250	23,4548
850	1	0,144	0,062	0,000	4	250	23,9217
850	1	0,144	0,062	0,000	0,5	350	30,5000
850	1	0,144	0,062	0,000	1	350	27,5000
850	1	0,144	0,062	0,000	2	350	33,5000
850	1	0,144	0,062	0,000	3	350	31,6000
850	1	0,144	0,062	0,000	0,5	450	23,5222
850	1	0,144	0,062	0,000	1	450	21,5646
850	1	0,144	0,062	0,000	2	450	27,5175
850	1	0,144	0,062	0,000	4	450	19,8375
850	1	0,112	0,574	0,000	0,5	250	37,5189
850	1	0,112	0,574	0,000	1	250	31,7873
850	1	0,112	0,574	0,000	2	250	35,6872
850	1	0,112	0,574	0,000	4	250	44,5748
850	1	0,112	0,574	0,000	0,5	350	39,9820
850	1	0,112	0,574	0,000	1	350	47,7000
850	1	0,112	0,574	0,000	2	350	47,2000
850	1	0,112	0,574	0,000	3	350	50,9878
850	1	0,112	0,574	0,000	0,5	450	26,6721
850	1	0,112	0,574	0,000	1	450	15,2107
850	1	0,112	0,574	0,000	2	450	18,8505
850	1	0,112	0,574	0,000	4	450	39,6537
850	1	0,024	1,640	0,007	0,5	250	44,3378
850	1	0,024	1,640	0,007	1	250	33,9410
850	1	0,024	1,640	0,007	2	250	49,7535
850	1	0,024	1,640	0,007	3	250	58,7000
850	1	0,024	1,640	0,007	4	250	74,7000
850	1	0,024	1,640	0,007	0,5	350	22,0026
850	1	0,024	1,640	0,007	2	350	28,4000
850	1	0,024	1,640	0,007	3	350	48,0000
850	1	0,024	1,640	0,007	4	350	51,3931
850	1	0,024	1,640	0,007	1	450	21,1866
850	1	0,024	1,640	0,007	2	450	37,3000
850	1	0,024	1,640	0,007	3	450	42,7000
850	1	0,024	1,640	0,007	4	450	46,0000
850	1	0,117	3,090	0,000	0,5	250	62,2283
850	1	0,117	3,090	0,000	2	250	45,7635
850	1	0,117	3,090	0,000	3	250	34,8854
850	1	0,117	3,090	0,000	4	250	44,5725
850	1	0,117	3,090	0,000	0,5	350	51,4545
850	1	0,117	3,090	0,000	1	350	44,0137
850	1	0,117	3,090	0,000	2	350	44,3278

Tablo 6.3 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %
850	1	0,117	3,090	0,000	4	350	62,1007
850	1	0,117	3,090	0,000	0,5	450	66,0000
850	1	0,117	3,090	0,000	1	450	59,8000
850	1	0,117	3,090	0,000	2	450	61,6037
850	1	0,117	3,090	0,000	4	450	72,0000
850	1	0,720	0,024	0,008	0,5	250	44,5569
850	1	0,720	0,024	0,008	1	250	34,0838
850	1	0,720	0,024	0,008	2	250	43,7000
850	1	0,720	0,024	0,008	3	250	43,6112
850	1	0,720	0,024	0,008	4	250	31,8000
850	1	0,720	0,024	0,008	0,5	350	16,2077
850	1	0,720	0,024	0,008	1	350	22,0000
850	1	0,720	0,024	0,008	3	350	49,5577
850	1	0,720	0,024	0,008	4	350	49,5000
850	1	0,720	0,024	0,008	0,5	450	38,3000
850	1	0,720	0,024	0,008	1	450	43,7457
850	1	0,720	0,024	0,008	2	450	52,4000
850	1	0,720	0,024	0,008	4	450	44,6943
850	1	0,951	0,018	0,006	0,5	250	22,0983
850	1	0,951	0,018	0,006	1	250	14,2000
850	1	0,951	0,018	0,006	2	250	9,0000
850	1	0,951	0,018	0,006	3	250	5,6252
850	1	0,951	0,018	0,006	0,5	350	37,6091
850	1	0,951	0,018	0,006	1	350	32,2997
850	1	0,951	0,018	0,006	2	350	22,4368
850	1	0,951	0,018	0,006	3	350	26,4280
850	1	0,951	0,018	0,006	4	350	33,9352
850	1	0,951	0,018	0,006	0,5	450	27,2074
850	1	0,951	0,018	0,006	1	450	16,4000
850	1	0,951	0,018	0,006	2	450	13,0373
850	1	0,951	0,018	0,006	4	450	28,0000
850	1	1,440	0,018	0,005	0,5	250	47,2689
850	1	1,440	0,018	0,005	1	250	24,5903
850	1	1,440	0,018	0,005	2	250	40,7509
850	1	1,440	0,018	0,005	3	250	52,0880
850	1	1,440	0,018	0,005	4	250	56,5000
850	1	1,440	0,018	0,005	0,5	350	28,5000
850	1	1,440	0,018	0,005	1	350	20,6192
850	1	1,440	0,018	0,005	3	350	35,5000
850	1	1,440	0,018	0,005	4	350	37,7914
850	1	1,440	0,018	0,005	0,5	450	49,5447
850	1	1,440	0,018	0,005	1	450	41,6000
850	1	1,440	0,018	0,005	3	450	66,0000
850	1	1,440	0,018	0,005	4	450	69,5000
850	1	0,031	0,017	0,388	0,5	250	10,5445

Tablo 6.3 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %
850	1	0,031	0,017	0,388	1	250	17,2000
850	1	0,031	0,017	0,388	2	250	16,0148
850	1	0,031	0,017	0,388	3	250	14,6984
850	1	0,031	0,017	0,388	4	250	47,1641
850	1	0,031	0,017	0,388	1	350	8,4000
850	1	0,031	0,017	0,388	2	350	19,6000
850	1	0,031	0,017	0,388	3	350	22,0000
850	1	0,031	0,017	0,388	0,5	450	5,2887
850	1	0,031	0,017	0,388	1	450	3,3866
850	1	0,031	0,017	0,388	2	450	5,1694
850	1	0,031	0,017	0,388	3	450	4,2935
850	1	0,031	0,017	0,388	4	450	45,5641
850	1	0,056	0,018	0,671	0,5	250	18,8644
850	1	0,056	0,018	0,671	2	250	11,5000
850	1	0,056	0,018	0,671	3	250	18,1808
850	1	0,056	0,018	0,671	4	250	21,5728
850	1	0,056	0,018	0,671	0,5	350	8,6480
850	1	0,056	0,018	0,671	1	350	17,0000
850	1	0,056	0,018	0,671	2	350	24,2000
850	1	0,056	0,018	0,671	4	350	24,9783
850	1	0,056	0,018	0,671	0,5	450	12,2416
850	1	0,056	0,018	0,671	1	450	7,1000
850	1	0,056	0,018	0,671	2	450	8,9800
850	1	0,056	0,018	0,671	3	450	14,0000
850	1	0,056	0,018	0,671	4	450	21,7634
850	1	0,104	0,021	0,990	1	250	16,4401
850	1	0,104	0,021	0,990	2	250	29,4229
850	1	0,104	0,021	0,990	3	250	31,8000
850	1	0,104	0,021	0,990	4	250	44,3616
850	1	0,104	0,021	0,990	0,5	350	42,7451
850	1	0,104	0,021	0,990	1	350	29,4000
850	1	0,104	0,021	0,990	3	350	50,0000
850	1	0,104	0,021	0,990	4	350	55,2000
850	1	0,104	0,021	0,990	0,5	450	37,1000
850	1	0,104	0,021	0,990	1	450	11,4110
850	1	0,104	0,021	0,990	2	450	20,6000
850	1	0,104	0,021	0,990	4	450	29,7672
850	1	0,670	0,614	0,000	0,5	250	27,7882
850	1	0,670	0,614	0,000	1	250	11,9794
850	1	0,670	0,614	0,000	2	250	10,5635
850	1	0,670	0,614	0,000	4	250	38,8393
850	1	0,670	0,614	0,000	0,5	350	25,4732
850	1	0,670	0,614	0,000	1	350	12,8149
850	1	0,670	0,614	0,000	2	350	15,8774
850	1	0,670	0,614	0,000	4	350	21,9410
850	1	0,670	0,614	0,000	0,5	450	29,2442

Tablo 6.3 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostemperleme Süresi saat	Ostemperleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %
850	1	0,670	0,614	0,000	1	450	51,1133
850	1	0,670	0,614	0,000	2	450	34,5829
850	1	0,670	0,614	0,000	3	450	48,7509
850	1	0,670	0,614	0,000	4	450	63,4634
850	1	1,460	3,020	0,003	0,5	250	42,0215
850	1	1,460	3,020	0,003	1	250	42,0053
850	1	1,460	3,020	0,003	2	250	52,3426
850	1	1,460	3,020	0,003	3	250	32,0149
850	1	1,460	3,020	0,003	0,5	350	68,3051
850	1	1,460	3,020	0,003	1	350	52,3071
850	1	1,460	3,020	0,003	2	350	55,4795
850	1	1,460	3,020	0,003	3	350	47,9497
850	1	1,460	3,020	0,003	4	350	58,4937
850	1	1,460	3,020	0,003	0,5	450	46,2803
850	1	1,460	3,020	0,003	1	450	51,3395
850	1	1,460	3,020	0,003	3	450	65,7139
850	1	1,460	3,020	0,003	4	450	56,8202
850	1	0,114	0,640	0,398	0,5	250	3,8807
850	1	0,114	0,640	0,398	1	250	1,2980
850	1	0,114	0,640	0,398	2	250	7,9806
850	1	0,114	0,640	0,398	4	250	26,4578
850	1	0,114	0,640	0,398	0,5	350	7,7791
850	1	0,114	0,640	0,398	1	350	39,7251
850	1	0,114	0,640	0,398	2	350	31,1814
850	1	0,114	0,640	0,398	4	350	27,1362
850	1	0,114	0,640	0,398	0,5	450	23,6714
850	1	0,114	0,640	0,398	1	450	18,2007
850	1	0,114	0,640	0,398	2	450	17,3685
850	1	0,114	0,640	0,398	3	450	17,9216
850	1	0,114	0,640	0,398	4	450	30,3112
850	1	0,067	2,830	0,965	0,5	250	50,7950
850	1	0,067	2,830	0,965	1	250	50,4731
850	1	0,067	2,830	0,965	2	250	55,0035
850	1	0,067	2,830	0,965	3	250	68,5693
850	1	0,067	2,830	0,965	1	350	48,9775
850	1	0,067	2,830	0,965	2	350	58,0793
850	1	0,067	2,830	0,965	3	350	48,2175
850	1	0,067	2,830	0,965	4	350	54,2947
850	1	0,067	2,830	0,965	0,5	450	37,1760
850	1	0,067	2,830	0,965	1	450	31,1158
850	1	0,067	2,830	0,965	2	450	36,4751
850	1	0,067	2,830	0,965	3	450	45,4431
850	1	0,696	0,627	0,428	0,5	250	55,1430
850	1	0,696	0,627	0,428	1	250	57,8101
850	1	0,696	0,627	0,428	2	250	69,0803

Tablo 6.3 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostemperleme Süresi saat	Ostemperleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %
850	1	0,696	0,627	0,428	3	250	70,4504
850	1	0,696	0,627	0,428	4	250	69,8675
850	1	0,696	0,627	0,428	1	350	62,5849
850	1	0,696	0,627	0,428	2	350	33,3093
850	1	0,696	0,627	0,428	3	350	62,2997
850	1	0,696	0,627	0,428	4	350	52,7282
850	1	0,696	0,627	0,428	0,5	450	30,8916
850	1	0,696	0,627	0,428	1	450	39,8473
850	1	0,696	0,627	0,428	2	450	51,0761
850	1	0,696	0,627	0,428	3	450	60,6914
850	1	0,648	2,960	0,420	0,5	250	30,0215
850	1	0,648	2,960	0,420	1	250	45,8952
850	1	0,648	2,960	0,420	2	250	46,8859
850	1	0,648	2,960	0,420	3	250	64,6462
850	1	0,648	2,960	0,420	4	250	56,7426
850	1	0,648	2,960	0,420	0,5	350	51,2668
850	1	0,648	2,960	0,420	2	350	63,3762
850	1	0,648	2,960	0,420	3	350	59,1125
850	1	0,648	2,960	0,420	4	350	61,3647
850	1	0,648	2,960	0,420	0,5	450	58,3208
850	1	0,648	2,960	0,420	1	450	39,5107
850	1	0,648	2,960	0,420	2	450	57,5006
850	1	0,648	2,960	0,420	3	450	46,5020
850	1	0,648	2,960	0,420	4	450	38,3851
850	1	1,470	0,582	0,428	0,5	250	51,7462
850	1	1,470	0,582	0,428	1	250	35,4423
850	1	1,470	0,582	0,428	3	250	50,1247
850	1	1,470	0,582	0,428	4	250	34,8462
850	1	1,470	0,582	0,428	0,5	350	59,2095
850	1	1,470	0,582	0,428	1	350	46,9156
850	1	1,470	0,582	0,428	3	350	44,1544
850	1	1,470	0,582	0,428	4	350	41,2792
850	1	1,470	0,582	0,428	0,5	450	21,1669
850	1	1,470	0,582	0,428	1	450	23,4663
850	1	1,470	0,582	0,428	2	450	31,6574
850	1	1,470	0,582	0,428	4	450	43,5497
850	1	1,420	3,120	0,386	0,5	250	57,9827
850	1	1,420	3,120	0,386	1	250	69,2430
850	1	1,420	3,120	0,386	2	250	74,5156
850	1	1,420	3,120	0,386	3	250	64,3804
850	1	1,420	3,120	0,386	0,5	350	64,2363
850	1	1,420	3,120	0,386	1	350	45,9793
850	1	1,420	3,120	0,386	2	350	70,1705
850	1	1,420	3,120	0,386	3	350	69,5827
850	1	1,420	3,120	0,386	4	350	70,3410
850	1	1,420	3,120	0,386	0,5	450	53,6601

Tablo 6.3 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostemperleme Süresi saat	Ostemperleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %
850	1	1,420	3,120	0,386	2	450	43,3759
850	1	1,420	3,120	0,386	3	450	58,6589
850	1	1,420	3,120	0,386	4	450	48,5927
850	1	0,693	0,598	0,962	0,5	250	41,5600
850	1	0,693	0,598	0,962	1	250	74,5275
850	1	0,693	0,598	0,962	2	250	49,8212
850	1	0,693	0,598	0,962	4	250	63,2442
850	1	0,693	0,598	0,962	0,5	350	61,7491
850	1	0,693	0,598	0,962	1	350	50,5668
850	1	0,693	0,598	0,962	2	350	63,9261
850	1	0,693	0,598	0,962	3	350	53,8052
850	1	0,693	0,598	0,962	0,5	450	34,4962
850	1	0,693	0,598	0,962	1	450	60,3332
850	1	0,693	0,598	0,962	2	450	39,6384
850	1	0,693	0,598	0,962	3	450	45,7462
850	1	0,693	0,598	0,962	4	450	47,9760
850	1	0,711	2,910	0,959	0,5	250	64,2427
850	1	0,711	2,910	0,959	2	250	63,6185
850	1	0,711	2,910	0,959	3	250	74,1366
850	1	0,711	2,910	0,959	4	250	71,4716
850	1	0,711	2,910	0,959	0,5	350	63,2078
850	1	0,711	2,910	0,959	1	350	72,7699
850	1	0,711	2,910	0,959	3	350	57,1228
850	1	0,711	2,910	0,959	4	350	65,2207
850	1	0,711	2,910	0,959	0,5	450	56,8144
850	1	0,711	2,910	0,959	1	450	48,4764
850	1	0,711	2,910	0,959	2	450	64,3476
850	1	0,711	2,910	0,959	3	450	56,6645
850	1	0,711	2,910	0,959	4	450	65,2603
850	1	1,430	0,575	0,963	0,5	250	62,7649
850	1	1,430	0,575	0,963	2	250	64,3558
850	1	1,430	0,575	0,963	3	250	53,9860
850	1	1,430	0,575	0,963	4	250	70,0590
850	1	1,430	0,575	0,963	0,5	350	59,4776
850	1	1,430	0,575	0,963	1	350	69,4107
850	1	1,430	0,575	0,963	2	350	68,4846
850	1	1,430	0,575	0,963	4	350	55,2260
850	1	1,430	0,575	0,963	0,5	450	46,0706
850	1	1,430	0,575	0,963	1	450	39,4940
850	1	1,430	0,575	0,963	2	450	34,6791
850	1	1,430	0,575	0,963	3	450	42,0013
850	1	1,430	0,575	0,963	4	450	57,0733
850	1	1,440	2,840	0,926	1	250	43,9599
850	1	1,440	2,840	0,926	2	250	72,2819
850	1	1,440	2,840	0,926	3	250	65,7829
850	1	1,440	2,840	0,926	4	250	67,1739

Tablo 6.3 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %
850	1	1,440	2,840	0,926	0,5	350	63,9562
850	1	1,440	2,840	0,926	2	350	82,0579
850	1	1,440	2,840	0,926	3	350	69,3887
850	1	1,440	2,840	0,926	4	350	64,2369
850	1	1,440	2,840	0,926	0,5	450	54,1515
850	1	1,440	2,840	0,926	1	450	53,7065
850	1	1,440	2,840	0,926	3	450	60,5651
850	1	1,440	2,840	0,926	4	450	66,3715

Tablo 6.4: Deney sonuçlarımıza ait değerlendirmede ikinci grup öğrenme verileri.

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %	Sertlik Rc
950	1	0,144	0,062	0,000	0,5	250	54,115	36,1
950	1	0,144	0,062	0,000	1	250	80,714	35,8
950	1	0,144	0,062	0,000	2	250	70,958	38,5
950	1	0,144	0,062	0,000	3	250	84,183	36,7
950	1	0,144	0,062	0,000	4	250	77,179	32,3
950	1	0,144	0,062	0,000	0,5	350	41,564	25,2
950	1	0,144	0,062	0,000	2	350	45,421	30,4
950	1	0,144	0,062	0,000	3	350	52,926	29,5
950	1	0,144	0,062	0,000	4	350	50,942	28,5
950	1	0,144	0,062	0,000	0,5	450	33,304	24,0
950	1	0,144	0,062	0,000	1	450	48,459	24,2
950	1	0,144	0,062	0,000	2	450	28,794	18,9
950	1	0,144	0,062	0,000	3	450	29,857	19,2
950	1	0,144	0,062	0,000	4	450	85,335	20,1
950	1	0,112	0,574	0,000	0,5	250	77,883	39,8
950	1	0,112	0,574	0,000	1	250	75,400	36,1
950	1	0,112	0,574	0,000	3	250	81,600	32,0
950	1	0,112	0,574	0,000	4	250	85,245	26,7
950	1	0,112	0,574	0,000	0,5	350	75,315	22,7
950	1	0,112	0,574	0,000	1	350	70,500	21,4
950	1	0,112	0,574	0,000	2	350	76,733	24,4
950	1	0,112	0,574	0,000	3	350	78,011	24,9
950	1	0,112	0,574	0,000	4	350	75,648	24,9
950	1	0,112	0,574	0,000	0,5	450	59,613	21,2
950	1	0,112	0,574	0,000	1	450	67,400	18,2
950	1	0,112	0,574	0,000	2	450	63,040	13,6
950	1	0,112	0,574	0,000	3	450	55,984	14,2
950	1	0,024	1,640	0,007	0,5	250	42,351	34,7
950	1	0,024	1,640	0,007	1	250	48,559	34,5
950	1	0,024	1,640	0,007	2	250	57,805	29,7

Tablo 6.4 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %	Sertlik Rc
950	1	0,024	1,640	0,007	3	250	65,847	27,2
950	1	0,024	1,640	0,007	4	250	70,081	30,4
950	1	0,024	1,640	0,007	0,5	350	52,849	22,2
950	1	0,024	1,640	0,007	2	350	46,300	22,9
950	1	0,024	1,640	0,007	3	350	56,900	21,0
950	1	0,024	1,640	0,007	4	350	75,200	19,4
950	1	0,024	1,640	0,007	0,5	450	44,459	20,7
950	1	0,024	1,640	0,007	1	450	40,995	22,9
950	1	0,024	1,640	0,007	2	450	33,772	18,4
950	1	0,024	1,640	0,007	3	450	50,600	17,0
950	1	0,024	1,640	0,007	4	450	59,300	20,1
950	1	0,117	3,090	0,000	1	250	48,812	35,0
950	1	0,117	3,090	0,000	2	250	45,567	33,5
950	1	0,117	3,090	0,000	3	250	58,641	34,7
950	1	0,117	3,090	0,000	4	250	55,307	37,8
950	1	0,117	3,090	0,000	0,5	350	58,162	36,5
950	1	0,117	3,090	0,000	1	350	70,000	26,9
950	1	0,117	3,090	0,000	3	350	72,570	18,0
950	1	0,117	3,090	0,000	4	350	61,996	20,9
950	1	0,117	3,090	0,000	0,5	450	60,784	39,0
950	1	0,117	3,090	0,000	1	450	53,000	30,9
950	1	0,117	3,090	0,000	2	450	57,573	22,8
950	1	0,117	3,090	0,000	3	450	66,972	21,9
950	1	0,117	3,090	0,000	4	450	58,919	21,2
950	1	0,720	0,024	0,008	0,5	250	63,334	25,8
950	1	0,720	0,024	0,008	1	250	58,753	21,2
950	1	0,720	0,024	0,008	3	250	44,214	20,0
950	1	0,720	0,024	0,008	4	250	47,919	19,0
950	1	0,720	0,024	0,008	0,5	350	81,747	24,2
950	1	0,720	0,024	0,008	1	350	74,185	23,9
950	1	0,720	0,024	0,008	2	350	74,396	21,0
950	1	0,720	0,024	0,008	3	350	60,378	23,3
950	1	0,720	0,024	0,008	4	350	75,032	22,0
950	1	0,720	0,024	0,008	1	450	47,860	26,2
950	1	0,720	0,024	0,008	2	450	57,899	24,2
950	1	0,720	0,024	0,008	3	450	50,800	25,4
950	1	0,720	0,024	0,008	4	450	60,454	25,7
950	1	0,951	0,018	0,006	0,5	250	67,536	20,6
950	1	0,951	0,018	0,006	1	250	54,671	20,4
950	1	0,951	0,018	0,006	2	250	55,376	16,6
950	1	0,951	0,018	0,006	3	250	60,900	14,9
950	1	0,951	0,018	0,006	4	250	73,300	15,8
950	1	0,951	0,018	0,006	0,5	350	60,980	17,8
950	1	0,951	0,018	0,006	1	350	68,400	18,8
950	1	0,951	0,018	0,006	2	350	63,067	24,0
950	1	0,951	0,018	0,006	3	350	48,831	21,2
950	1	0,951	0,018	0,006	4	350	62,000	20,7

Tablo 6.4 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %	Sertlik Rc
950	1	0,951	0,018	0,006	0,5	450	58,963	21,7
950	1	0,951	0,018	0,006	2	450	29,377	18,5
950	1	0,951	0,018	0,006	3	450	43,896	16,9
950	1	0,951	0,018	0,006	4	450	58,000	18,7
950	1	1,440	0,018	0,005	0,5	250	65,762	42,2
950	1	1,440	0,018	0,005	1	250	45,668	34,6
950	1	1,440	0,018	0,005	2	250	53,707	32,5
950	1	1,440	0,018	0,005	3	250	52,192	36,7
950	1	1,440	0,018	0,005	0,5	350	38,914	19,1
950	1	1,440	0,018	0,005	1	350	47,696	17,4
950	1	1,440	0,018	0,005	2	350	62,675	20,0
950	1	1,440	0,018	0,005	3	350	60,763	18,2
950	1	1,440	0,018	0,005	4	350	63,984	19,8
950	1	1,440	0,018	0,005	0,5	450	68,904	28,9
950	1	1,440	0,018	0,005	1	450	54,960	25,4
950	1	1,440	0,018	0,005	2	450	58,573	25,6
950	1	1,440	0,018	0,005	3	450	67,972	24,0
950	1	1,440	0,018	0,005	4	450	71,210	24,9
950	1	0,031	0,017	0,388	1	250	46,000	35,5
950	1	0,031	0,017	0,388	2	250	48,000	34,7
950	1	0,031	0,017	0,388	3	250	61,311	38,5
950	1	0,031	0,017	0,388	4	250	77,500	37,9
950	1	0,031	0,017	0,388	0,5	350	48,242	26,0
950	1	0,031	0,017	0,388	1	350	52,494	18,8
950	1	0,031	0,017	0,388	2	350	50,609	17,8
950	1	0,031	0,017	0,388	3	350	35,517	18,9
950	1	0,031	0,017	0,388	4	350	47,213	21,6
950	1	0,031	0,017	0,388	1	450	43,185	12,2
950	1	0,031	0,017	0,388	2	450	45,693	14,3
950	1	0,031	0,017	0,388	3	450	59,567	17,3
950	1	0,031	0,017	0,388	4	450	85,626	16,9
950	1	0,056	0,018	0,671	0,5	250	56,332	37,3
950	1	0,056	0,018	0,671	2	250	68,213	36,6
950	1	0,056	0,018	0,671	3	250	58,294	35,1
950	1	0,056	0,018	0,671	4	250	41,777	37,9
950	1	0,056	0,018	0,671	0,5	350	65,603	28,7
950	1	0,056	0,018	0,671	1	350	58,261	26,5
950	1	0,056	0,018	0,671	2	350	63,328	20,7
950	1	0,056	0,018	0,671	3	350	45,865	20,1
950	1	0,056	0,018	0,671	4	350	58,403	19,8
950	1	0,056	0,018	0,671	0,5	450	52,642	23,4
950	1	0,056	0,018	0,671	1	450	52,169	21,7
950	1	0,056	0,018	0,671	2	450	56,166	18,2
950	1	0,056	0,018	0,671	4	450	27,896	17,8
950	1	0,104	0,021	0,990	0,5	250	65,120	38,9
950	1	0,104	0,021	0,990	1	250	44,000	38,6
950	1	0,104	0,021	0,990	2	250	45,360	38,5

Tablo 6.4 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %	Sertlik R _C
950	1	0,104	0,021	0,990	3	250	51,000	38,4
950	1	0,104	0,021	0,990	4	250	55,200	35,1
950	1	0,104	0,021	0,990	1	350	39,600	25,7
950	1	0,104	0,021	0,990	2	350	50,222	24,7
950	1	0,104	0,021	0,990	3	350	58,753	22,4
950	1	0,104	0,021	0,990	4	350	69,657	23,5
950	1	0,104	0,021	0,990	0,5	450	35,691	24,7
950	1	0,104	0,021	0,990	1	450	21,500	29,2
950	1	0,104	0,021	0,990	2	450	35,000	21,6
950	1	0,104	0,021	0,990	4	450	49,081	18,7

Tablo 6.5: Birinci grup öğrenme verileri için test verileri.

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %
850	1	0,144	0,062	0,000	2	250	21,3176
850	1	0,144	0,062	0,000	4	350	33,0000
850	1	0,144	0,062	0,000	3	450	26,8149
850	1	0,112	0,574	0,000	3	250	47,0043
850	1	0,112	0,574	0,000	4	350	48,8000
850	1	0,112	0,574	0,000	3	450	31,1980
850	1	0,024	1,640	0,007	1	350	28,9000
850	1	0,024	1,640	0,007	0,5	450	24,0121
850	1	0,117	3,090	0,000	1	250	56,1238
850	1	0,117	3,090	0,000	3	350	55,8976
850	1	0,117	3,090	0,000	3	450	68,4000
850	1	0,720	0,024	0,008	2	350	33,2875
850	1	0,720	0,024	0,008	3	450	52,4000
850	1	0,951	0,018	0,006	4	250	19,9141
850	1	0,951	0,018	0,006	3	450	22,2000
850	1	1,440	0,018	0,005	2	350	30,7409
850	1	1,440	0,018	0,005	2	450	56,0000
850	1	0,031	0,017	0,388	0,5	350	8,6196
850	1	0,031	0,017	0,388	4	350	25,3000
850	1	0,056	0,018	0,671	1	250	11,3000
850	1	0,056	0,018	0,671	3	350	26,0000
850	1	0,104	0,021	0,990	0,5	250	17,0758
850	1	0,104	0,021	0,990	2	350	39,0282
850	1	0,104	0,021	0,990	3	450	24,2000
850	1	0,670	0,614	0,000	3	250	6,8411
850	1	0,670	0,614	0,000	3	350	32,8954
850	1	1,460	3,020	0,003	4	250	37,9744
850	1	1,460	3,020	0,003	2	450	46,0689

Tablo 6.5 (Devam)

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %
850	1	0,114	0,640	0,398	3	250	29,3990
850	1	0,114	0,640	0,398	3	350	26,5234
850	1	0,067	2,830	0,965	4	250	62,2621
850	1	0,067	2,830	0,965	0,5	350	50,5536
850	1	0,067	2,830	0,965	4	450	60,1469
850	1	0,696	0,627	0,428	0,5	350	45,8708
850	1	0,696	0,627	0,428	4	450	42,3154
850	1	0,648	2,960	0,420	1	350	49,9975
850	1	1,470	0,582	0,428	2	250	30,9098
850	1	1,470	0,582	0,428	2	350	43,7263
850	1	1,470	0,582	0,428	3	450	50,7839
850	1	1,420	3,120	0,386	4	250	79,7685
850	1	1,420	3,120	0,386	1	450	46,8825
850	1	0,693	0,598	0,962	3	250	53,5595
850	1	0,693	0,598	0,962	4	350	55,6239
850	1	0,711	2,910	0,959	1	250	53,0840
850	1	0,711	2,910	0,959	2	350	50,7377
850	1	1,430	0,575	0,963	1	250	64,1140
850	1	1,430	0,575	0,963	3	350	67,8344
850	1	1,440	2,840	0,926	0,5	250	40,1919
850	1	1,440	2,840	0,926	1	350	75,0312
850	1	1,440	2,840	0,926	2	450	57,8873

Tablo 6.6: İkinci grup öğrenme verileri için test verileri.

Ostenitleme Sıcaklığı °C	Ostenitleme Süresi saat	Cu %	Ni %	Mo %	Ostempereleme Süresi saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Beynit Miktarı %	Sertlik Rc
950	1	0,144	0,062	0,000	1	350	32,487	30,8
950	1	0,112	0,574	0,000	2	250	85,400	37,9
950	1	0,112	0,574	0,000	4	450	57,056	11,8
950	1	0,024	1,640	0,007	1	350	35,138	22,0
950	1	0,117	3,090	0,000	0,5	250	35,544	41,6
950	1	0,117	3,090	0,000	2	350	64,688	22,8
950	1	0,720	0,024	0,008	2	250	61,091	18,6
950	1	0,720	0,024	0,008	0,5	450	63,504	25,5
950	1	0,951	0,018	0,006	1	450	38,000	21,8
950	1	1,440	0,018	0,005	4	250	50,394	33,4
950	1	0,031	0,017	0,388	0,5	250	71,949	42,0
950	1	0,031	0,017	0,388	0,5	450	53,927	21,0
950	1	0,056	0,018	0,671	1	250	54,545	37,6
950	1	0,056	0,018	0,671	3	450	36,943	15,9
950	1	0,104	0,021	0,990	0,5	350	41,286	29,1
950	1	0,104	0,021	0,990	3	450	34,600	18,2

6.5.2. Sinirsel Ağ Sistemiyle Elde Edilen Sonuçlar

Sinirsel ağ sistemine deney sonuçları öğretildikten sonra, test verileri için tahmin yaptırılmıştır. Test verileri sisteme öğretilmemiş olan deney sonuçlarıdır ve rassal olarak seçilmiştir. Tablo 6.7’de 850°C’de ostenitlenmiş ve alaşım elementlerinin teker teker buldukları durum için sinirsel ağın tahmin ettiği değerler ve deney sonunda elde edilen gerçek değerler karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.7: 850°C’de ostenitlenmiş 1. grup numunelere ait deney ve sinirsel ağ sonuçları

% Ni	%Cu	%Mo	Ostempereleme Süresi Saat	Ostempereleme Sıcaklığı °C	Deney Sonucu Beynit Miktarı (x100) %	Tahmin Edilen Değer (x100)	Hata (x100)
0	0	0	2	250	0,213176	0,2120	0,00118
0	0	0	4	350	0,330000	0,2910	0,03900
0	0	0	3	450	0,268149	0,2740	-0,00585
0,574	0	0	3	250	0,470043	0,4200	0,05004
0,574	0	0	4	350	0,488000	0,4850	0,00300
0,574	0	0	3	450	0,311980	0,3850	-0,07302
1,64	0	0	1	350	0,289000	0,3140	-0,02500
1,64	0	0	0,5	450	0,240121	0,3130	-0,07288
3,09	0	0	1	250	0,561238	0,5570	0,00424
3,09	0	0	3	350	0,558976	0,4850	0,07398
3,09	0	0	3	450	0,684000	0,4730	0,21100
0	0,72	0	2	350	0,332875	0,3580	-0,02513
0	0,72	0	3	450	0,524000	0,3580	0,16600
0	0,951	0	4	250	0,199141	0,1080	0,09114
0	0,951	0	3	450	0,222000	0,2540	-0,03200
0	1,44	0	2	350	0,307409	0,2440	0,06341
0	1,44	0	2	450	0,560000	0,4990	0,06100
0	0	0,388	0,5	350	0,086196	0,0950	-0,00880
0	0	0,388	4	350	0,253000	0,2630	-0,01000
0	0	0,671	1	250	0,113000	0,1320	-0,01900
0	0	0,671	3	350	0,260000	0,2640	-0,00400
0	0	0,99	0,5	250	0,170758	0,1910	-0,02024
0	0	0,99	2	350	0,390282	0,3770	0,01328
0	0	0,99	3	450	0,242000	0,2510	-0,00900

Tablo 6.8’de 850°C’de ostenitlenmiş ve alaşım elementlerini ikli veya üçlü birarada içeren KGDD’lere ait sinirsel ağ tahmin değerleri, deney sonunda elde edilen gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.8: 850°C’de ostenitlenmiş 2. grup numunelere ait deney ve sinirsel ağ sonuçları

% Cu	%Ni	%Mo	Ostemplleme Süresi Saat	Ostemplleme Sıcaklığı °C	Deney Sonucu Beynit Miktarı (x100) %	Tahmin Edilen Değer (x100)	Hata (x100)
0,67	0,614	0	3	250	0,068411	0,113	-0,04459
0,67	0,614	0	3	350	0,328954	0,338	-0,00905
1,46	3,02	0	4	250	0,379744	0,466	-0,08626
1,46	3,02	0	2	450	0,460689	0,499	-0,03831
0	0,64	0,398	3	250	0,29399	0,230	0,06399
0	0,64	0,398	3	350	0,265234	0,262	0,00323
0	2,83	0,965	4	250	0,622621	0,577	0,04562
0	2,83	0,965	0,5	350	0,505536	0,411	0,09454
0	2,83	0,965	4	450	0,601469	0,583	0,01847
0,696	0,627	0,428	0,5	350	0,458708	0,459	-0,00029
0,696	0,627	0,428	4	450	0,423154	0,454	-0,03085
0,648	2,96	0,42	1	350	0,499975	0,494	0,00598
1,47	0,582	0,428	2	250	0,309098	0,356	-0,04690
1,47	0,582	0,428	2	350	0,437263	0,484	-0,04674
1,47	0,582	0,428	3	450	0,507839	0,445	0,06284
1,42	3,12	0,386	4	250	0,797685	0,646	0,15169
1,42	3,12	0,386	1	450	0,468825	0,535	-0,06618
0,693	0,598	0,962	3	250	0,535595	0,585	-0,04940
0,693	0,598	0,962	4	350	0,556239	0,588	-0,03176
0,711	2,91	0,959	1	250	0,53084	0,542	-0,01116
0,711	2,91	0,959	2	350	0,507377	0,513	-0,00562
1,43	0,575	0,963	1	250	0,64114	0,604	0,03714
1,43	0,575	0,963	3	350	0,678344	0,658	0,02034
1,44	2,84	0,926	0,5	250	0,401919	0,412	-0,01008
1,44	2,84	0,926	1	350	0,750312	0,758	-0,00769
1,44	2,84	0,926	2	450	0,578873	0,570	0,00887

Tablo 6.9’de 950°C’de ostenitlenmiş ve alaşım elementlerinin teker teker buldukları durum için sinirsel ağın tahmin ettiği değerler ve deney sonunda elde edilen gerçek değerler karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.9: 950°C’de ostenitlenmiş 1. grup numunelere ait deney ve sinirsel ağ sonuçları

% Cu	%Ni	%Mo	Ostemplleme Süresi Saat	Ostemplleme Sıcaklığı °C	Deney Sonucu Beynit Miktarı (x100) %	Tahmin Edilen Değer (x100)	Hata (x100)
1	350	0	0,062	0	0,32487	0,328	-0,00313
2	250	0	0,574	0	0,854	0,789	0,06500
4	450	0	0,574	0	0,57056	0,583	-0,01244
1	350	0	1,64	0	0,35138	0,354	-0,00262
0,5	250	0	3,09	0	0,35544	0,362	-0,00656
2	350	0	3,09	0	0,64688	0,623	0,02388
2	250	0,72	0	0	0,61091	0,634	-0,02309
0,5	450	0,72	0	0	0,63504	0,625	0,01004
1	450	0,951	0	0	0,38	0,381	-0,00100
4	250	1,44	0	0	0,50394	0,514	-0,01006
0,5	250	0	0	0,388	0,71949	0,714	0,00549
0,5	450	0	0	0,388	0,53927	0,526	0,01327
1	250	0	0	0,671	0,54545	0,536	0,00945
3	450	0	0	0,671	0,36943	0,371	-0,00157
0,5	350	0	0	0,99	0,41286	0,448	-0,03514
3	450	0	0	0,99	0,346	0,351	-0,00500

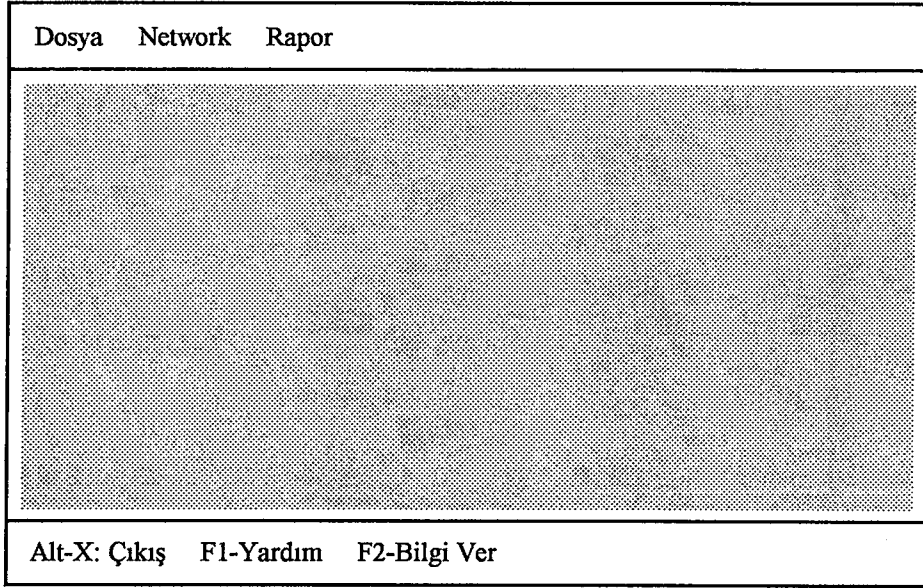
Tablo 6.10'da 950°C'de ostenitlenmiş ve alaşım elementlerinin teker teker buldukları durum için elde edilen sertlik değerleri, sinirsel ağın tahmin ettiği sertlik değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.10: 950°C'de ostenitlenmiş 2. grup numunelere ait deney ve sinirsel ağ sonuçları

% Cu	%Ni	%Mo	Ostemplleme Süresi Saat	Ostemplleme Sıcaklığı °C	Deney Sonucu Sertlik Değeri (x100) Rc	Tahmin Edilen Değer (x100) Rc	Hata (x100)
0	0	0	1	350	0,308	0,225	0,083
0	0,574	0	2	250	0,379	0,336	0,043
0	0,574	0	4	450	0,118	0,184	-0,066
0	1,64	0	1	350	0,22	0,259	-0,039
0	3,09	0	0,5	250	0,416	0,360	0,056
0	3,09	0	2	350	0,228	0,283	-0,055
0,72	0	0	2	250	0,186	0,228	-0,042
0,72	0	0	0,5	450	0,255	0,216	0,039
0,951	0	0	1	450	0,218	0,218	0,000
1,44	0	0	4	250	0,334	0,332	0,002
0	0	0,388	0,5	250	0,42	0,367	0,053
0	0	0,388	0,5	450	0,21	0,206	0,004
0	0	0,671	1	250	0,376	0,374	0,002
0	0	0,671	3	450	0,159	0,191	-0,032
0	0	0,99	0,5	350	0,291	0,280	0,011
0	0	0,99	3	450	0,182	0,199	-0,017

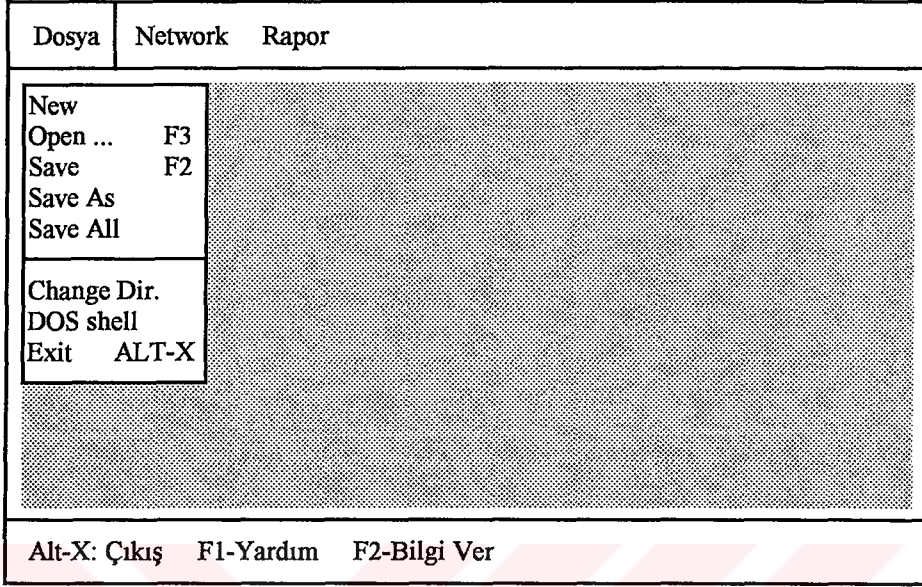
6.6. Sinirsel Ağ Programının Kullanımına Ait Bilgiler

Deneyler sonunda elde edilen veriler, bölüm 5'de verilen geriyayınım ilkeleri kullanılarak, Turbo Pascal V7.0 ile yazılan bir program yardımıyla sinirsel ağ sistemine öğretilmiş ve test verileri için tahmin değerleri elde edilmiştir. Program NETONC2.EXE dosyasının DOS ortamında çalıştırılmasıyla aktif hale geçer. Programın açılışında Şekil 6.64'de görülen ekran aktif hale gelir.

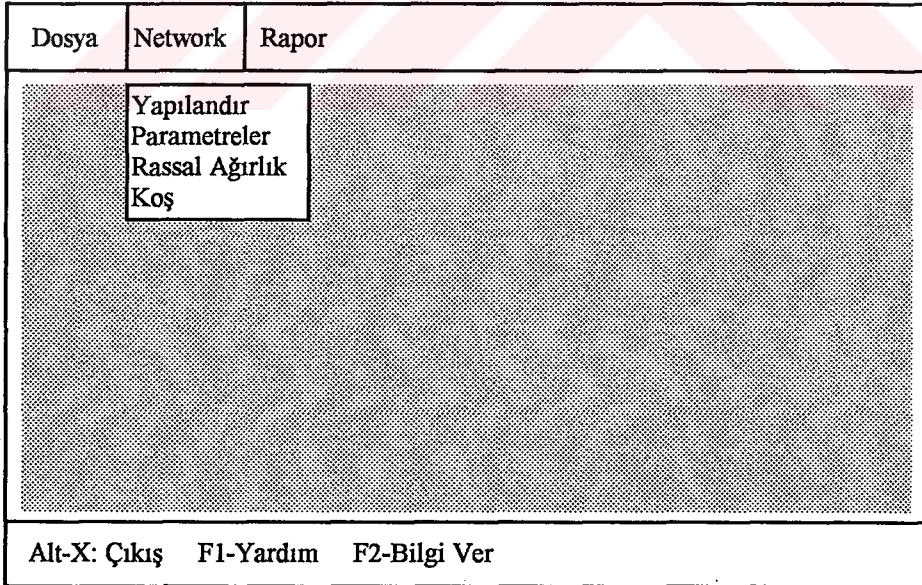


Şekil 6.64: Sinirsel ağ programı açılış ekranı.

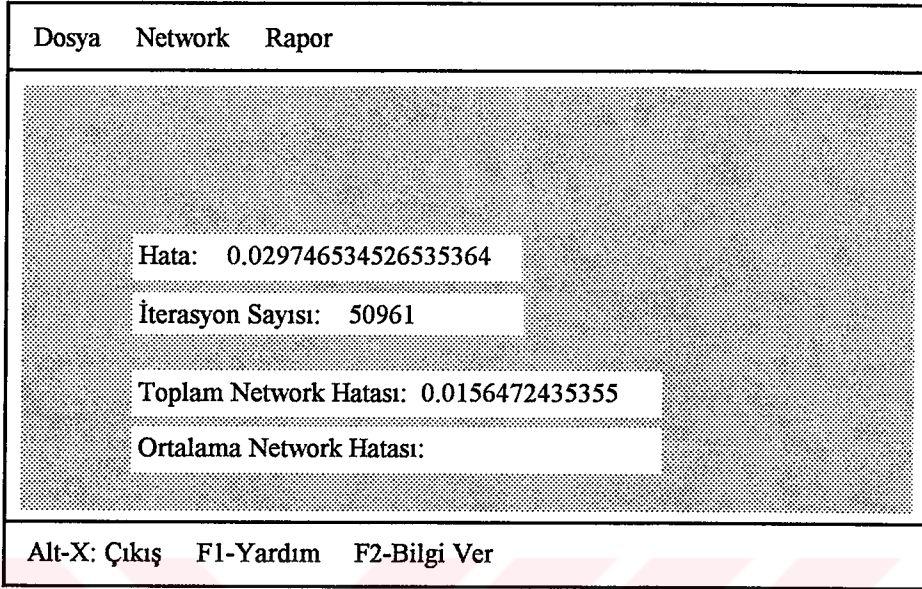
Eğer daha önceden tanımlanmış ve kaydedilmiş bir ağ varsa, DOSYA menüsünden OPEN ile açılarak aktif hale getirilebilir (Şekil 6.65). Yeni bir ağ tanıtılacaksa NETWORK menüsünden YAPILANDIR seçeneği seçilerek ağ bilgileri girilir (Şekil 6.66). Bu bilgiler, programın sorguladığı sıra ile verilmelidir. Program ilk olarak giriş nöron sayısını, ara kademe sayısını ve ara kademe nöron sayısını sorgular. Çıkış nöron sayısı da girildikten sonra öğrenme oranını belirlemenizi ister. Tüm bu bilgileri girdikten sonra öğrenmesini istediğiniz dosyanın adını sorgular. Bu dosya bölüm 6.5'de verilen formatta ASCII olarak ve .NNA uzantısıyla verilmelidir. Bilgi girişi tamamlandıktan sonra RASSAL AĞIRLIK seçeneğinden başlangıç ağırlık değerlerinin atanması sağlanır. Bu bilgi (+1) ile (-1) arasında rassal olarak belirlenir ve eğer istenirse programın ilerleyen kısımlarında tekrar atama yaptırılabilir. Ağırlık atanması yapıldıktan sonra program KOŞ komutu ile çalıştırılır. Program çalışmaya başladıktan sonra ekranda hata, iterasyon sayısı, toplam network hatası ve ortalama network hatası değerleri her iterasyonda güncellenerek yazılır (Şekil 6.67).



Şekil 6.65: Sinirsel ağ programı DOSYA menüsü.

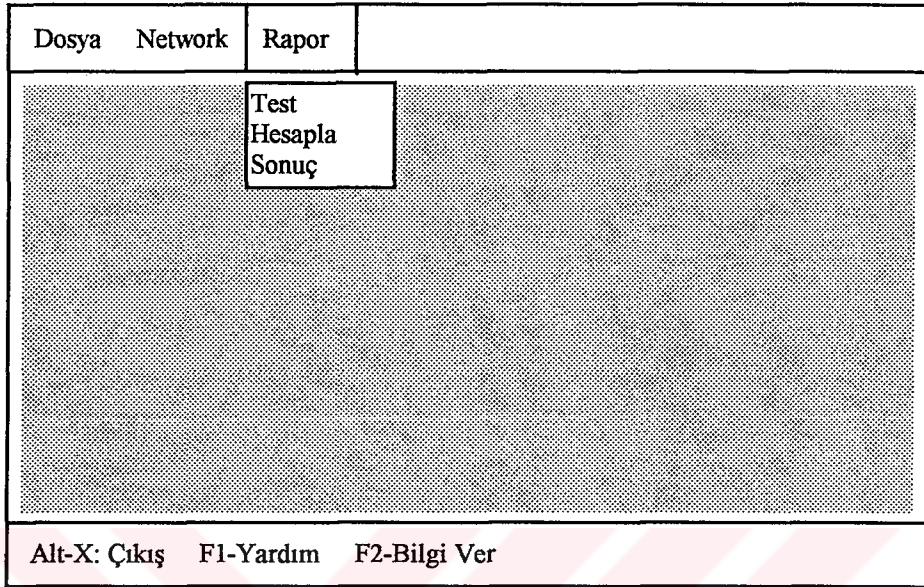


Şekil 6.66: Sinirsel ağ programı NETWORK menüsü.



Şekil 6.67: Sinirsel ağ programı çalışma ekranı.

Ağ sisteminin toplam network hata değeri istenen sınırlara indirildiği zaman ESC tuşu ile program durdurulur ve RAPOR menüsünden TEST seçeneğiyle öğretilen bilgiler doğrultusunda, test verileri kontrol ettirilir (Şekil 6.67). TEST seçeneği çalıştırıldığı zaman program test edilecek dosya adını sorgular. Test dosyası, öğrenilen dosya ile aynı formatta olmalıdır. Program ikinci olarak sonuç dosyasının adının ne olacağını sorgular ve test verilerini okuyarak tahmini değerleri atar. Program tarafından tahmin edilen değerler, RAPOR menüsünde SONUÇ seçeneğine girilerek görülebilir. Sonuç seçeneğinde program tolerans değerini sorgular ve bu değere göre test verileri için yaptığı tahminin kaç veri için doğru olduğunu belirtir. Bu kısımda, test edilen verilerin tümü için verilen tolerans aralığında doğru tahmin yapılması esastır. Bu nedenle, eğer test verilerinin tamamı doğru tahmin edilememişse, NETWORK menüsüne dönülerek program hata değeri azalıncaya kadar tekrar çalıştırılmalıdır.



Şekil 6.67: Sinirsel ağ programı rapor ekranı.

Sinirsel ağ modeli için yazılıp kullanılmış olan program, EK-1'de .EXE dosya olarak verilmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında öğretilen ve test edilen tüm verilere ait ASCII dosyalarda bu ek içinde yer almaktadır.

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

OKGDD malzemeler sürekli artan uygulama örnekleriyle dikkat çekmektedir. OKGDD malzemelerde, mekanik özellikler mikroyapıyla doğrudan ilgilidir. Bu nedenle mikroyapısal değişimleri incelemek büyük önem taşır. Yapılan çalışmalarda, Cu, Ni ve Mo alaşım elementlerinin beynit oluşumuna etkileri metalografik olarak tesbit edilmiştir. Deneysel çalışmalar 6. bölümde belirtildiği gibi 22 farklı bileşim için çeşitli ostemperleme şartlarında yapılmış ve sonuçta Cu, Ni ve Mo alaşım elementlerinin beynit oluşumuna etkileri tesbit edilmiştir.

Deney sonuçları iki grup altında ele alınmıştır. Birinci grup, alaşım elementlerinin çeşitli ostemperleme şartlarında beynit oluşumuna etkisini, ikinci grup ise sinirsel ağ modeli ile tahminleme sonucu elde edilen sonuçları içermektedir.

Ostemperleme deneyleri, iki ayrı ostenitleme sıcaklığı için yapılmıştır. 850°C'de tüm bileşimler 1 saat ostenitlenmiş, ardından 250°C, 350°C ve 450°C sıcaklıklarda ayrı ayrı 0.5, 1, 2, 3 ve 4 saat süreyle ostemperlenmiştir. 950°C sıcaklıkta ilk on bileşim 1 saat ostenitlenmiş ardından 250°C, 350°C ve 450°C sıcaklıklarda ayrı ayrı 0.5, 1, 2, 3 ve 4 saat süreyle ostemperlenmiştir. 850°C'de ostenitlenen numunelerin beynit miktarları, 950°C'de ostenitlenen numunelerin beynit miktarları ve sertlikleri tesbit edilmiştir.

Elde edilen deney sonuçlarına göre 850°C'de ostenitlenen numunelerde elde edilen beynit miktarları, 950°C'de elde edilen beynit miktarlarından genel olarak daha azdır.

850°C'de ostenitlenen, alaşımsız numunelerin ostemperleme sonucu elde edilen beynit miktarları, ostemperleme sıcaklığına bağlı olarak %20-%35 arasında değişmektedir. 950°C'de ostenitlenen, alaşımsız numunelerde ise ostemperleme sonucu %40-%80 arasında beynit elde edilmiştir. Bu durum 850°C'de 1 saat ostenitlemenin yeterli olmadığını göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, yapılan diğer çalışmalarla da

paralellik göstermektedir. Dorazil, 1991, tarafından alaşimsız numuneler üzerinde yapılan deneylerde de düşük ostenitleme sıcaklıklarında daha az beynit oluşumu gözlemlendiği belirtilmiştir. Dorazil bu durumun özellikle ostenitik matrisin kimyasal mikro homojensizliğinden kaynaklandığını ve düşük ostenitleme sıcaklıklarında yeterince beklenmediği takdirde ötektik tane merkezlerinde ve grafit etrafında sınırlı bölgelerde beynitik yapının elde edilebileceğini belirtmiştir. Ostenitleme sıcaklığının artmasıyla bu bölgelerde, beynitik ferrit çekirdeklenmeleri artmaktadır. Yüksek ostenitleme sıcaklıklarında uzun süre bekleme sonucunda ise ostenitin karbon oranı artmakta ve beynitik ferritin oluşumu için daha uzun ostemperleme sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yapılan çalışmalarda 850°C ostenitleme sıcaklığında 1 saat beklemek matris yapıdaki mikro homojensizlikleri gidermeye yeterli olmadığı için elde edilen beynit miktarları daha az olmuştur. 950°C ostenitleme sıcaklığında ise ostenitin karbon oranı bir miktar artmış, fakat bekleme süresi 1 saat tutulduğu için beynit oluşumuna 0.5-4 saatlik ostemperleme süreleri yeterli olmuştur.

850°C'de ostenitlenen numunelerde Ni miktarı arttıkça elde edilen beynit miktarıda, alaşimsız KGDD'e göre, artmaktadır. Cu alaşım elementinin %0.95'e kadar olan miktarlarında böyle bir etki görülmezken, %1.44 Cu içeren bileşimde elde edilen beynit miktarının arttığı gözlenmiştir. Mo alaşım elementi arttıkça beynit miktarıda artmıştır. Mo, hem Ni hem de Cu'ya göre, beynit miktarı üzerine daha fazla etki etmektedir.

950°C'de ostenitlenen numunelerde ise alaşimsız ve alaşımlı numuneler arasında oluşan beynit miktarı açısından çok büyük bir değişim olmamıştır. Ni ve Cu alaşım elementi içeren numunelerde tüm ostemperleme sıcaklıklarında beynit miktarı büyük değişim göstermemiştir. Mo alaşım elementinin %0.99 olması durumunda ise oluşan beynit miktarının arttığı gözlenmiştir.

Yüksek ostenitleme sıcaklıklarında Cu ve Ni alaşım elementleri beynit oluşumuna, ostemperleme şartlarına bağlı olarak değişen etkiler göstermektedir. 0.5-4 saat arasında ostemperleme süresi arttıkça, yüksek Ni içeren numunelerde kalıntı ostenit

miktarıda artmaktadır. Bunun nedeni Ni alaşım elementinin ostenitleme sırasında ostenitin kararlı hale gelmesine yardımcı olmasıdır. Yüksek ostenitleme sıcaklıklarında Cu alaşım elementi içeren numunelerde de durum aynıdır.

Alaşım elementlerinin ikili veya üçlü, birarada bulunması durumlarında ise özellikle Ni ve Mo'in birarada ve yüksek değerlerde bulunması durumunda ve Ni, Cu ve Mo'in birarada yüksek değerde bulunması durumunda beynit oluşumu artmaktadır.

Genel olarak alaşım elementlerinin yapıda bulunması, alaşımsız yapıya göre, özellikle, düşük ostenitleme sıcaklıklarında, beynit oluşumunu teşvik etmektedir. Fakat aynı durumu yüksek ostenitleme sıcaklıklarında, düşük ostenitleme sıcaklıklarında olduğu gibi belirgin olmamaktadır.

Yapılan tüm deneylerde genel olarak, düşük ostemperleme sıcaklıklarında elde edilen beynit miktarları, yüksek ostemperleme sıcaklıklarında elde edilen beynit miktarlarından daha fazladır. Bu durum yüksek ostenitleme sıcaklığında deneye tabi tutulan numunelerde daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni yüksek ostenitleme sıcaklıklarında ostenitin daha kararlı olması ve yüksek ostemperleme sıcaklıklarında dönüşüme uğramadan kalıntı ostenit olarak kalmasıdır.

Sertlik değişimleri, yalnızca 950°C'de deneye tabi tutulmuş numuneler üzerinde incelenmiştir. Genel olarak sertliğin tüm alaşımlar için ostemperleme süresine bağlı olarak düştüğü görülmüştür. Ayrıca, alaşım elementlerinin sertlik üzerine etkilerinin olduğu saptanmıştır. Alaşımsız numunelere göre Ni alaşımlı numunelerde elde edilen sertlik değerleri, yapıdaki Ni miktarı arttıkça artış göstermektedir. Cu alaşımlı numunelerde ise %1'in altındaki Cu bileşimi değerlerinde, sertlikte belirgin bir fark olmadığı, fakat %1.44 Cu içeren numunede elde edilen sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Mo alaşım elementi ise sertlik üzerine hem Ni hem de Cu'dan çok daha etkin bir şekilde değişime neden olmuştur. Mo alaşım elementindeki artışla sertlik değeride yükselmiştir.

Sertliğin ostemperleme sıcaklığına bağlı olmaksızın, ostemperleme süresi boyunca düşmesi, literatürde verilen deney sonuçlarıyla da paralellik göstermektedir. Dorazil, sertlikteki değişimin, ostemperleme süresi arttıkça azalma şeklinde olduğunu yaptığı deneyler sonunda göstermiştir.

Yapılan deney sonuçları incelendiğinde, 0.5-1 saat arasındaki ostemperleme sıcaklıklarında beynit miktarının düştüğü, 1. saatten sonra, ostemperleme süresi arttıkça beynit miktarında arttığı gözlenmektedir. Birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda ise beynit miktarının, ostemperleme sıcaklığıyla sürekli artan bir seyir göstermesi gerektiği belirtilmektedir. Dorazil, 1991, Faubert, 1990, Darwish, 1993, beynit miktarının, ostemperleme sıcaklığıyla sürekli artması gerektiğini ileri sürmektedirler. Oysa yapılan çalışmalarda özellikle 0.5-1 saat arasında beynit miktarının önce düştüğü, ardından yükselmeye başladığı görülmektedir. Bu durum özellikle Mo alaşım elementi içeren numunelerde daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Bu oluşum Morgan, 1987 ve Viau, 1987, tarafından yapılan çalışmalarda izah edilmiştir. Kısa ostemperleme sürelerinde yapıda bir miktar martenzit oluşması mümkün olmaktadır ve metalografik çalışmalarda martenzit ve beynit hemen hemen aynı formda görülmektedir. Bu nedenle 0.5-1 saat arasındaki ostemperleme sürelerinde yapıda oluşan beynitin yanısıra bir miktar martenzitinde olduğu, bu nedenle beynit miktarının yüksek olduğu söylenebilir. 1. saatten sonra yapıda martenzit oluşması mümkün olmadığı için 0.5-1 saat arasında (martenzit miktarı giderek azaldığından) beynit miktarı azalmakta, ardından beynit miktarı, ostemperleme süresiyle artmaktadır.

Sinirsel ağ modeli için yapılan bilgisayar programında 850°C'de ostenitlenen numuneler iki ayrı grup içinde, 950°C'de ostenitlenen numuneler iki ayrı grup içinde incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, elde edilen deney sonuçlarından hareketle, yapılmamış deneyler için güvenilir tahminler yapılabileceği gösterilmiştir. Bu da hem zaman hem de maliyet açısından oldukça önemlidir.

Yapılmış deney sonuçlarını kullanarak, Cu, Ni ve Mo alaşım elementlerinin farklı miktarları ve değişik deney şartları için elde edilecek beynit miktarlarını ve sertlik

değerlerini önceden tahmin etmek, ostemperleme deney maliyetleri gözönüne alındığında oldukça büyük önem taşımaktadır. Küçük parçalarda ostemperleme deneyi zaman ve para açısından çok büyük maliyetler vermesede büyük parçalarda durum oldukça farklıdır. Bu nedenle önceden tahmin edilmiş deney sonuçlarından hareketle, döküm ve ısı işlem şartlarını belirlemek büyük önem taşımaktadır.

Sinirsel ağ modeli ile deney sonuçlarını değerlendirmek için hazırlanan bilgisayar programı yardımıyla, tüm deney sonuçları değerlendirilmiştir. Değerlendirmede öğrenme oranının 0.2-0.8 arasında 0.2 birim aralıklarla tüm değerleri ayrı ayrı kullanılmış ve bu problem için 0.2 ve 0.4 gibi küçük öğrenme oranlarının daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ayrıca tüm ağ motifleri için öğrenmenin 2-4 milyon iterasyondan sonra gerçekleştiği görülmüştür. Öğrenme tamamlandıktan sonra, tahmin edilen değerlerle, deney sonuçları mukayese edilmiş ve öğrenmenin %94 güven seviyesinde gerçekleştiği görülmüştür. Stephen'e göre bu güven seviyesi, sinirsel ağ modeli ile değerlendirmede elde edilmesi beklenen seviyededir. Sinirsel ağ modelleri, özellikle endüstri ve elektronik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmakta olmasına rağmen, ülkemizde makina mühendisliğinde deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve tahminleme konusunda yaygın olarak kullanılmamaktadır. Yapılan bu çalışmayla, sinirsel ağ modeliyle, yapılmış deney sonuçlarını kullanarak, yapılacak deneylere ait sonuçları tahmin etmenin mümkün olacağı gösterilmiştir. Sinirsel ağ modeli için hazırlanmış olan programın, başka problemler için de kullanılması mümkün olmaktadır. Bunun için girdi ve çıktı bilgilerinin bu problemdeki formata uygun hazırlanması yeterlidir.

OKGDD malzemelerin ülkemizdeki kullanım alanları oldukça azdır. Bu malzemelerin özellikle demiryollarında vagon tekeri olarak başarıyla kullanılması mümkündür. Ayrıca otomotiv sanayiinde, yüksek sıcaklıklara maruz kalmayan kısımlarda kullanılan tüm dişli aksam bu malzemeden yapılabilir. Buzdolabı kompresörlerinin krank millerinde, otomobil krank ve kam millerinde OKGDD kullanılması mümkündür. Tarımın önemli olduğu ülkemizde OKGDD malzemelerin pulluk, kazıcı, tırmık gibi aşınma direnci gerektiren yerlerde başarıyla kullanılması mümkündür.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- AFS, 1986, Ductile Iron Molten Metal Process, American Foundryman's Society, 112p.
- Akbulut, H. ve Kısakürek, Ş.E., 1990, Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Darbe Enerjisi ve Sertlik İlişkisi, 6. Metalurji Kongresi, 2, 457-470.
- Caudill, M., 1988, Neural Networks Primer Part III, Artificial Intelligence Expert, 17-23.
- Çavuşoğlu, E.N., 1981, Döküm Teknolojisi I, İ.T.Ü Matbaası, İstanbul, 424s.
- Çelik, O.N., Komaç, O.Ş. ve Kınıkoğlu, N.G., 1991, Santrifüj Döküm Yöntemiyle Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir Kullanarak Vagon Tekeri Üretimi, 2. Raylı Taşıt Sempozyumu, 20-22 Kasım, Eskişehir, 160-168.
- Dağlı, C.H., 1994, Artificial Neural Networks for Intelligent Manufacturing, Transaction of Operational Research, 6, 1-25.
- Darwish, N. and Elliott, R., 1993, Austempering of Low Manganese Ductile Irons Part 1: Processing Window, Materials Science and Technology, 9, 572-585.
- Darwish, N. and Elliott, R., 1993, Austempering of Low Manganese Ductile Irons Part 2: Influence of Austenitising Temperature, Materials Science and Technology, 9, 586-601.
- Darwish, N. and Elliott, R., 1993, Austempering of Low Manganese Ductile Irons Part 3: Variation of Mechanical Properties with Heat Treatment Conditions, Materials Science and Technology, 9, 882-889.
- Dorazil, E., 1991, High Strength Austempered Ductile Cast Iron, Ellis Horwood Limited, England, 226p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Dorazil, E., Barta, B., Munsterova, E., Stransky, L. and Huvar, A., 1982, High Strength Bainitic Ductile Cast Iron, AFS, International Cast Metal Journal, 6, 52-62.
- Faubert, G.P., Moore, D.J. and Rundman, K.B., 1990, Heavy Section ADI: Tensile Properties in As-Cast and Austempered Specimens, American Foundryman's Society Transactions, 167, 831-843.
- Fuller, A.G., 1977, Effect of Graphite Form on Fatigue Properties of Pearlitic Ductile Iron, American Foundryman's Society Transactions, 85, 527-536.
- Gagne, M., 1985, The Influence of Manganese and Silicon on the Microstructure and Tensile Properties of Austempered Ductile Iron, American Foundryman's Society Transactions, 133, 801-812.
- Gagne, M., 1987, The Effect of Mn and Si on the Quality of Heavy Section ADI Castings, American Foundryman's Society Transactions, 70, 15-45.
- Hager, F.M., 1984, Austempered Gears Used for Engine Timing Gears: History, Development, Design Criteria, ASM 1st International Conference of Austempered Ductile Irons, 2-4 April, 253.
- Hamid Ali, A.S., Uzlov, K.I., Darwish, N. and Elliott, R.E., 1994, Austempering of Low Manganese Ductile Irons Part 4: Relationship Between Mechanical Properties and Microstructure, Materials Science and Technology, 10, 35-40.
- Harding, R.A. and Gilbert, G.N., 1986, Why the Properties of Austempered Ductile Iron Should Interest Engineers, The British Foundryman, F1553, 489-496.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Hayrynen, K.L., Moore, D.J. and Rundman, K.B., 1990, Tensile Properties and Microstructure of a Clean Austempered Ductile Iron, American Foundryman's Society Transactions, 127, 471-476.
- Hayrynen, K.L., Moore, D.J. and Rundman, K.B., 1992, Tensile and Fatigue Properties of Relatively Pure ADI, American Foundryman's Society Transactions, 98, 93-104.
- Hertz, J., Krogh, A. and Palmer, R.G., 1993, Introduction to the Theory of Neural Computation, Addison-Wesley Publishing Company, 327p.
- Hitchcox, A.L., 1986, ADI Has What It Takes for High Performance Gearing, Metal Progress, 8, 49-54.
- Janovak, J.F. and Gundlach, R.B., 1983, Development of a Ductile Iron for Commercial Austempering, American Foundryman's Society Transactions, 54, 377-388.
- Janowak, J.F. and Morton, P.A., 1984, A Guide to Mechanical Properties Possible by Austempering %1.5 Ni %0.3 Mo Ductile Iron, American Foundryman's Society Transactions, 120, 489-498.
- Janowak, J.F., Alagarsamy, A. and Venugopalan, D., 1990, Fatigue Strength of Commercial Ductile Irons, American Foundryman's Society Transactions, 123, 511-518.
- Juneja, R.H., Chakrabarti, A.K. and Basak, A., 1989, Austempering Ductile Iron Alloyed With Copper and Manganese, Foundry Management and Technology, 117-2, 64-67.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Kovacs, B.V., 1990, Austempered Ductile Iron: Fact and Fiction, *Modern Casting*, 3, 38-41.
- Krishnaraj, D., Narasimhan, H.N.L. and Seshan, S., 1992, Structure and Properties of ADI as Affected by Low Alloy Additions, *American Foundryman's Society Transactions*, 100, 105-112.
- Leco 2001, 1992, Image Analysis System Operator's Manual, Leco Company, U.S.A, 314p.
- Leco 2001, 1993, Image Analysis Repot, Leco Company, U.S.A, #122, 14p.
- Leco 2001, 1993, Image Analysis Repot, Leco Company, U.S.A, #133, 43p.
- Leco 2001, 1993, Image Analysis Repot, Leco Company, U.S.A, #242, 10p.
- Lee, Y.H. and Voigt, R.C., 1989, The Hardenability of Ductile Irons, *American Foundryman's Society Transactions*, 173, 915-938.
- Metals Handbook Ninth Edition, 1985, Heat Treatment, 4, 104-116, 545-551, 525-528, 647-669.
- Moore, D.J., Rouns, T.N. and Rundman, K.B., 1985, Structure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron, *American Foundryman's Society Transactions*, 103, 705-718.
- Moore, D.J., Rouns, T.N. and Rundman, K.B., 1986, Effect of Manganese on Structure and Properties of Austempered Ductile Iron: A Processing Window Concept, *American Foundryman's Society Transactions*, 48, 255-264.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Morgan, H.L., 1987, Introduction to Foundry Production and Control of Austempered Ductile Irons, The British Foundryman, 80-2, 98-108.
- Özel, A. ve Kısakürek, Ş.E., 1990, Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Ostemperleme Isıl İşleminin Darbe Direnci ve Sertlik Üzerine Olan Etkisinin İncelenmesi, 6. Metalurji Kongresi, 2, 428-442.
- Özel, A., 1991, Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özellikleri ve Önemi, 4. Denizli Malzeme Sempozyumu, 24-26 Nisan, 307-316.
- Palmer, K.B., 1982, Effect of Cast Section Size on Fatigue Properties and Prevention of Corrosion Fatigue of Nodular Irons, The British Foundryman, 75, 201-212.
- Park, Y.J., Gundlach, R.B. and Janowak, J.F., 1987, Monitoring the Bainite Reaction During Austempering of Ductile Iron and High Silicon Cast Steel by Resistivity Measurement, American Foundryman's Society Transactions, 97, 411-416.
- Rouns, T.N., Rundman, K.B. and Moore, D.M., 1984, On the Structure and Properties of Austempered Ductile Cast Iron, American Foundryman's Society Transactions, 121, 815-840.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. and Williams, R.J., 1986, Parallel Distributed Processing, Vol.1, 362p.
- Schissler, J.M. and Saverna, J., 1985, The Effect of Segregation on the Formation of Austempered Ductile Iron, American Society of Metals, Journal of Heat Treating, 4-2, 167-176.
- Segem, 1978, Genel Döküm Teknolojisi, Seminer notları, 360s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Shea, M.M. and Ryntz, E.F., 1986, Austempered Nodular Iron for Optimum Toughness, American Foundryman's Society Transactions, 125, 683-688.
- Sofue, M., Okada, S. and Sasaki, T., 1978, High Quality Ductile Cast Iron With Improved Fatigue Strength, American Foundryman's Society Transactions, 86, 173-182.
- Spengler, A.F. and Brigs, H.K., 1972, The Ductile Iron Process, Millerand Company Service Handbook, 400p.
- Stephen, I.G., 1994, Neural Networks Learning and Expert Systems, Massachusetts Institute of Technology Press, 365p.
- Türk, A. ve Kısakürek, Ş.E., 1990, Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Darbe Enerjisi-Yapı İlişkisi, 6. Metalurji Kongresi, 2, 443-456.
- Viau, R., Gagne, M. and Thibau, R., 1987, CuNi Alloyed Austempered Ductile Irons, American Foundryman's Society Transactions, 77, 171-178.
- Yu, S.K., Loper, C.R. and Cornell, H.H. Jr., 1986, The effects of Mo, Cu and Ni on the Microstructure, Hardness and Hardenability of Ductile Cast Irons, American Foundryman's Society Transactions, 97, 557-576.

ÖZGEÇMİŞ

1966 yılında Ankara'da doğan Osman Nuri ÇELİK, ilk ve orta tahsilini Ankara'da, lise tahsilini İzmit'te tamamlamıştır. 1983 yılında Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümüne girmiş ve 1987 yılında bu bölümden Makina Mühendisi olarak mezun olmuştur. 1987 yılında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 1988 yılında aynı üniversitenin Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. 1989 yılında Makina Yüksek Mühendisi ünvanını almış ve 1990 yılında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında Doktora çalışmalarına başlamıştır. Halen Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Öğretim Elemanı olarak çalışmaktadır.