

136660

**17-4 PH ÇÖKELME SERTLEŞTİRMELİ PASLANMAZ
ÇELİK KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜ YAY ELEMANLARININ
İÇ YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN PERFORMANS
ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**


Bülent AYDEMİR

Doktora Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

2003

**EC. YÖNETİM VE KONTROL
SİSTEMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**AN INVESTIGATION ON THE EFFECT TO THE PERFORMANCE OF
THE MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF 17-4 PH
PRECIPITATION-HARDENED STAINLESS STEEL FORCE
TRANSDUCER**

Bülent AYDEMİR

Ph. D. Thesis

Mechanical Engineering Department

2003

**17-4 PH ÇÖKELME SERTLEŞTİRMELİ PASLANMAZ ÇELİK KUVVET
DÖNÜŞTÜRÜCÜ YAY ELEMANLARININ İÇ YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN
PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Bülent AYDEMİR

Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

İmalat - Konstrüksiyon Bilim Dalında

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Erdiç KALUÇ

136660

Eylül-2003

Bülent AYDEMİR 'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "17-4 PH Çökelme Sertleştirmeli Paslanmaz Çelik Kuvvet Dönüştürücü Yay Elemanlarının İç Yapısal Özelliklerinin Performans Üzerine Etkilerinin Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

10.12.2003

Danışman: Prof. Dr. Erdiñ KALUÇ

Üye: Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU

Üye: Prof. Dr. Nermin KURŞUNGÖZ

Üye: Y. Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Üye: Y. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Fen Bilimleri Enstitüsünün Yönetim Kurulu'nun.....22.12.2003.....

gün ve ..2003-18.12..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. M. Selami KILIÇKAYA

Enstitü Müdürü

ÖZET

Direnç uzama ölçerli kuvvet dönüştürücüler, kuvvet altında elastik olarak deformasyona uğrayarak, gösterge cihazında elektriksel olarak doğrusal bir değişim gösteren ölçüm cihazlarıdır. Genel olarak yapıları; yay malzemesi, dirençli uzama ölçer ve gösterge ünitesinden oluşur. Yay malzemesi ve iç yapısal özellikleri, kuvvet dönüştürücü performans özellikleri olarak nitelendirilen tekrarlanabilirlik, doğrusallık, histerisiz ve sürünme hataları üzerinde en etkili elemandır. Bu amaçla, yay malzemesi olarak 17-4PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik seçilmiş ve uygulanan ısıl işlemlerle iç yapısı değiştirilerek, kuvvet dönüştürücü performansına olan etkisi araştırılmıştır.

Kuvvet dönüştürücüler, 100 kN kapasiteli, çekme yönünde ölçüm yapacak ve kolon türü olarak tasarlanmıştır. Yay malzemesi 17-4PH paslanmaz çeliğin iç yapısal özelliklerini değiştirmek için literatürde yer alan H900, H925, H1025, H1150 ısıl işlemleri ve özel olarak belirlenen H450, G450, Y450, S450 ısıl işlemleri numunelere uygulanmıştır. Elde edilen iç yapılar farklı yöntemlerle (optik mikroskop, SEM, TEM, X-ışını taraması) gözlenmiş ve numunelerin performans özelliklerinde görülen farklılıklar belirlenmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda, öncelikle tekrarlanabilirlik ve doğrusallık hataları üzerinde ısıl işlemin etkin bir parametre olmadığı, bunun dışında diğer etkenler diyebileceğimiz (yapıştırma, yükleme koşulları vb.) nedenlere bağlı oldukları belirlenmiştir. Ek olarak, farklı ısıl işlemlerle numunelerde histerisiz ve sürünme hatasının genel olarak, sertlik değerinin artması ile giderek azaldığı tespit edilmiştir. En düşük histerisiz hatası S450 ve en düşük sürünme hatası değeri de Y450 ısıl işlemlerle numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca, yay malzemesi yapısındaki dislokasyon yoğunluğunun histerisiz hatası üzerinde; atomsal yayınmanın da sürünme hatası üzerinde etkin olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 17-4 PH, Çökelme Sertleştirmeli Paslanmaz Çelik, Kuvvet Dönüştürücü, Histerisiz Hatası, Sürünme Hatası

ABSTRACT

Force transducers with strain gage are measurement devices indicated electrical linear variation of which are deformed elastically under the influence of force. Usually, they consist of spring material, strain gage and indicator. The microstructural properties of spring material on the performance characteristics of force transducers, such as repeatability, linearity, hysteresis, and creep errors are effective. 17-4PH precipitation hardened stainless steel was selected as a test material and heat treatments were applied in order to produce microstructural changes and effects of microstructural properties on the performance of force transducer were investigated.

Force transducers were designed for the capacity of 100kN, in tension mode only and the column type. For change of microstructural properties of 17-4PH stainless steel spring material, heat treatment definitions are given as H900, H925, H1025, H1150 in literature and the special H450, G450, Y450, S450 heat treatments were applied to the specimens. The results of microstructural were taken by different methods such as optical microscopy, SEM, TEM, X-ray. The differences on performance properties of specimens were determined.

As a result of this study, repeatability and linearity are not influenced from the microstructural properties of spring material. In addition, hysteresis and creep errors decrease with increasing hardness. Minimum hysteresis error was obtained in S450 specimen and minimum creep error was obtained in Y450 specimen. Any treatment causing an increase in dislocation density results decrease in hysteresis error. Atomic and vacancy diffusion is the most important mechanism in the formation of creep error.

Keywords: 17-4 PH, Precipitation Hardened Stainless Steel, Force Transducer, Hysteresis Error, Creep Error

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın konusunu veren ve gerçekleştirilmesinde önerilerini aldığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Erdiñ KALUÇ'a, çalışma konusunun belirlenmesinden en son noktasına kadar katkısını esirgemeyen ve her konuda yardımcı ve yol gösterici olan Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarı Sorumlusu Dr. Sinan FANK'a, bana bu konuda çalışma olanağı veren ve her türlü desteğı sağlayan TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Müdürü Doç. Dr. Hüseyin UĞUR'a, bana karşı gösterdikleri sabırdan dolayı Laboratuvar arkadaşlarıma, özellikle malzeme teminindeki katkılardan dolayı Ferhat TİGREL'e, dirençli uzama ölçer temini ve uygulanmasındaki katkılardan dolayı Süha ÖZBAY ve Kenan Bey'e, deney numunelerinin üretimindeki katkılardan dolayı Mekanik Atölye çalışanlarına, ısı işlemlerdeki yardımlarından dolayı Yılmaz Bey'e, Ali ERDOĞDU'ya, optik mikroskop incelemelerinde yardımlarından dolayı Dr. Havva Zeytin KAZDAL'a, SEM ve TEM incelemelerinde ve yorumlanmasında katkılarında dolayı Doç. Dr. Ali Aslan KAYA'a, yaptığı çalışmalardan dolayı Thomas ALLGEIER'e, Kütle Laboratuvarındaki arkadaşlarıma özellikle Sevda KAÇMAZ'a, Kocaeli Üniveritesi Makina Mühendisliği Bölümünden Araş. Gör. Emel TABAN'a, saymadığım tüm dostlarıma ve bana gösterdikleri sabır ve katkıdan dolayı aileme, eşime ve kızıma teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Eylül, 2003

Bülent AYDEMİR

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVIII
1. GİRİŞ.....	1
2. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	6
2.1. Genel Kuvvet Metrolojisi.....	6
2.1.1. Kuvvet ölçüm birimleri.....	6
2.1.2. Kuvvet biriminin oluşturulması.....	8
2.2. Kuvvetin Elektriksel Sinyale Dönüşümü.....	13
2.2.1. Dirençli uzama ölçerler hakkında genel bilgi.....	13
2.2.2. Direnç değişimi ile birim şekil değişimi arasındaki ilişki.....	14
2.2.3. Wheatstone köprüsünün temel prensibi ve kuvvetin okunması	16
2.3. Kuvvet Dönüştürücü Yay Elemanı Tasarım Kriterleri.....	21
2.3.1. Yay elemanı tasarımında temel kriterler.....	22
2.3.1.1. <u>Doğal frekans</u>	22
2.3.1.2. <u>Tam yük uygulandığında, ölçme bölgesinde dirençli uzama ölçer için uygun performansı veren birim şekil değişiminin sağlanması ve en uygun noktanın belirlenmesi</u>	23
2.3.1.3. <u>Ölçme bölgesinde homojen birim şekil değişimi dağılımının sağlanması</u>	24
2.3.1.4. <u>Dirençli uzama ölçerin yapıştırıldığı alan dışında kalan kısımlarında düşük birim şekil değişiminin elde edilmesi</u>	24
2.3.1.5. <u>Tek parçalı konstrüksiyon</u>	24
2.3.1.6. <u>Ölçüm eksenini dışındaki yüklere karşı düşük duyarlılık göstermesi</u>	25
2.3.1.7. <u>Aşırı yük uygulanmasına karşı koruma</u>	25
2.3.1.8. <u>Yay elemanı üzerinde dirençli uzama ölçerlerin rahat yapıştırılabilecek şekilde ve gövdenin kolay imal edilebilecek şekilde tasarlanması</u>	25
2.3.1.9. <u>Sıcaklığın etkisi</u>	26
2.3.2. Kolon türü tek eksenli yüklemeye zorlanan yay elemanları.....	26
2.3.3. Yay elemanından istenen malzeme özellikleri.....	28

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

2.3.3.1. <u>Mekanik özellikler</u>	29
2.3.3.2. <u>Isıl özellikler</u>	31
2.3.3.3. <u>Üretim özellikleri</u>	33
2.3.4. Yay malzemesi seçimi.....	34
2.4. Kuvvet Dönüştürücü Kalibrasyonu ve Verilerin Değerlendirilmesi..	37
2.4.1. Kalibrasyon yöntemi	37
2.4.2. Kuvvet ölçme cihazlarının performansının değerlendirilmesi..	39
2.4.2.1. <u>Bağıl tekrarlanabilirlik hatası (relative repeatability error), b</u>	39
2.4.2.2. <u>Bağıl doğrusallık hatası (relative interpolation error), f_c</u>	40
2.4.2.3. <u>Bağıl histerisiz hatası (relative hysteresis error), u</u>	41
2.4.2.4. <u>Bağıl sürünme hatası (relative creep response), s</u>	42
3. PASLANMAZ ÇELİKLER VE KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜ YAY ELEMANI OLARAK KULLANILAN ÇÖKELME SERTLEŞTİRMELİ PASLANMAZ ÇELİKLER	43
3.1. Paslanmaz Çelikler Hakkında Bilgi.....	43
3.1.1. Ferritik kromlu paslanmaz çelikler.....	51
3.1.2. Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler.....	52
3.1.3. Ostenitik krom nikelli paslanmaz çelikler.....	53
3.1.4. Duplex (çift fazlı) paslanmaz çelikler.....	54
3.2. Çökeltme Sertleştirmeli Paslanmaz Çelikler.....	55
3.2.1. Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik türleri.....	58
3.2.2. Yarı ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler.....	59
3.2.3. Ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler.....	61
3.2.4. Martenzitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler.....	61
3.2.5. 17 – 4 PH çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik.....	62
3.2.5.1. <u>Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliğin ısıl işlemi ve metalurjik özellikleri</u>	70
4. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜLER VE PERFORMANSLARI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARIN ARAŞTIRILMASI	74
5. ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLANMASI.....	81
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	83
6.1. Deneysel Kuvvet Dönüştürücü Numunelerinin Hazırlanması.....	83
6.1.1. Kuvvet dönüştürücü tasarımı.....	83
6.1.1.1. <u>Kapasite ve boyutlandırma</u>	83
6.1.1.2. <u>Yükleme şekli</u>	85
6.1.1.3. <u>Yay elemanı türü</u>	85
6.1.1.4. <u>Çalışma sıcaklığı</u>	86
6.1.1.5. <u>Yay elemanın talaş imalatı</u>	86

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

6.1.1.6. <u>Kullanılan dirençli uzama ölçerler</u>	86
6.1.1.7. <u>Dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılma ortamı</u>	89
6.1.1.8. <u>Dirençli uzama ölçer yapıştırma işlem kademeleri</u>	90
6.1.2. Yay malzemesi ve uygulanan işlemler.....	94
6.1.2.1. <u>Numunelerin üretimi</u>	96
6.1.3. Deney numunesi performanslarının ölçülmesi.....	96
6.2. Deneysel Kuvvet Dönüştürücülere Uygulanan Isıl İşlemler ve İç Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi.....	97
6.2.1. Deney numunelerine uygulanan ısıl işlemler.....	97
6.2.1.1. <u>Uygulanan ısıl işlemler</u>	99
6.2.2. Deney numunelerinin sertliklerinin belirlenmesi.....	102
6.2.3. Optik mikroskop incelemesi.....	103
6.2.4. Tarama elektron mikroskobu (SEM - scanning elektron microscope) incelemesi	103
6.2.5. X ışını difraksiyonu incelemesi.....	103
6.2.6. Geçirimli (transmission) elektron mikroskobu (TEM) incelemesi.....	104
6.2.6.1. <u>TEM numunelerinin hazırlanması</u>	104
6.2.6.2. <u>TEM fotoğraflarının çekimi</u>	105
7. DENEY SONUÇLARI.....	106
7.1. Deney Numunelerinin Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	106
7.2. Optik Mikroskop İncelemesi Sonuçları.....	106
7.3. Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemesi Sonuçları.....	109
7.4. X Işını Difraksiyon İncelemesi Sonuçları.....	114
7.5. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) İncelemesi Sonuçları.....	115
7.6. Kuvvet Dönüştürücülerin Performans Sonuçları.....	125
7.6.1. Bağlı tekrarlanabilirlik hatası.....	126
7.6.2. Bağlı doğrusallık hatası.....	132
7.6.3. Bağlı histerisiz hatası.....	137
7.6.4. Bağlı sürünme hatası.....	142
8. DENEY SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....	149
8.1. Tekrarlanabilirlik Hatası.....	153
8.2. Doğrusallık Hatası.....	156
8.3. Histerisiz Hatası.....	158
8.3.1. Sertliğin histerisiz hatası üzerindeki etkisi.....	165
8.3.2. Aynı sertlikteki farklı iç yapıların histerisiz hatası üzerindeki etkisi.....	168
8.4. Sürünme Hatası.....	169
8.4.1. Malzeme sertliğinin sürünme hatası üzerindeki etkisi	172
8.4.2. Aynı sertlikteki farklı iç yapıların sürünme hatası üzerindeki etkisi.....	174

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

9. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	176
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	179
ÖZGEÇMİŞ.....	187



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
2.1.	Ulusal kuvvet skalası izlenebilirlik zinciri	10
2.2.	110 kN/1.1 MN kapasiteli ölü ağırlıklı manivela büyütme kuvvet standardı makinasının resmi.....	11
2.3.	110 kN / 1.1 MN kapasiteli manivelalı tür ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinası montaj şeması.....	12
2.4.	Bir dirençli uzama (gerinim) ölçer elemanının yapısı.....	14
2.5.	Çekme çubuğu üzerine yapıştırılmış dirençli uzama ölçerlerden oluşmuş Wheatstone köprü devresi.....	18
2.6.	Çekme çubuğu şeklindeki numune üzerinde dirençli uzama ölçer devresi ve gösterge ünitesi.....	21
2.7.	Dört adet kolon türü yay elemanı olan dönüştürücü.....	28
2.8.	Kuvvet dönüştürücülerde kuvvet karşılık çıkış voltajından elde edilen histerisiz ve sürünme eğrileri.....	42
3.1.	Çeliğin atmosferik korozyonu üzerine kromun etkisi.....	44
3.2.	Paslanmaz çeliklerin alaşım elementlerine göre gruplandırma şematik resmi.....	48
3.3.	Paslanmaz çelik gruplarının yapılarındaki Cr-Ni oranlarına göre gösterimi (şematik).....	49
3.4.	Çökelme sertleştirme sıcaklığı ve bekleme süresinin mukavemet, sertlik üzerindeki etkileri.....	56
3.5.	Yaşlandırma sıcaklığının sertlik üzerindeki etkileri.....	71
3.6.	Farklı sıcaklık ve zaman değerleri için malzemeden elde edilen sertlik değerleri.....	72
3.7.	Yaşlandırma sıcaklığının sertlik üzerindeki etkileri.....	72
3.8.	Yaşlandırma sıcaklığına ve süresine bağlı sertlik değişimi grafikleri	73
3.9.	Yaşlandırma sıcaklığı ve bekleme süresi ile sertlik değişimi ..	73
4.1.	Vinç sistemlerinde kullanılan kuvvet dönüştürücüler	74
4.2.	Kamyon kantarları ve ergitme ocaklarında kullanılan kuvvet dönüştürücüler.....	75
4.3.	Karışım veya hammadde silolarında kuvvet dönüştürücü kullanım yerleri.....	75
4.4.	Uçakların ağırlıklarının ölçümünde kullanılan kuvvet dönüştürücüler	76
4.5.	Büyük kapasiteli vinçlerde ağırlık ölçümünde kullanılan kuvvet dönüştürücüler.....	76
6.1.	Deneylerde kullanılan bir kuvvet dönüştürücünün fotoğrafı ...	84
6.2.	Deneylerde kullanılan kuvvet dönüştürücü yay elemanının boyutları.....	84
6.3.	Dirençli uzama ölçer boyut parametreleri.....	88
6.4.	Kuvvet dönüştürücülerde görülen sürünme çeşitleri.....	89
6.5.	Deney numunesi ve dirençli uzama ölçer yapıştırma malzemeleri	90

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

6.6.	Dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılmasında kullanılan yaylı sıkma düzeneği.....	93
6.7.	Dirençli uzama ölçerlerin numune üzerine yapıştırılması sırasında oluşan tabakalar ve işlemi gösteren şematik resim....	93
6.8.	Tüm işlemleri tamamlanmış ve ölçümlere hazır hale getirilmiş numuneler.....	94
6.9.	Çeşitli firmaların paslanmaz çelik malzeme kullanılarak üretilmiş farklı türlerdeki kuvvet dönüştürücülerinin resimleri	96
6.10.	Numunelerin kuvvet makinasına ve gösterge elemanına bağlantısı.....	97
7.1.	H900 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı.....	107
7.2.	H925 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı.....	107
7.3.	H1025 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı.....	107
7.4.	H1150 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı.....	108
7.5.	H450 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı.....	108
7.6.	Y450 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı.....	108
7.7.	G450 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı.....	109
7.8.	S450 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı.....	109
7.9.	H900 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapısının SEM fotoğrafı	110
7.10.	H925 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapısının SEM fotoğrafı.....	110
7.11.	H1025 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapısının SEM fotoğrafı.....	111
7.12.	H1150 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapısının SEM fotoğrafı.....	111
7.13.	H450 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapısının SEM fotoğrafı.....	112
7.14.	Y450 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapısının SEM fotoğrafı.....	112
7.15.	G450 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapısının SEM fotoğrafı.....	113
7.16.	S450 ısıtma işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapısının SEM fotoğrafı.....	113
7.17.	17-4PH malzemeden farklı ısıtma işlemli numunelerin X ışını difraktometre ölçüm sonuçları.....	114
7.18.	H900 ısıtma işlemi sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafı	115
7.19.	H900 ısıtma işlemi sonrası elde edilen difraksiyon patterni fotoğrafı (L=76cm).....	115
7.20.	H900 ısıtma işlemi sonrası elde edilen kalıntı ostenit yapısı TEM fotoğrafı.....	116
7.21.	H925 ısıtma işlemli numunedeki Cu çökeltilerinin TEM fotoğrafı.....	117

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

7.22.	H1025 ısıtıl işlemlili numunedeki Cu çökeltilerinin TEM fotoğrafi.....	117
7.23.	H1025 ısıtıl işlemlili numunedeki martenzit plakalarının ve Cu çökeltilerinin TEM fotoğrafi	117
7.24.	H1150 ısıtıl işlemlili numunedeki Cu çökeltilerinin TEM fotoğrafi.....	118
7.25.	H1150 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen difraksiyon patterni fotoğrafi (L=76cm).....	119
7.26.	H1150 ısıtıl işlemlili numunedeki Cu çökeltilerinin TEM fotoğrafi.....	119
7.27.	H1150 ısıtıl işlemlili numunedeki Cu çökeltilerinin TEM fotoğrafi.....	119
7.28.	H450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafi.....	120
7.29.	H450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafi.....	121
7.30.	H450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafi.....	121
7.31.	H450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen kalıntı ostenit karanlık alanda çekilmiş TEM fotoğrafi.....	121
7.32.	H450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen difraksiyon patterni fotoğrafi (L=76cm).....	122
7.33.	G450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafi.....	123
7.34.	G450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen difraksiyon patterni fotoğrafi (L=76cm).....	123
7.35.	Y450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafi.....	124
7.36.	Y450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen difraksiyon patterni fotoğrafi (L=76cm).....	124
7.37.	S450 ısıtıl işlemlili sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafi	125
7.38.	H 900 ısıtıl işlemlili numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası	127
7.39.	H 925 ısıtıl işlemlili numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası	127
7.40.	H 1025 ısıtıl işlemlili numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası	127
7.41.	H 1150 ısıtıl işlemlili numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası	128
7.42.	H 450 ısıtıl işlemlili numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası	128
7.43.	Y 450 ısıtıl işlemlili numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası	128
7.44.	G 450 ısıtıl işlemlili numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası	129
7.45.	S 450 ısıtıl işlemlili numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası	129
7.46.	Tüm ısıtıl işlemlili numunelerin ortalama bağıl tekrarlanabilirlik hataları.....	131

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

7.47.	Tüm numunelerin ortalama bağıl tekrarlanabilirlik hatalarının sütun grafiği	131
7.48.	H 900 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl doğrusallık hatası.....	133
7.49.	H 925 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl doğrusallık hatası.....	133
7.50.	H 1025 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl doğrusallık hatası.....	134
7.51.	H 1150 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl doğrusallık hatası.....	134
7.52.	H 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl doğrusallık hatası.....	134
7.53.	Y 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl doğrusallık hatası.....	135
7.54.	G 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl doğrusallık hatası.....	135
7.55.	S 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl doğrusallık hatası.....	135
7.56.	Tüm numunelerin bağıl doğrusallık hatası grafikleri.....	136
7.57.	Tüm numunelerin ortalama bağıl doğrusallık hatalarının sütun grafiği	136
7.58.	H 900 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği..	138
7.59.	H 925 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği..	138
7.60.	H 1025 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği	138
7.61.	H 1150 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği	139
7.62.	H 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği..	139
7.63.	Y 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği..	139
7.64.	G 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği..	140
7.65.	S 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği..	140
7.66.	Tüm ısıtıl işlemlen numunelerin bağıl histerisiz hatası grafiği.....	141
7.67.	H 900 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği...	143
7.68.	H 925 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği...	144
7.69.	H 1025 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği.	144
7.70.	H 1150 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği.	145
7.71.	H 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği...	145
7.72.	Y 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği...	146
7.73.	G 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği...	146
7.74.	S 450 ısıtıl işlemlen numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği...	147
7.75.	Tüm ısıtıl işlemlen numunelerin ortalama bağıl sürünme hatası grafiği.....	147
8.1.	Yaşlandırma sıcaklığı ve bekleme süresinin mukavemet, sertlik üzerindeki etkileri.....	150
8.2.	Tüm numunelerin ortalama tekrarlanabilirlik hatalarının grafiği	153
8.3.	Numunelerin ortalama tekrarlanabilirlik hatasının sertlik ile değişimi grafiği.....	155
8.4.	Tüm numunelerin ortalama doğrusallık hatalarının grafiği ...	156
8.5.	Numunelerin ortalama doğrusallık hatasının sertlik ile değişimi grafiği.....	157
8.6.	Histerisiz hatasının şematik gösterimi.....	158
8.7.	Elastiklik modülünün değişiminin abartılarak çizilmiş şematik resmi.....	161
8.8.	Atomlararası kuvvet ile atomlararası mesafe arasındaki ilişki	162

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

8.9.	Akma gerilmesinin altında gerilme – birim şekil değişimi eğrilerinde farklı bölgelerin şematik gösterimi.....	164
8.10.	Histerisiz hatasının sertlik ile değişimi.....	166
8.11.	Sürünme hatasının sertlik ile değişimi.....	172



TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
2.1.	Newton'un ikinci kanununda çeşitli birimler için K-sabiti	8
2.2.	Kuvvet dönüştürücü yay elemanları için malzeme seçim tablosu.....	36
3.1.	Paslanmaz çeliklerin seçimi için genel rehber.....	50
3.2.	Çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelikler ve kimyasal bileşimleri	58
3.3.	Çökelme sertleştirmeli çelikleri geliştirenler ve/veya esas üreticileri.....	59
3.4.	17-4PH paslanmaz çelik malzemenin diğer ülkelerdeki tanımları ve kimyasal bileşimi	63
3.5.	17-4PH paslanmaz çelik malzemeye uygulanabilen ısıt işlemler	64
3.6.	17-4PH paslanmaz çelik malzemede ısıt işlemler sonrası elde edilen mekanik özellikleri.....	64
3.7.	Farklı ısıt işlemli 17-4 PH malzemelerin fiziksel özellikleri....	66
3.8.	Değişik kimyasal ortamlarda 17-4 malzemedeki korozyon oranları	67
3.9.	Çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin ısıt işlem koşulları	68
6.1.	17-4 PH çeliğinin kimyasal bileşimi.....	97
6.2.	17-4PH martenzitik tip çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliklere uygulanan çökelme ısıt işlemleri.....	98
6.3.	AISI 304 (18Cr-8Ni) paslanmaz çelik ile 17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliğinin H900 ısıt işlemi sonrası malzemenin mekanik özellikleri.....	99
6.4.	Deney numunelerine uygulanan ısıt işlemler	102
7.1.	Deney numunelerinin ölçülen sertlik değerleri	106
7.2.	Performansları ölçülen deney numunelerinin kodları.....	126
7.3.	Numunelerin bağıl tekrarlanabilirlik hata değerleri.....	131
7.4.	Numunelerin bağıl doğrusallık hata değerleri.....	136
7.5.	Numunelerin bağıl histerisiz hata verileri.....	141
7.6.	Belirli zaman dilimlerindeki bağıl sürünme hataları.....	148

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
A	: Telin kesit alanı,
a	: İvme
a_t	: Atomlararası uzaklık
b	: Bağlı tekrarlanabilirlik hatası
c	: Malzeme sabiti
D	: Yayınma katsayısı
D_0	: Öz yayınma sabiti
E	: Malzemenin elastiklik modülü (Young modülü)
E_{max}	: Maksimum elastiklik modülü
E_{min}	: Minimum elastiklik modülü
E_r	: Gevşeyen elastiklik modülü
E_u	: Gevşemeyen elastiklik modülü
ΔE	: Gevşeme mukavemeti
F	: Kuvvet
F_a	: Atomlar arası kuvvet
f_c	: Bağlı doğrusallık hatası
G	: Ağırlık
g_{yerel}	: Yerel yerçekim ivmesi
J	: Birim alandan yayınan atom sayısı
K	: Orantı katsayısı
k	: Dirençli uzama ölçere ait orantı katsayısı, faktörü
$k_{1,2,n}$	: Numunenin yay sabiti
$k_{eş}$	: Toplam numune için eşdeğer yay sabiti
L	: Numune boyu, Telin uzunluğu
L_0	: Malzemenin ilk boyu
ΔL	: Malzemedeki uzama miktarı
m	: Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin kütlesi
Q	: Yayınma aktivasyon enerjisi
R	: Dirençli uzama ölçerin gerilme uygulanmadan önceki direnci
R_g	: Üniversal gaz sabiti
ΔR	: Direnç farkı
r	: Telin yarıçapı
r_n	: Yüklemeden sonra n. dakikada alınan kuvvet dönüştürücü çıkışı
r_{20sn}	: Yüklemeden sonra 20. saniyede alınan kuvvet dönüştürücü çıkışı
$r_{sıfır\ ytlk}$	: Yüklenmemiş konumda alınan kuvvet dönüştürücü çıkışı
s	: % sürünme hatası
T	: Mutlak sıcaklık
T_m	: Malzemenin erime sıcaklığı
t	: Zaman
U_A, U_E	: Besleme ve çıkış gerilimi
U	: Bağlı histerisiz hatası

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam Ediyor)

u_1, u_2	: 1. ve 2. serideki histerisiz hatası
u_{ort}	: 1. ve 2. serideki histerisiz hatalarının ortalaması
V	: Cismin hacmi, telin hacmi
X_1, X_2	: 1. ve 2. serilerde artan yönde uygulanan kuvvete karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışları
X'_1, X'_2	: 1. ve 2. serilerde azalan yönde uygulanan kuvvete karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışları
X_{max1}, X_{max2}	: 1. ve 2. serilerde maksimum kuvvete karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışları
$X_{ort-max}$	: Kuvvet dönüştürücünün maksimum yükteki çıkış değerlerinin (X_{max-1}, X_{max-2}) ortalaması
X_r	: Artan kuvvetlere karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışı ortalaması
X_a	: Üçüncü derece polinom kullanılarak hesaplanan kuvvet dönüştürücü çıkış değeri
ϵ_l	: Eksenel birim şekil değişimi
ϵ_r	: Radyal birim şekil değişimi
$\epsilon_{1,2,...}$	: Birim şekil değişimi
λ	: Tel malzemesinin özgül direnci
μ	: Poisson oranı
ρ_{hava}	: Cismin bulunduğu ortamdaki havanın yoğunluğu
$\rho_{küttele}$	: Yerçekim ivmesinin etkidiği cismin yoğunluğu
σ	: Gerilme
σ_A	: Anelastik gerilme sınırı
σ_C	: Uygulanan en büyük çalışma gerilmesi
σ_E	: Elastik gerilme sınırı
σ_Y	: Akma dayanımı
ω	: Numunenin doğal frekansı

Kısaltma**Açıklama**

TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel Teknik Araştırma Kurumu
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
SI	: Uluslararası Birim Sistemi
AISI	: American Iron and Steel Institute
PTB	: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Almanya)
EN	: European Norm
NIST	: National Institute of Standards and Technology (A.B.D)
VSD	: Vickers Sertlik Değeri
HRC	: Rockwell C Sertlik Değeri (Hardness Rockwell C)
PH	: Precipitation Hardened
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
C	: Karbon Elementi

1. GİRİŞ

Yaşadığımız yüzyılda teknolojik olanaklardan yararlanarak bir tasarımın gerçekleştirilmesinde, öncelikle sistemin üzerindeki tüm kuvvetlerin önceden belirlenmiş doğruluk sınırları içinde bilinmesi gereklidir. Bu sayede, ancak en uygun koşullara sahip, ekonomik çalışma koşullarında güvenli bir şekilde sistem tasarlanabilir. Sistemlere etkiyen kuvvetlerin statik ve/veya dinamik olarak gelmesi teorik hesaplamalarla saptanması oldukça güç hatta bazı durumlarda olanaksızdır. Özellikle, uzay ve havacılık çalışmalarında, maksimum mukavemette çok hafif alaşımlara gereksinim duyulması, geliştirilen yeni malzemeler üzerinde mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için kuvvet ölçme yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Makinalarda etkinlik derecelerinin yükseltilebilmesi ve daha ekonomik yapıların oluşturulabilmesi için, kuvvetin veya yüklenmenin doğru olarak ölçülmesi çok önemli bir faktördür. Aynı ölçüm, yarı ve tam otomatik çalışan makinaların kontrol zincirinin oluşmasında da büyük önem taşır.

Üretim yapan fabrikalarda, üretimde kullanılan makina ve cihazların kontrolünde, kalite kontrol ölçümlerinde, malzeme testlerinde, yapı analizinde kısacası mühendisliğin güvenli bir şekilde sürdürüldüğü tüm alanlarda kuvvet ölçümü yapılmaktadır. Kuvvet ölçme cihazları, kontrol ve tartım teknolojilerinde, her geçen gün daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Dönüştürücü, bir enerji biçimini bir başka enerjiye çeviren cihaz olarak tanımlanır. Günümüzde farklı çalışma prensiplere göre çalışan bir çok dönüştürücü geliştirilmiştir ve kullanılmaktadır; elektriksel direnç, indüktans, kapasitans, piezoelektrik, vb. Bunlardan piezoelektrik ölçüm prensipli elemanlar boyutlarının küçük, ağırlığının hafif ve kendinden elektrik çıktısı üretebilmesi nedeni ile daha çoğunlukla dinamik kuvvet ölçümünde kullanılan minyatür ivme ölçerler de (akselerometre) kullanılırlar. Benzer şekilde, eğer koşullar gerektiriyorsa, kapasitif veya indüktif elemanlar da benzer uygulamalarda kullanılmaktadır. Buna karşın,

yüze yapıştırılan elektriksel direnç tipi uzama ölçerler, uygun kullanım özellikleri ve maliyetinin diğerlerine göre düşük olması nedeni ile dönüştürücü üretimi ve kullanımını alanında son 30 yıla ağırlığını koymuş en yaygın kullanılan elemanlardır.

Uzama ölçerli kuvvet dönüştürücüleri, mekanik enerji girdisini, girdi büyüklüğünü ölçmek ve/veya kontrol etmek için, ona karşılık gelen elektrik sinyallerine çeviren cihazlardır. Elektromekanik dönüştürücülerin bu tipleri genellikle kuvvet veya enerjinin uygulandığı kaynak noktaya yerleştirilirler ve ölçüm büyüklüğündeki değişimlere karşı elektrik sinyali gösterirler. Gösterge veya kontrol cihazı, dönüştürücüdenden ayrı uygun bir yere yerleştirilerek dönüştürücü ile kablo bağlantısı yapılır. Bu sayede, uygulanan kuvvete karşılık olarak elde edilen elektriksel çıktılar kuvvet birimine dönüştürülerek ölçüm gerçekleştirilmiş olur.

Günümüzde genel olarak direnç uzama ölçerli kuvvet dönüştürücüler endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan kuvvet ve yük ölçme sensörleridir. Kullanıldıkları alanlara göre kuvvet dönüştürücüsü, yük hücresi, kuvvet transdüseri, dinamometre, yük reseptörü gibi farklı isimler almaktadırlar. Küçük terazilerden büyük kantarlara kadar uzanan yük ölçümlerinde, endüstriyel ve askeri amaçlı kuvvet ölçümünün gerektiği bir çok alanda, bir çok deney cihazı ve deneysel düzeneklerde, çok hassas sonuçların beklendiği kuvvet standardı makinalarının uluslararası karşılaştırma ölçümlerinde taşınabilir olan ara bir standart eleman olarak ve kuvvet ölçme cihazlarının ikincil seviyeli kalibrasyonlarında kuvvet ölçme standardı olarak, çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Bray, 1990 - Fank, 1996). Gelişen teknoloji ile, endüstriyel uygulamalarda bilgisayar kullanımının ve otomasyon sistemlerinin her geçen gün artması ve yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler elektrik sinyali üreten, hızlı ve doğru ölçüm yapabilen bu tip elemanlara duyulan gereksinimi arttırmıştır.

Direnç uzama ölçerli kuvvet dönüştürücüleri isminden de anlaşıldığı üzere, hassas bir şekilde uzama ölçme (strain gage) amacıyla hazırlanmış bir direnç grubu (Wheatstone köprüsü) ve esas kuvvete, yüke maruz kalan gövde veya yay elemanı olarak tanımlanan iki temel yapıdan oluşur. Uzama ölçer direnç elemanları, özel yapıştırma düzenekleri yardımıyla hazırlanmış yay elemanı yüzeyine yapıştırılırlar ve yay elemanına uygulanan kuvvete karşı bir elektrik sinyali üretirler. Direnç uzama

ölçerli kuvvet dönüştürücülerin performansında direnç uzama ölçer, yapıştırma özellikleri ve yay malzemesi etkin parametrelerdendir. Bunlar içerisinde en çok problemle karşılaşılan yay malzemesi ve özellikleridir. Bu malzemenin yapısı, mekanik özellikleri ve belirli çalışma süresi sonrası özelliklerindeki en ufak değişiklikler doğrudan doğruya kuvvet dönüştürücü performansını değiştirir.

Yay malzemesi olarak, kolay bulunabilirlik, ekonomiklik ve beklenen kuvvet dönüştürücü performansını karşılayabilen özel çelikler seçilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin, kuvvet dönüştürücüsü olarak çok farklı ve zor ortam koşullarına dayanmaları beklenir. Bunların başında hava ve iklim koşulları gelir. Havanın içerdiği nemden, sıcaktan ve soğuktan etkilenmeyecek ve en iyi doğruluğu sağlayabilecek kuvvet dönüştürücülerinin üretimi esas olan amaçtır. Kuvvet dönüştürücüsü üreticileri yaygın olarak yay elemanının yüzeyini korozyon direncini arttırabilmek amacıyla çeşitli kaplama (fosfat, boya vb.) malzemeleri ile kaplamaktadırlar. Ancak, bu elemanlar yük altında ve genellikle ağır endüstriyel koşullarda kullanılmaları nedeniyle zaman içerisinde yüzeylerine gelen darbelerle, boya kalitesinin veya yüzeye yapışma direncinin az olması ile ya da uzun süre yük altında çalışmaları sonucunda malzemedeki elastik deformasyonların boya tabakasında çatlaklar oluşturması ile boya tabakalarını kısmen kaybederler. Dolayısı ile, bu bölgede korozyonun oluşması sonucunda, zamanla kuvvet dönüştürücünün performansında etki oluşturması olanağı vardır. Çelik malzemelerdeki bu sınırlamayı yok etmek için kuvvet dönüştürücü üreticileri farklı malzemelere yönelmiş ve yay elemanı gövdelerinin üretimini dış ortamdan fazla etkilenmeyen, korozyon direnci yüksek paslanmaz çelik veya alüminyum malzemelerden üretmeye itmiştir. Alüminyumun mukavemetinin düşük olması nedeniyle genellikle alüminyum malzemedен üretilen kuvvet dönüştürücüler düşük kapasitelerde olmaktadır. Orta ve yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücüler, yaygın olarak çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemedен üretilmektedirler.

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler 1940'lı yıllarda ilk olarak geliştirildiklerinde uçak ve savunma endüstrisinde uygulama alanı bulmuşlardır. Günümüzde üretilen çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler ise; füze gövdelerinde, yüksek hızlı uçakların gövdelerinde, deniz taşıtlarında, yakıt tanklarında, pompalarda, kesici aletlerde, hassas sensörlerde ve kuvvet dönüştürücü

gövdelerinde yaygın bir uygulama alanına sahiptirler. Bu kadar yaygınlaşmalarının nedeni, çelik ile yaklaşık aynı olan mukavemet ve yüksek sertlik değerlerinin yanısıra ostenitik paslanmaz çeliklerin korozyon direncine yakın bir değerde yüksek korozyon direncine sahip olmalarıdır. Bu özellikleri ile birlikte, kuvvet dönüştürücüsünden beklenen performansları da oldukça iyi olarak karşılayan ve uzun süre kararlılığı bozulmayan malzemelerdir. Kuvvet dönüştürücü yay malzemesinde 17-4PH, 15-5PH ve 17-7PH türü çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler yaygın olarak kullanılır. Bu tür çeliklerin ortak özelliği yaşlandırma ısıl işlemi öncesi düşük sertlik derecelerine sahip olmalarıdır. Bu üretim kolaylığı açısından da önemli kriterlerden birisidir. Ayrıca çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin düşük yaşlandırma (çökeltme) ısıl işlem sıcaklıkları gerektirmesi (480° - 620° C arasında), ısıl işlem sonrası oluşan çarpılma hatalarını da oldukça azalmaktadır. Normal olarak bu değer, 0,005 mm/cm dir (Perry ve Jasper, 1977). Sonuç olarak, çoğu durumda ekonomi ve verimlilik açısından ısıl işlem görmüş düşük alaşımlı çeliklerden (Örneğin; AISI 4340 vb.) çok daha iyi ve artı bir özellik olarak korozyon direncine sahiptirler.

Kuvvet dönüştürücüler, kapasitelerine, kullanım alanı ve amacına uygun olarak bir takım konstrüktif özellikleri değişse de, beklenen diğer ve en önemli bir özellik ise doğruluk seviyesinin yüksek olmasıdır. Gelişen teknoloji ile birlikte hassas ölçüm istemlerinin günden güne artması, kuvvet dönüştürücülerden beklenen doğruluk seviyesini de arttırmaktadır. Özellikle, araştırma alanında yüksek doğruluklu deneylerin gerçekleştirilebilmesi, geliştirilen ürünün veya malzemenin özelliklerinin daha iyi bilinmesine ve dolayısıyla hem malzeme hem de ürünün kalitesinin iyileştirilebilmesine, ucuz olmasına olanak sağlamaktadır. Bu da, deneysel çalışma gerçekleştiren sistemlerde kullanılan kuvvet ölçme cihazları veya sensörlerin yüksek doğruluklu olmasına bağlıdır. Bir kuvvet dönüştürücüden beklenen en yüksek doğruluk metrolojik alanlarda görülmektedir, kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan kuvvet standardı makinalarının uluslararası karşılaştırmalı ölçümlerinde karşımıza çıkar (Bray, 1990 - Fank, 1996). Çünkü bu makinalar, kendileri kuvvet birimini gerçekleştiren veya diğer bir deyişle kuvvet üreten sistemler olduğuna göre ve zaten kendileri $2 \times 10^{-5} \div 1 \times 10^{-3}$ mertebelerinde bir doğrulukla çalıştıklarından bunları kontrol eden kuvvet dönüştürücülerin en az bu seviyede bir doğruluğa sahip olmaları gerekmektedir (Fank, 1996). Ancak, 2×10^{-5}

doğruluk yalnızca kütleleri kullanarak kuvvet üreten ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinaları ile elde edilebilmektedir ve günümüzde hiçbir kuvvet dönüştürücü bu doğruluğa erişememiştir (Bray, 1990). Bu nedenle, bu konuda yapılan tüm çalışmalar, en yüksek doğruluğa sahip kuvvet dönüştürücüsünü üretmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu konudaki çalışmalarda da öncülüğü bu işin ticaretini yapan çok büyük kuvvet dönüştürücü üreten firmalar çekmektedir. Dolayısıyla, elde edilen bulgular firma içinde kalmakta ve rekabet açısından elde edilen bilgiler yayınlanmamaktadır. Yüksek doğruluklu kuvvet dönüştürücü üretmenin temel yolu, doğruluğu etkileyen parametrelerin teker teker ele alınması, nedenlerinin belirlenmesi ve bu konuda iyileştirmelere gidilmesidir.

Bu çalışmada, 17-4PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemeden üretilen çekme zorlanmalı kuvvet dönüştürücülerde doğruluğu etkileyen ve performans özellikleri olarak adlandırılan tekrarlanabilirlik, doğrusallık, histerisiz ve sürünme hatalarına neden olan malzeme yapısı ve malzemeye uygulanan ısı işlemlerin etkileri incelenmektedir. Bunun için, tüm numuneler aynı koşullarda hazırlanmış, aynı yüklemelere maruz bırakılmış ve aynı şekilde veriler alınarak, elastik davranan yay elemanı ile buna uygulanan ısı işlemlerin elastik elemanın davranışını nasıl etkilediği ve hangi ısı işlem yönteminin daha yüksek doğruluk elde etmek için uygulanması gerektiği üzerine yoğunlaşmıştır.

Ayrıca bu çalışma, ülkemizde referans standartları oluşturmakla görevli bulunan TÜBİTAK - Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) bünyesinde kuvvet ölçümleri laboratuvarı içerisinde yüksek doğruluklu kuvvet dönüştürücü üretim çalışmalarını yapmak ve bu konudaki bilgi birikimini ülkemiz endüstrisi ve bilimine kazandırmak amacı ile yapılmıştır.

2. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Bu bölümde; genel kuvvet metrolojisi içerisinde kuvvetin tanımından başlayarak kuvvet ölçme cihazları ve kuvvet kalibrasyonunun gerçekleştirildiği makinalar hakkında genel bilgiler; bunlardan sonra kuvvetin elektriksel sinyale dönüşümünde dirençli uzama ölçerlere ait elektriksel devre ile ilgili genel bilgiler ve kuvvet dönüştürücü tasarım ve üretim kriterleri bölümünün içinde ise kuvvet dönüştürücü tasarımı ile ilgili bazı önemli kavram ve kriterler ele alınmaktadır. Daha sonra kuvvet dönüştürücülerin kalibrasyon işlemi ve verilerin değerlendirilmesi ele alınmaktadır.

2.1. Genel Kuvvet Metrolojisi

2.1.1. Kuvvet ölçüm birimleri

Mekanikğin temel büyüklüğü olan kuvvet, türetilmiş vektörel bir ölçüm büyüklüğüdür. Newton'un ikinci kanununa göre kuvvet, bir cismin kütlesi [m] ile o cisme etkiyen kuvvetin oluşturduğu ivmenin [a] çarpımı olarak (2.1) no'lu formül ile ifade edilmektedir.

$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

Uluslararası Birimler Sistemi, SI'daki kuvvet birimi Newton'dur ve sembolü [N]'dir. Bir Newton, 1 kg'lık kütleye 1 m/s² 'lik ivme veren kuvvettir.

$$1 \text{ N} = [1 \text{ kg}] \cdot [1 \text{ m/s}^2] = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2 \quad (2.2)$$

Burada açıkça görüldüğü gibi Newton, Uluslararası Birimler Sistemi, SI'da tümleşik (koherent) ölçüm birimidir.

Kuvvetin özel bir türevi olan ağırlık G , kütle üzerindeki yerçekimi ivmesi g 'nin etkisi olarak tanımlanır ve (2.1) no'lu formülün benzeri olarak vakum ortamında (2.3) no'lu formül ile ifade edilir.

$$G = m \cdot g \quad (2.3)$$

Herhangi bir ortamda, yerçekimi ivmesinin bir kütle üzerindeki etkisinin büyüklüğü ise Arşimed etkisi veya diğer bir deyişle havanın kaldırma etkisi de göz önünde bulundurularak (2.4) no'lu formül ile belirlenir (Bray, 1990). Kuvvet G yerine F ile ifade edildiğinden bundan sonra F ile gösterilecektir.

$$F = m \cdot g_{yerel} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{hava}}{\rho_{küttele}}\right) \quad (2.4)$$

m : Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin kütlesi,

g_{yerel} : Yerel yerçekimi ivmesi,

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu,

$\rho_{küttele}$: Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin yoğunluğu

K : Orantı katsayısı'dır

(2.4) no'lu formülde belirtilen büyüklüklerin, kullanılan birimlerle ilişkisi Tablo 2.1'de verilmiştir. Kuvvet standardı makinalarında ölü ağırlıklarla oluşturulan kuvvet hesabında (2.4) bağıntısındaki her bir parametrenin etkisi dikkate alınmaktadır (Fank, 1996 - Knott, 1995).

Ağırlık, cismin ağırlık merkezinden yeryüzünün merkezine doğru yönlenmiştir. Yerçekiminden dolayı oluşan kuvvetlere yaygın olarak "yük" denilmektedir. Bir noktaya kuvvet uygulamak, o noktayı yüklemek şeklinde de ifade edilebilir. Konuşma dilinde kullanılan kuvvet ve yük tanımları aynı fiziksel büyüklüğü ifade etmektedirler.

Tablo 2.1. Newton'un ikinci kanununda çeşitli birimler için K-sabiti

F	m	g_s veya g_{yerel}	K
N	kg	m/s^2	1
Dyn	g	cm/s^2	1
Poundal	lb	$feet/s^2$	1
Lbf	lb	$feet/s^2$	1/32.17405
Lbf	lb	cm/s^2	1/980.665
Kgf	kg	m/s^2	1/9.80665

1 kgf, standard yerçekimi ivmesinin vakum ortamında 1 kg'lık kütle üzerinde oluşturduğu etki olarak tanımlanmıştır.

$$1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N} \quad (2.5)$$

2.1.2. Kuvvet biriminin oluşturulması

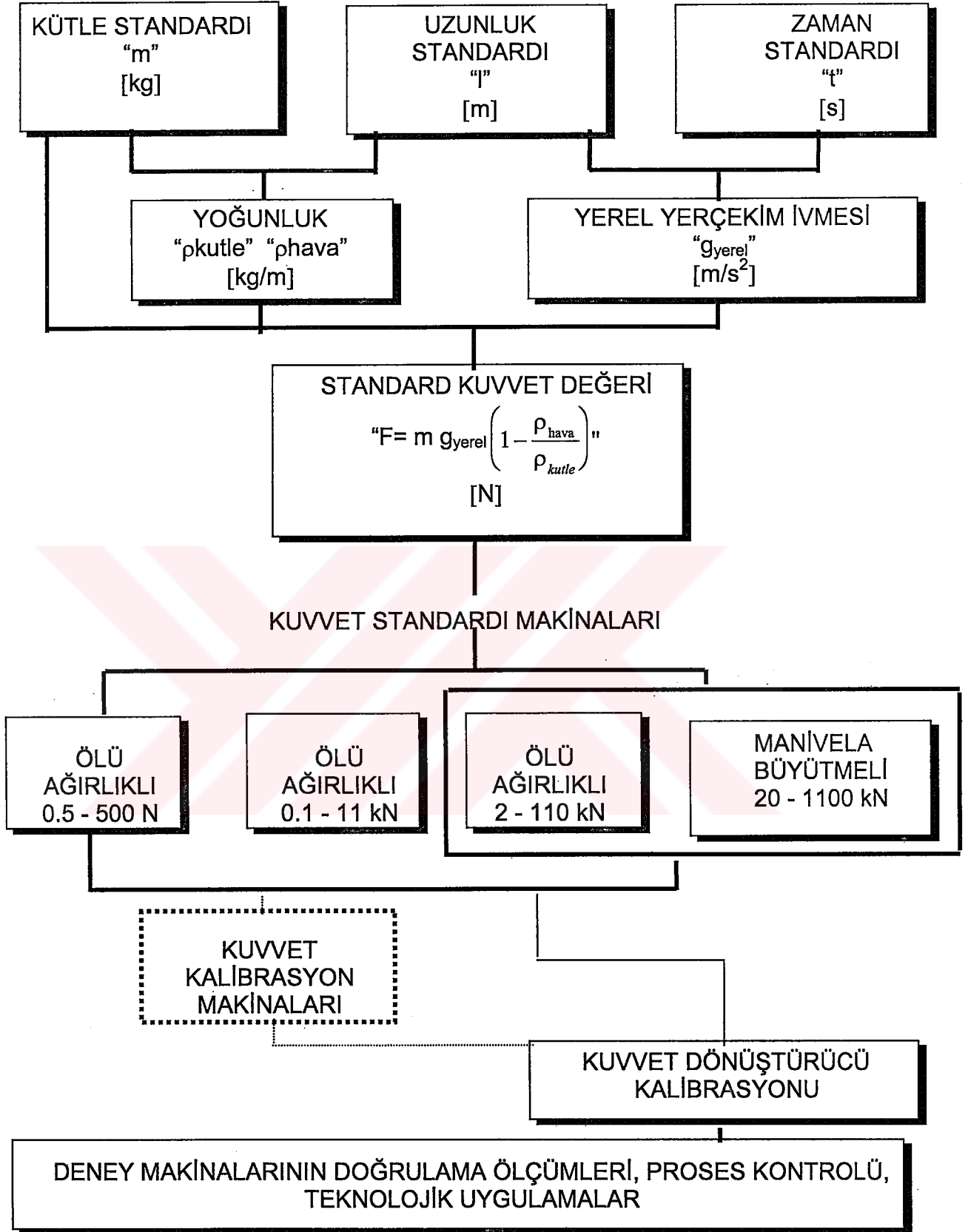
“1 Newton'un 1 kg'lık kütleye 1 m/s^2 ivme veren etki” şeklindeki dinamik çağrışımlı tanımı, birimin gerçekleştirilmesinde kullanılmayan bir yaklaşımdır. Kuvvet biriminin pratik olarak gerçekleştirilmesinde kütleler üzerindeki yer çekimi etkisi prensip olarak kullanılır. En küçük belirsizlik değerine de ancak bu prensibi kullanan sistemlerle ulaşılır. Ancak, büyük kapasiteli sistemlerde ortaya çıkan hacimsel ve konstrüktif zorluklardan dolayı büyük kuvvet değerleri mekanik veya hidrolik ara sistem ve mekanizmalar aracılığı ile oluşturulur. Burada kullanılan ara mekanizmaların beraberinde taşıdıkları hatalar ve diğer harici etkilerden dolayı sistemin toplam belirsizliği, doğrudan kütlelerin kullanıldığı sistemlerin sahip olduğu belirsizlik değerinden daha büyük olmaktadır. Ulusal kuvvet skalasında temel birimlerden kullanıcı seviyesine kadar olan akış Şekil 2.1'de gösterilmiştir. (Kuvvet eğitim dökümanı, 2002)

Temel olarak kuvvetin yüksek doğrulukla oluşturulmasında kullanılan makina türleri şunlardır:

- a) Ölü ağırlıklı makinalar: Bunlar yerçekimi etkisi altındaki kütlelerin oluşturduğu kuvveti doğrudan kullanan makinalardır.
- b) Kuvvetin bir ara sistem ile büyütüldüğü makinalar: Bu makinalar yerçekimi etkisi altındaki kütlelerin oluşturduğu kuvvetin bir veya daha fazla sayıda manivela kullanılarak; ya da bir piston silindir ünitesi yardımıyla büyüterek daha büyük kuvvetlerin oluşturulmasında kullanılan makinalardır.
- c) Referans kuvvet ölçme cihazlı makinalar: Bu makinalar genellikle hidrolik sistem aracılığı ile kuvvet üretmektedirler. Üretilen kuvvet değeri yukarıda belirtilen kuvvet standardı makinalarının birinde kalibre edilmekte ve kalibre edilmiş kuvvet değerlerine göre istenen kuvvet değerlerini oluşturmaktadırlar. Bu makinalar tek veya birbirlerine paralel olarak bağlanmış referans kuvvet dönüştürücülerini kullanan sistemlerdir.

Eğer yukarıda tarif edilen bu makinalar, Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde, ülkedeki tüm kuvvet ölçümlerine referans teşkil etmek üzere kullanılıyor ise, Kuvvet Standardı Makinası (KSM) olarak adlandırılırlar. Ancak, bu makinalar çeşitli üretim ve deney noktalarında kullanılıyorlar ve metrolojik karakteristikleri ülkenin Ulusal Metroloji Enstitüsü tarafından belirlenmiş ise, Kuvvet Kalibrasyon Makinası (KKM) olarak adlandırılırlar. (Bray, 1990)

Deneysel çalışmalarda kuvvet dönüştürücü numunelerin kalibrasyon ve ölçümleri, TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü bünyesindeki Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarı'nda kurulu 110 kN'a kadar ölü ağırlıklar ile, 1.1 MN'a kadar da manivela büyütmeli olarak kuvvet oluşturan kuvvet standardı makinasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.2'de genel görünüşü verilmiş olan bu makina iki kısımdan oluşmakta olup; ölü ağırlıklı kısımda 110 kN, manivela aktarımlı kısımda 1.1 MN nominal kapasiteye sahiptir.

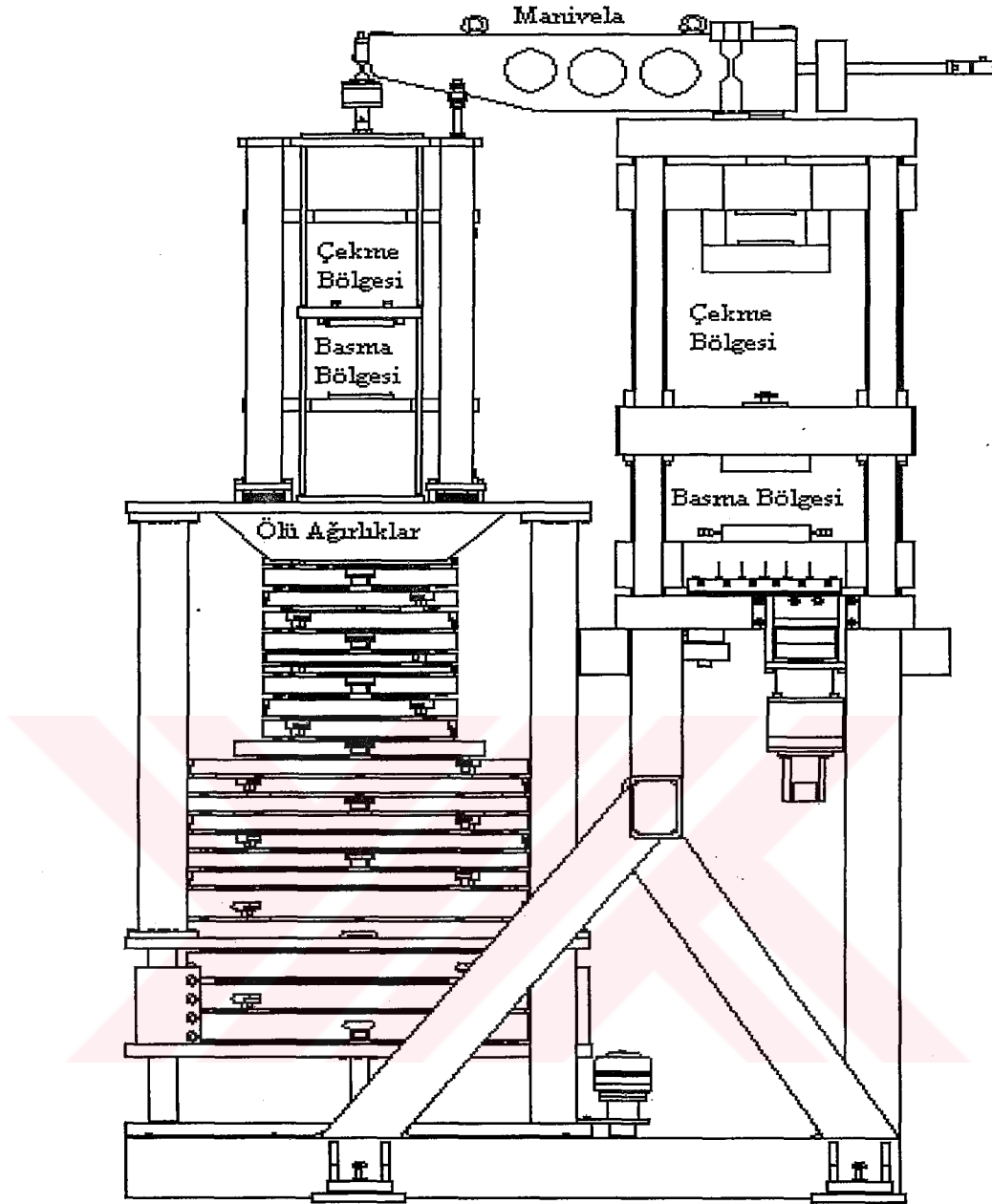


Şekil 2.1. Ulusal kuvvet skalası izlenebilirlik zinciri (Kuvvet eğitim dökümanı, 2003)

Ölü ağırlıklı kısımda kuvvet ölçme cihazlarının maksimum kapasiteleri olarak artık standardlaşmış olan 20 kN, 50 kN, 100 kN kuvvet aralıklarını % 10'luk artımlarla 10 adımda yükleme yapabilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Disk şeklinde 2 kN, 3 kN, 5 kN ve 10 kN'luk toplam 25 adet ölü ağırlık, bir taşıyıcı tabla üzerine oturtulmuştur. Bu taşıyıcı tabla bir servomotor tahrikli sonsuz vida mekanizması yardımıyla aşağı yukarı hareket edebilmektedir. Tablanın aşağı hareketi sırasında ilk kütle değerini oluşturan ve kefe olarak adlandırılan sistem, kuvvet ölçme cihazının üzerine asılmakta, onu takip eden diğer kütleler ise öncelikle bu kefeye ve sırasıyla da birbirlerine asılmaktadırlar. Kefeden bağımsız servomotor yardımıyla hareket edebilen iki ara plaka, basma durumunda kuvvet dönüştürücüsünün oturduğu, çekme durumunda ise kuvvet dönüştürücüsünün asıldığı elemanlardır. Bu elemanlar dönüştürücünün boyutlarına göre serbestçe hareket ederek ayar yapılabilmesine olanak sağladığı gibi kuvvet dönüştürücülerin ani yükleme-boşaltmasını da yapabilmektedir. Şekil 2.2'de fotoğrafı ve Şekil 2.3'de ise şematik olarak gösterilen makinanın yüksekliği yaklaşık olarak 5 m'dir.



Şekil 2.2. 110 kN/1.1 MN kapasiteli ölü ağırlıklı manivela büyütmeli kuvvet standardı makinasının resmi



Şekil 2.3. 110 kN / 1.1 MN kapasiteli manivelalı tür ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinası montaj şeması (Kuvvet eğitim dökümanı, 2003)

Kütle kalibrasyonu ve ayar işlemleri sonucunda elde edilen kuvvet değerinin belirsizliği teorik olarak (2.5) no'lu bağıntıda bulunan, kütle, yerçekim ivmesi, hava ve kütlelerin yoğunluklarının ölçümü sırasında görülen belirsizliklerin toplamı ile bulunmakta olup elde edilen sonuç ölü ağırlıklı makineler için 2×10^{-5} seviyelerinde olmaktadır. Bu sonuç, sistemdeki tüm belirsizlik bileşenlerinin belirsizliği şeklinde elde edilmektedir. İdeal olan durum kuvvet ölçümünün doğrudan gerçekleştirilmesidir. Ancak, günümüzde kuvvet için deneysel belirsizlik

seviyelerinde metrolojik karakteristiğe sahip bir kuvvet ölçüm cihazı henüz üretilmemiştir (Bray, 1990).

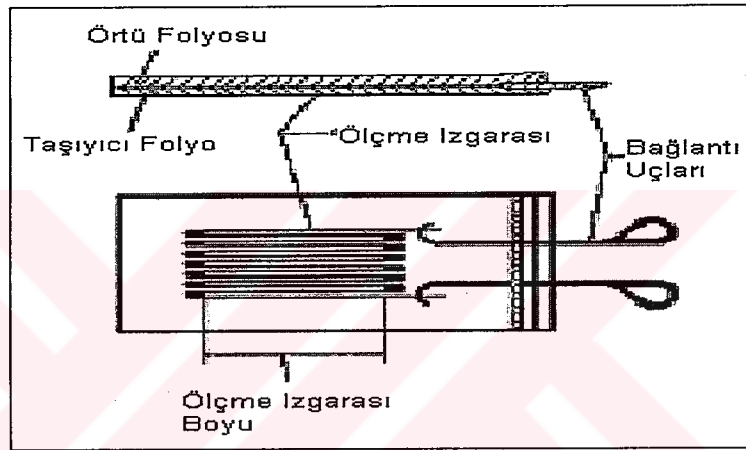
Türkiye'nin ulusal kuvvet standardının 110 kN'a kadar olan kısmını oluşturan bu makinanın belirsizlik seviyesinin bulunması ve uluslararası skaladaki yerinin ilanı için Almanya'nın Ulusal Metroloji Enstitüsü olan PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) ile yapılan uluslararası karşılaştırmalı ölçümler sonucunda elde edilen sonuçlarla, bugün için dünyada ulaşılabilen en iyi değer olan 2×10^{-5} elde edilmiştir. (Fank, 1996 - Fank, 1995) Dünyada kapasiteleri 10 N'dan 4.4 MN'a kadar değişen çeşitli tür ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinaları bulunmaktadır. Bunların belirsizlikleri ise 1×10^{-5} ile 5×10^{-5} arasında değişmektedir. Makinanın ikinci kısmında ise; birinci kısımdaki ölü ağırlıklarla üretilen kuvvet değerleri bir manivela yardımı ile on (10) kat büyütülmektedir. Şekil 2.3 ve 2.4'de görülen manivelalı kısımda 200 kN, 500 kN, 1 MN kuvvet aralıkları % 10'luk artımlarla 10 adımda yükleme yapabilecek kabiliyettedir. Yine PTB ile UME arasında yapılan uluslararası karşılaştırmalı ölçümler sonucunda elde edilen sonuçlara göre manivelalı kısım ölçüm belirsizliği 1×10^{-4} olarak elde edilmiştir (Fank, 1996). Dünyada kapasiteleri 1.96 N'dan 2.4 MN'a kadar değişen çeşitli tür manivelalı ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinaları mevcut olup bunların belirsizlikleri 5×10^{-5} ile 2×10^{-4} arasında değişmektedir (Bray, 1990 - Fank, 1996). Bu kuvvet standardı makinasının yüksek doğruluk ve güvenilir sonuçların elde edildiği 110 kN kapasiteli ölü ağırlıklı kısmı, bu çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen kuvvet dönüştürücü elemanlarının ölçülmesi veya kalibrasyonunda kullanılmıştır.

2.2. Kuvvetin Elektriksel Sinyale Dönüşümü

2.2.1. Dirençli uzama ölçerler hakkında genel bilgi

Elektrik dirençli uzama ölçerlerin çalışma prensibi, 1856 yılında Lord Kelvin tarafından ifade edilen elektriksel olarak iletken olan malzemelere gerilme uygulandığında oluşan birim şekil değişimi ile orantılı olarak elektrik direnç değerleri değişmesi prensibine dayanmaktadır. Uzama yönünde birim şekil değişimleri elektrik direnç değerinde artışa, kısılma yönünde birim şekil değişimleri ise elektrik direnç değerinde azalmaya yol açmaktadır (Özbay, 1997 - Erdiller, 1982 - Vaughan, 1975).

Mekaniksel gerilmelerin elektriksel büyüklüğe dönüştürülmesinde kullanılan elektrik dirençli uzama ölçerler amaca göre çok değişik şekil ve özellikte üretilmektedir (Özbay, 1997 - Erdiller, 1982 - Vaughan, 1975). Dirençli uzama ölçerin yapısı Şekil 2.4'te görüldüğü gibi; uzama teli, taşıyıcı ve örtü folyoları ve lehim uçları olmak üzere üç kısımdır. Birinci kısımda, ölçmede yararlanılan malzeme ile birlikte şekil değiştirerek ΔR direnç farkını oluşturan uzama teli, iki izole folyo arasında yer almaktadır. Uzama telinin çapı genellikle $18 - 25 \times 10^{-3}$ mm arasındadır. Bir kısım uzama telleri ise $3 - 5 \times 10^{-3}$ mm kalınlığında direnç malzemesinden kesilmiş madeni folyodan yapılmaktadır.



Şekil 2.4. Bir dirençli uzama (gerinim) ölçer elemanının yapısı

En yaygın tel malzemeleri konstantan (Cu-Ni) veya isoelastik (Fe - Ni) alaşımlarıdır (Hoffman, 1976). Bu malzemelerin sıcaklıkla boyut değişimleri çok sınırlı olduğundan dirençleri de çok az değişmekte olup özgül dirençleri yüksek ve uzayabilme yetenekleri fazladır. İkinci kısım, değişik şekillere sahip olabilen, uzama telini içine alan, elektriksel yönden izole, örtü ve taşıyıcı folyodan oluşmaktadır. Üçüncü kısım, uzama telinin dış devrelere bağlanmasını sağlayan, daha kalın lehim uçlarından oluşmuştur; bunlar folyo içindeki uzama teline lehim edilmişlerdir.

2.2.2. Direnç değişimi ile birim şekil değişimi arasındaki ilişki

Direnç değişimi ile birim şekil değişimi arasındaki ilişkiyi, üzerinden akım geçen bir telin uygulanan gerilme sonucunda uzatılması durumu ele alınarak incelendiğinde, aşağıdaki analize ulaşılır (Parlaktürk, 2000 - Erdiller, 1982 - Vaughan, 1975).

Bu analizde kullanılan fiziksel büyüklükler aşağıda sıralanmıştır.

R : Telin direnci

λ : Tel malzemesinin özgül direnci

L : Telin uzunluğu

μ : Poisson oranı

V : Telin hacmi

r : Telin yarıçapı

A : Telin kesit alanı

$$R = \lambda \cdot \frac{L}{A} \quad (2.6)$$

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (2.7)$$

olarak elde edilir. (2.6) ve (2.7) denklemlerinin logaritması alındığında,

$$\log R = \log \lambda + \log L - \log A \quad (2.8)$$

$$\log A = \log \pi + 2 \cdot \log r \quad (2.9)$$

elde edilir. (2.8) eşitliği (2.9) 'da yerine koyulup kısmi türevi alındığında da;

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} - 2 \cdot \frac{dr}{r} \quad (2.10)$$

elde edilir. Silindirik bir telde aksenal ϵ_1 birim şekil değişimi;

$$\epsilon_1 = \frac{dl}{l} \quad (2.11)$$

olduğundan yatay ekseninde ϵ_r birim şekil değişimine neden olur.

$$\epsilon_r = \frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l} \quad (2.12)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} \cdot (1 + 2 \cdot \mu) \quad (2.13)$$

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = \frac{\frac{d\lambda}{\lambda}}{\frac{dL}{L}} + (1 + 2 \cdot \mu) \quad (2.14)$$

Bridgman'a göre, hidrostatik basınç altındaki metaller için aşağıdaki eşitlik geçerlidir (Fank, 2002 - Parlaktürk, 2000 - Dally, 1965):

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = c \cdot \left(\frac{dV}{V} \right) \quad (2.15)$$

Burada c bir malzeme sabitidir.

Bu koşulun uygulanan gerilme altındaki metaller için de kullanılabileceği kabul edilirse;

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = c \cdot \frac{dV}{V} = c \cdot \left(\frac{dL}{L} + \frac{dA}{A} \right) = c \cdot \frac{dL}{L} \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \quad (2.16)$$

sonucu elde edilir. Buradan birim uzama değişiminin yol açtığı direnç değişimi oranlanırsa,

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = (1 + 2 \cdot \mu) + c \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \quad (2.17)$$

bağıntısı elde edilir. (2.17) no'lu eşitliğin sağ tarafı, bir dirençli uzama ölçerin, ölçme cihazı olarak hassasiyetinin boyutunu vermektedir ve yaygın olarak k harfi ile gösterilmekte olup; "**k-faktörü**" olarak anılmaktadır.

Böylece temel eşitlik, (2.18) bağıntısındaki şeklini almaktadır (Fank, 2002 - Parlaktürk, 2000 - Dally, 1965).

$$\frac{dR}{R} = k \cdot \frac{dL}{L} \quad (2.18)$$

$$k = (1 + 2 \cdot \mu) + c \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \quad (2.19)$$

2.2.3. Wheatstone köprüsünün temel prensibi ve kuvvetin okunması

Wheatstone köprüsü direnç değişimi ölçümünün bilinen en iyi yöntemidir. Köprü elemanı olarak kullanılan dirençli uzama ölçerlerin ölçüm yapılacak yerlere uygun şekilde yapıştırılmalarıyla, fiziksel boyutlarda meydana gelen mikron seviyesindeki değişimleri elektriksel direnç değişimine dönüştürmek ve bu değişimi

bir göstergeden okunması yapılan işlemi tarif etmektedir (Fank, 2002 - Parlaktürk, 2000 - Vaughan, 1975).

Direnç değişimi ile boyutsal değişim arasındaki ifade (2.18) bağıntısında gösterilmekte olup bu ifadeyi yeniden (2.20)'deki gibi yazma olanağı vardır.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = k \cdot \varepsilon \quad (2.20)$$

R : Dirençli uzama ölçerin gerilme uygulanmadan önceki direnci

ΔR : Gerilmenin yarattığı direnç farkı

L_0 : Malzemenin ilk boyu

ΔL : Gerilmenin yarattığı uzama

k : Dirençli uzama ölçere ait orantı faktörü

ε : Birim şekil değişimi

$\Delta L/L_0$ oranı ε ile ifade edilir ve dirençli uzama ölçerin birim şekil değişimi olarak adlandırılır. Malzemeye uygulanan gerilme, dirençli uzama ölçer tarafından direnç değişimine dönüştürülürken, önceden her dirençli uzama ölçer için deneysel olarak bulunmuş olan k orantı faktörü dikkate alınır. Dirençli uzama ölçerin saptanan direnç değişiminin k 'ya bölünmesi ile malzemedeki birim uzama bulunur. Ölçüm yapılan malzemenin E elastiklik modülünün bilinmesi halinde malzemedeki tek eksenli gerilme hali için geçerli olan Hooke bağıntısı yardımıyla, gerilme;

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.21)$$

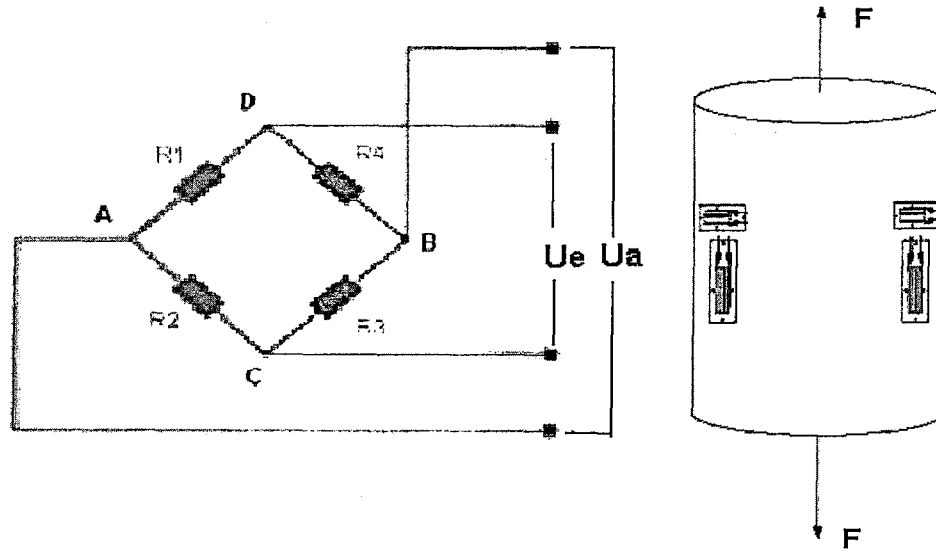
eşitliği ile hesaplanabileceği gibi aynı eşitlik yardımıyla

$$\sigma = E \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (2.22)$$

şeklinde de hesaplanabilir.

Şekil 2.5'te şematik olarak verilen ve dört kolu bulunan bir Wheatstone köprüsü R_1 , R_2 , R_3 , R_4 dirençli uzama ölçer elemanlarından oluşmaktadır. Bu tip dönüştürücü imalatı yapan her firma, giriş ve çıkış uçlarını farklı renklerle kodlayarak kullanma kolaylığını hedeflemişlerdir. Böylece, hazır alınan bir köprü devresinin giriş ve çıkış uçları kolayca saptanabilmektedir (Fank, 2002 - Dally, 1965). Şekil

2.5’da dirençli uzama ölçer elemanları ile oluşturulan bir köprü ve kolon tipi bir kuvvet dönüştürücü üzerindeki yerleri gösterilmektedir.



U_A : Çıkış gerilimi U_E : Giriş gerilimi

Şekil 2.5. Çekme çubuğu üzerine yapıştırılmış dirençli uzama ölçerlerden oluşmuş Wheatstone köprü devresi

Uygulamalarda girişe uygulanan gerilim giriş gerilimi veya besleme gerilimi olarak bilinmekte olup genellikle 5 ile 15 V arasında belirlenir. Dönüştürücü sınıfı dirençli uzama ölçerler için bu değer genelde 5 V olarak seçilmektedir (Technical Note, 1979). Daha yüksek bir besleme gerilimi ızgaranın aşırı ısınmasına neden olur. Düşük besleme geriliminde de ısı oluşmaktadır ancak bu dirençli uzama ölçerlerin yapıştırıldığı malzeme yüzeyine kolayca iletilerek denge sağlanmaktadır. Dolayısıyla, bu ısının çok düşük değerlerde kalması gereklidir. Aksi durumda, kuvvet dönüştürücüde sıcaklık kompanzasyonunda bazı kayıplar meydana gelir ve histerisiz ile sürünme değerleri artar (Technical Note, 1979).

Çıkış geriliminin değeri, giriş gerilimine ve R_1/R_2 , R_4/R_3 dirençlerinin oranlarına bağlıdır. Genel olarak,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (2.23)$$

bağıntısı geçerli olup özel bir durum olarak $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ veya $R_1/R_2 = R_4/R_3$ koşulu varsa $U_A/U_E = 0$ olmaktadır. Bu denklemde U_A : çıkış gerilimi, U_E : ise besleme gerilimidir. Uygulamada sağladığı yarar açısından U_A/U_E oranı başlangıçta sürekli olarak sıfır yapılmaya çalışılmaktadır.

R_1, R_2, R_3, R_4 dirençlerinden bir veya birkaçının değerinin değişmesi, U_A çıkış geriliminin de değişmesi ile sonuçlanır. Ara işlemler ve bazı değerlerin çok küçük olması nedeniyle ihmaller yapıldığında (2.23) denklemi (2.24) şeklinde yazmak olasıdır.

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.24)$$

elde edilir. Bu son eşitlikte (2.20) bağıntısında gösterilen $\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$ yerine koyulursa,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.25)$$

ifadesine ulaşılır. Kuvvet dönüştürücü tasarım ve üretiminde genellikle bu eşitlik kullanılarak tam yük uygulandığında elde edilen çıkış gerilimi olan ve hassasiyet (sensitivity) olarak adlandırılan 2 mV/V'luk (5 V'luk besleme gerilimi için 10 mV'luk bir çıkış gerilimi) değerine ulaşılmaya çalışılmaktadır (Hoffman, 1976).

Ölçümlerde dirençli uzama ölçer eksenlerinin yük eksenini ile çakışması gerekir. Aksi durumda dirençli uzama ölçer, yükün yalnızca kendi eksenini üzerindeki izdüşümünü ölçebilmektedir. Dirençli uzama ölçerlerin ölçme eksenine tam paralel ve tam dik olacak şekilde yapıştırılmamaları durumunda ölçme yapacak dirençli uzama ölçer eksenleri ile ölçme eksenini arasında kalan açıdan dolayı uygulanan kuvvete ek bileşke kuvvetler ortaya çıkacak ve bu da hataya neden olacaktır (Technical Note, 1983). Buradan gelebilecek hatayı en aza indirmek için kolon türü kuvvet dönüştürücülerde dirençli uzama ölçerlerin 90° açığa sahip olanlarının kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada da bunu sağlayacak birbirine göre 90° açığa sahip dirençli uzama ölçerler seçilmiş olup bunların kolon türü bir yay elemanı üzerinde yerleşim düzenleri Şekil 2.5'de gösterilmektedir.

Köprü kollarında bulunan dirençlerden bir veya birkaçının direncinin değişmesi sonucu (2.25) numaralı eşitlik uyarınca, köprü çıkışında girişe göre bir farklılık oluşmaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen U_A/U_E değeri, uzamanın bir fonksiyonudur. Bu nedenle, her zaman kullanılan ölçme cihazlarının ölçüm aralıkları uzamayı esas alan bir yöntemle kalibre edilmektedir. Genel olarak cihazlarda uzama birimi olarak $1 \mu\text{m}/\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{m}$ kullanılmaktadır. Bazı özel ölçü aletlerinde skalada okunan ε değeri, o andaki gerçek değer $\Delta L/L$ 'yi göstermektedir. Bu tip cihazlar dirençli uzama ölçer'in k faktörü dikkate alınarak kalibre edilmişlerdir. Çok yüksek doğruluklu ölçümler yapılması amacı ile geliştirilmiş cihazlarda ise doğrudan mV/V cinsinden gösterge değeri elde edilebilmektedir (Fank, 2002 - Technical Note, 1983 - Hoffman, 1976).

Çekme gerilmesi uygulanan ve Şekil 2.5'de gösterilen çubukta gerilme yönündeki birim uzama $\varepsilon_1 = \sigma / E$, gerilme yönüne dik yöndeki birim uzama ise $\varepsilon_2 = -\mu \varepsilon_1$ şeklinde tanımlanmaktadır. O halde 1 no'lu dirençli uzama ölçer'in direnç değişimi $\Delta R_1 = \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_1$ ve 2 no'lu dirençli uzama ölçer'in direnç değişimi $\Delta R_2 = \mu \cdot \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_2$ kadar olacaktır. Aynı eşitlikler 3 ve 4 no'lu dirençli uzama ölçerler için de yazılabilir. Burada μ , Poisson oranıdır (Hoffman, 1976b). Şekil 2.5'de gösterilen dört dirençli uzama ölçer aynı şekildeki çekme çubuğu üzerindeki gibi indislenir ve bir tam köprü yapacak şekilde bağlanırsa, ölçme sonunda, 2.25 no'lu bağıntıya uygun olarak;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.25)$$

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot [\varepsilon_1 - (-\mu\varepsilon_1) + \varepsilon_3 - (-\mu\varepsilon_3)] \quad (2.26)$$

eşitliği yazılabilir. Yaklaşık $\mu = 0.30$ olması, ve $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$, ve $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 \cong 0.3 \cdot \varepsilon_1$ kabul edilmesi durumunda,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot 2.6 \cdot \varepsilon_1 \quad (2.27)$$

elde edilir. Dört aktif dirençli uzama ölçer tarafından oluşturulan köprü devresinden alınacak sinyal ε_1 uzamasının 2.6 katıdır. Çubukta basma gerilmesi olursa ε_1 den ε_4 'e

kadar olan birim uzamaların yalnızca işareti değişecektir. Çekme çubuğu şeklinde üretilen gerçek bir deney numunesi üzerinde dirençli uzama ölçerlerin yapılandırılmış ve Wheatstone devresi oluşturulmuş konumundaki resmi ile ölçümde kullanılan gösterge ünitesi resmi birlikte Şekil 2.6'da görülmektedir. Devreler sokete bağlanırken altı tel prensibine göre bağlanmıştır. Bu bağlama biçimi kablo uzunluğunun neden olduğu kablo direnci hatalarını yok etmede oldukça etkili olmaktadır (Hoffman, 1976).



Şekil 2.6. Çekme çubuğu şeklindeki numune üzerinde dirençli uzama ölçer devresi ve gösterge ünitesi

2.3. Kuvvet Dönüştürücü Yay Elemanı Tasarım Kriterleri

Bir kuvvet dönüştürücüsünün ana gövdesini oluşturan mekanik parçası yay elemanıdır. Genel olarak ifade edildiğinde, yay elemanının fonksiyonu, uygulanan yüke reaksiyon göstermek ve bunu yaparken yük ölçümü amacı ile yerleştirilmiş olan dirençli uzama ölçerler yardımıyla düzgün ve homojen bir şekil değişimi bölgesi oluşturmaktır. Bu tanımlamadan da anlaşıldığı gibi, yay elemanının ölçüm alanındaki birim şekil değişimi seviyesinin, uygulanan yük ile doğrusal ve elastik bir ilişki içinde olması gerektirir. Bir başka deyişle, ideal bir kuvvet dönüştürücüsü, uygulanan gerilmeyle oluşan birim şekil değişimi arasında doğrusal bir orana sahiptir (Fank, 2002 - Measurements Group Yayını, 1988 - Holman, 1994).

Kuvvet dönüştürücüsü yay elemanları, öngörülen şekil değişimi türüne bağlı olarak üç ayrı gruba ayrılmaktadır: a) eğilme gerilmeli elemanlar, b) tek eksenli çekme/basma gerilmeli elemanlar c) kayma gerilmeli elemanlar. Bu üç tür yay elemanının çok çeşitli ve farklı türleri de mevcuttur (Fank, 2002 - Measurements Group Yayını, 1988).

Bu çalışmada, özellikle merkezleme probleminden kurtulabilmek için kendi kendine merkezlenebilen, gerek imalatının kolaylığı, gerek yorulma ve sürünme deneylerinin kolay uygulanabilmesi, dirençli uzama ölçerlerin kolay yapılandırılması ve kuvvet makinasına kolay bağlanabilirliği gibi nedenlerle, çekme çubuğu şeklinde tek eksenli zorlanan numuneler tercih edilmiştir. Çekme gerilmeli kuvvet dönüştürücülerde, makina ile dönüştürücü bağlantısı küresel yuvalar ile sağlandığından kuvvet uygulandığında bu sayede kendi kendini eksene getirmesi söz konusudur. Özellikle basma ve eğme gerilmeli kuvvet dönüştürücülerde kuvvetin sürekli olarak merkezden basmasını sağlamak oldukça güçtür. Kuvvet dönüştürücülerin kuvvet makinası altına yerleştirilmelerindeki en ufak eksen kaçıklığının sonuçları doğrudan etkilemesi nedeniyle bu etkileri ortadan kaldırmak ve daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla çekme gerilmeli türü kuvvet dönüştürücü tercih edilmiştir.

2.3.1. Yay elemanı tasarımında temel kriterler

Aşağıda açıklanmaya çalışılan kriterler genel olarak tüm kuvvet dönüştürücüsü yay elemanları için geçerlidir. Ancak, her bir kriterin önemi söz konusu olan dönüştürücünün kullanım amacı ve türüne bağlı olarak değişmektedir. Tüm bu kriterler birbirlerinden bağımsız olmayıp aralarında yakın ilişkiler vardır (Fank, 2002 - Measurements Group Yayını, 1988 - Bray, 1990).

2.3.1.1. Doğal frekans

Kuvvet dönüştürücü için belirlenmiş hassasiyet ve diğer işlevsel gereksinimlerin sonucu, yay elemanının doğal frekansı olabildiğince yüksek olmalıdır. Bu, normal olarak gereksiz kütlesi olmayan, rijit ve düşük esnemeli bir tasarımı gerektirmektedir. Doğal frekansın yüksek tutulmasının en önemli sonucu yay elemanı elastik şekil değişimi miktarının en aza indirilmesi gerekliliğidir. Bunun

nedeni ise, dirençli uzama ölçer ölçme aralığının, elastik alanda iyi bir performans sergilemesi için en çok 1700 $\mu\text{m}/\text{m}$ ile sınırlı olması gereğidir. Deneylerde kullanılan numunelerin doğal frekansı (2.28-29-30) bağıntılarından yararlanarak elde edilebilmektedir (Steidel, 1971).

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{es}}{m}} \quad (2.28)$$

$$k_{1,2,..n} = \frac{E \cdot A}{L} \quad (2.29)$$

$$\frac{1}{k_{es}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (2.30)$$

- ω : Numunenin doğal frekansı
 m : Numunenin kütlesi
 $k_{1,2,..n}$: Numunenin yay sabiti, (farklı kesitler için (2.29) ile hesaplanan yay sabitleri)
 k_{es} : Numune için eşdeğer yay sabiti
 E : Numune malzemesinin elastiklik modülü
 A : Numunenin kesit alanı
 L : Numune boyu

2.3.1.2. Tam yük uygulandığında, ölçme bölgesinde dirençli uzama ölçer için uygun performansı veren birim şekil değişiminin sağlanması ve en uygun noktanın belirlenmesi

Yay elemanı tasarımında ilk önce yay elemanı boyutlarının kuvvet dönüştürücü tam yük altında iken, ölçme bölgesinde önceden belirlenmiş olan birim şekil değişimi oluşacak şekilde seçilmesi gereklidir. Yay elemanının ölçme bölgesindeki birim şekil değişimi miktarı, tam yükleme anında istenen çıkış sinyalini sağlayacak uygun bir büyüklükte ve homojen bir şekilde yayılmış olmalıdır. Yay malzemesinin doğrusal birim şekil değişimi göstermemesi, dirençli uzama ölçerlerin yorulma ömrü gibi çeşitli sınırlayıcı etkenlerden dolayı, birim şekil değişimi seviyesi genellikle 1000 - 1700 $\mu\text{m}/\text{m}$ arasında tutulmaktadır (Fank, 2002 - Measurements Group Yayını, 1988 - Bray, 1990). Uzama ölçer tüm yay elemanı boyunca en büyük birim şekil değişiminin olduğu noktaya yapıştırılmalıdır. Bu sayede uygulanan kuvvete karşılık elde edilen sinyal en yüksek değerde olacaktır.

2.3.1.3. Ölçme bölgesinde homojen birim şekil değişimi dağılımının sağlanması

Kuvvet dönüştürücüsünün elektrik çıkışı, ölçme bölgesindeki izin verilen maksimum birim şekil değişimi seviyesi ile sınırlanmıştır. Bu birim şekil değişimi seviyesi ile ölçüm sinyalinin en büyük değerine ulaşılabilmesi için dirençli uzama ölçer ızgaralarının bulunduğu tüm alan üzerinde homojen bir şekilde yayılmış olmalıdır, eğer uygulanabiliyorsa dirençli uzama ölçerin lehim plakalarının en düşük birim şekil değişiminin olduğu alanda olması dirençli uzama ölçerin yorulma ömrünü de olumlu yönde etkileyerek iyileştirir.

2.3.1.4. Dirençli uzama ölçerin yapılandırıldığı alan dışında kalan kısımlarında düşük birim şekil değişiminin elde edilmesi

Yay elemanının en büyük birim şekil değişiminin olduğu noktadaki birim şekil değişimi miktarı, tam yükleme anında istenen çıkış sinyalini sağlayacak uygun bir büyüklükte ve homojen bir şekilde yayılmış olmalıdır. Genellikle, yorulma ömrü, doğrusallık, sürünme ve histerisiz gibi kuvvet dönüştürücüsünün performansını belirleyen özellikler, yay elemanının tümünde etkin olan gerilme seviyesinin düşürülmesi ile iyileştirilebilir. Yapılan araştırmalar en iyi yay elemanı malzemelerinde bile tüm katıların gerilme altında belirli derecelerde mikropplastik davranışlar sergilediklerini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, düşük seviyeli mekanik zorlamalar, ideal doğrusal elastik davranıştan daha düşük sapmalar demektir. Bu nedenle kuvvet dönüştürücü tasarımı yapılırken elastik bölgenin oldukça altında bir bölge seçilerek mikropplastik davranış olabildiğince düşük tutulmaya çalışılmaktadır (Measurements Group Yayını, 1988).

2.3.1.5. Tek parçalı konstrüksiyon

Kuvvet dönüştürücüsünün tek parça olarak üretilmesinde tekrarlanabilirlik, doğrusallık ve histerisiz hataları gibi tüm değerlendirme parametreleri en iyi değerlerine ulaşmaktadır (Measurements Group Yayını, 1988). Yük altında yay elemanının şekil değiştirmesi çok küçük ve gözle görülemez olmasına karşın, gerçek ve sonlu bir büyüklüktür. Bu yüzden, her türlü çok parçalı üretimdeki mekanik bağlantı, hareket ve sürünme doğrusallıktan sapma ve histerisize neden olmaktadır. Kaynak bağlantıları da yorulma ömrüne ve mikropplastik davranışa olumsuz katkıda

buldukları ve artık gerilmeler ile metalürjik düzensizlikler içermeleri nedeniyle tercih edilmemektedirler.

2.3.1.6. Ölçüm eksenindeki yüklerle karşı düşük duyarlılık göstermesi

İdeal bir kuvvet dönüştürücüsü (özel amaçlı dönüştürücüler hariç) yalnızca tek bir eksenindeki kuvvet bileşenlerine cevap vermeli; diğer yönlerden gelen kuvvet ve momentlere karşı çıkış vermeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Her ne kadar ideal kuvvet dönüştürücü tanımına ulaşma olanağı yoksa da; dikkatli tasarım ile ideale yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu durum için, yalnızca yay elemanı ile değil aynı zamanda da dirençli uzama ölçerin uygulandığı noktanın, konumunun ve muhafaza parçalarının da doğru seçilmesi de önemlidir (Measurements Group Yayını, 1988 - Özbay, 1997).

2.3.1.7. Aşırı yük uygulanmasına karşı koruma

Dönüştürücü imalatçıların çok sıklıkla karşılaştıkları durumlardan birisi olarak, dönüştürücülerin kullanıldıkları yerde zaman zaman aşırı yüke maruz kalmaları gösterilmektedir. Bazı dönüştürücüler, aşırı bir yükleme anında mekanik durdurucunun devreye gireceği şekilde tasarlanmaktadır. Bazı modeller de ise, yay elemanını içinde taşıyan gövde aşırı yüklemeyi kendi üzerine alacak şekilde yapılmaktadır. Ancak genel bir kural olarak ticari tür kuvvet dönüştürücüler, nominal yük kapasitelerinin % 150-200'ü kadar bir aşırı yüke karşı hasarsız dayanabilme, % 300-500'ü kadar bir aşırı yüklemeye ise kalıcı şekil değişiminin gözlemlendiği yani hasar başlangıcı olacak şekilde boyutlandırılmaktadır (Measurements Group Yayını, 1988).

2.3.1.8. Yay elemanı üzerinde dirençli uzama ölçerlerin rahat yapıştırılabilecek şekilde ve gövdenin kolay imal edilebilecek şekilde tasarlanması

Pazar koşullarında rekabet edilebilmesi için kuvvet dönüştürücülerin uygun bir fiyata üretilip pazara sunulması gerekir. Bunun bir yolu da en büyük maliyete sahip olan işçilik giderlerini olabildiğince düşürmektir. Eğer tasarımı gerçekleşen kuvvet dönüştürücü karmaşık bir yapıya sahip ise, hem imalat hem de dirençli uzama ölçer yapıştırma işçiliği çok artacak ve bu da işçilik zamanını arttıracaktır. Bir

dönüştürücünün gerektirdiği kalitede dirençli uzama ölçerin yapıştırılması, bir dirençli uzama ölçerin fiyatından çok daha pahalıdır. Bu nedenle yay elemanı tasarlanırken sürekli olarak dirençli uzama ölçerin en rahat şekilde yapıştırılabileceği şekilde tasarlanmalıdır. Hızlı ve kolay dirençli uzama ölçer uygulamalarının olanaklı olduğu düzgün ve dış yüzeyli yay elemanlar en cazip olanlardır. Diğer koşullar izin verdiği sürece yüzey hazırlıkları, yapıştırıcı uygulanması, dirençli uzama ölçer uygulaması, sıkıştırma, fırınlama, kablo bağlantılarının yapılması gibi işlemlerin gerçekleştirilebilmesine olanak verecek şekilde olmalıdır. Bu nedenlerden dolayı, kolon türü dönüştürücüler bu özelliğe sahip en ideal elemanlardan birisidir (Measurements Group Yayını, 1988 - Özbay, 1997).

2.3.1.9. Sıcaklığın etkisi

İlk bakışta optimum bir yay elemanına ulaşmanın yolu yalnızca başarılı bir mekanik tasarıma bağlıymış gibi gözükebilir. Ancak, gerçekte durum böyle olmayıp sıcaklıktan kaynaklanan etkiler de titizlikle değerlendirilmeli ve mekanik koşullarla birlikte ele alınmalıdır. İlk olarak, dirençli uzama ölçer bir ısı kaynağıdır ve bu ısı tüm yay elemanını etkiler. Sıcaklığın, yay elemanı ve dirençli uzama ölçer performansının her ikisi üzerindeki etkilerinin en aza indirebilmesi için yay elemanı, dirençli uzama ölçerlerin yerleşimi itibari ile simetrik olmalıdır. Buna ek olarak, bir çok kuvvet ölçme cihazı, kullanıldıkları yerlerde çok farklı sıcaklık farklarının etkisinde kalırlar. Kuvvet dönüştürücünün korunması ile yay elemanı arasındaki ısı akış yollarının dikkatle incelenmesi ön koşuldur. Özellikle, aynı köprü üzerinde yer alan ve birbirinin ardı sıra gelen iki dirençli uzama ölçer arasındaki sıcaklık farkının en az olacağı oluşumlar üzerinde çalışılmalıdır (Measurements Group Yayını, 1988 - Measurements Group Yayını, 1989).

2.3.2. Kolon türü tek eksenli yüklemeye zorlanan yay elemanları

Kolon türü yay elemanları genellikle silindirik bir veya daha fazla elemandan oluşmaktadır. Yay elemanı eksenel yükler için tasarlanmıştır. Genellikle en az dört adet dirençli uzama ölçer ile tam köprü devresi oluşturacak şekilde bağlanırlar. Bunlardan iki tanesi eksenel yöndeki şekil değişimini hissetmek üzere boyuna, diğer ikisi ise Poisson şekil değişimlerini hissetmek ve negatif sinyalleri oluşturmak için eksene 90° dik olacak şekilde enlemesine yerleştirilirler. Farklı tasarımlar yardımı ile

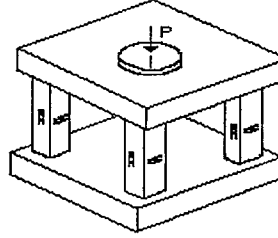
uygun şekilde tasarlanarak boyutlandırıldığında, bu tür elemanlar hem çekme hem de basma yüklemesi veya her ikisi için de kullanılabilirler (Bray, 1990 - Parlaktürk, 2000 - Measurements Group Yayını, 1988).

Yüksek doğruluğa sahip bir kuvvet dönüştürücünün elde edilmesi amaçlandığında bir çok parametrenin dikkate alınması gerekir. Örneğin, kolonun boyu kesitine oranla yeterince uzun tutularak dirençli uzama ölçerin yapıştırıldığı ölçme bölgesinde uç koşullarından etkilenmeyen düzgün bir birim şekil değişimi alanı oluşturulmalıdır. Örneğin, bu koşul normal olarak kolon boyunun, en büyük kolon kesit köşegeninden en az beş kat daha büyük olmasını gerektirmektedir (Arpacı, 1995).

Kolon türü kuvvet dönüştürücülerinin elastik bölgedeki doğrusal davranıştan sapmalar gösterdikleri üzerinde tartışılmaktadır. Doğrusal davranıştan sapma, çoğunlukla kolon elemanının kesit alanında yük altındaki deformasyonla oluşan değişimine dayandırılmaktadır. Bilindiği üzere, elastiklik modülü, çekme gerilmesi ile azalma, basma gerilmesi ile artma eğilimindedir (Bergqvist, 1986 - Measurements Group Yayını, 1988). Her ne kadar elastiklik modülündeki bu küçük değişimler, sıradan malzeme özelliklerinin analizi için son derece küçük olmasına karşın dirençli uzama ölçerli dönüştürücülerde aranan hassasiyet için önemli olabilmektedir. Elastiklik modülündeki değişimler üzerine daha kesin bilgilere ulaşılmamışken, en azından alan değişiminin neden olduğu doğrusallıktan sapma belirlenebilir. Dairesel kesitli bir kolon elemanı ele alındığında, kolondaki her bir 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'lik boylamasına birim şekil değişimi için alan değişiminden kaynaklanan doğrusallıktan sapmanın, yaklaşık olarak % 0.003 olduğu hesaplanmaktadır (Measurements Group Yayını, 1988).

Kolon türü yay elemanının doğrusallıktan sapma hatası incelendiğinde, bunun tam köprü devresini oluşturan dört dirençli uzama ölçerin aynı derecede etkin olmamasından kaynaklandığı görülmektedir. Bu hata, köprü devresinin bir bacağındaki direnç değişimi, kendisini takip eden dirençte aynı miktarda ve ters yönde olmadığı zaman derhal ortaya çıkmaktadır. Kolon türü bir yay elemanında da yük eksenine yapıştırılmış olan dirençli uzama ölçerler ile Poisson eksenine yapıştırılmış dirençli uzama ölçerlerin sinyalleri arasında yaklaşık 0.3 oranı olduğu için köprü çıkış sinyali daima doğrusallıktan sapma gösterecektir. Her türlü kuvvet

dönüştürücüsüne uygulanmak üzere geliştirilen bir teknik ile dönüştürücünün doğrusallıktan sapması kompanse edilebilmektedir. Uygulanan bu teknik ile yay elemanı üzerine ek bir dirençli uzama ölçer yapıştırılmakta ve tam köprü devresi yerine enerji kaynağı ile köprü devresi arasına seri bağlanmaktadır. Böylece bu dirençli uzama ölçer, doğrusallıktan sapma hatasını azaltacak yönde köprü besleme gerilimini ayarlamak için geri besleme olarak görev yapar (Measurements Group Yayını, 1988).



Şekil 2.7. Dört adet kolon türü yay elemanı olan dönüştürücü

Her ne kadar kolon türü yay elemanları genellikle enine yönde küçük boyutlu iseler de büyük kapasiteler için çok uzun ve ağır yapıda da olabilmektedirler. Küçük boyutlu ve yüksek kapasiteli kolon türü bir yay elemanı elde etmek için uygulanabilecek bir yaklaşım, yükün dört veya daha fazla sayıda her birini üzerinde kendi dirençli uzama ölçerleri bulunan küçük kolonlar tarafından taşınması şeklindedir (Şekil 2.7). Tüm bu kolonlarda birbirlerine karşılık gelen dirençli uzama ölçerler uygun köprü bacaklarıyla seri bağlanarak sonuçta küçük ebatlı ve aynı zamanda da eksen dışı yüklere karşı daha az hassas bir yay elemanıdır.

Kolon türü yay elemanı içi boş olarakta üretilebilir. Aynı net kesit alanı için (dolayısı ile tek eksenli yüklemde aynı esneklik için) içi boş silindirler daha büyük atalet momentine sahip olduklarından eğilme momentine karşı daha dayanıklıdır (Perry, 1962).

2.3.3. Yay elemanından istenen malzeme özellikleri

Daha önce de bahsedildiği gibi, dirençli uzama ölçer bir kuvvet dönüştürücüsünün en kritik mekanik parçası yay elemanıdır. Yüke reaksiyon gösteren eleman çok yüksek nitelikteki yayların özelliklerini göstermek zorunda olduğu için, çoğu zaman oluşumundan bağımsız şekilde “yay” olarak adlandırılır. Bir dönüştürücü yay malzemesinin, kuvvet-deformasyon ilişkisinde, yüksek doğrusallık,

düşük histerisiz ve küçük sürünme olarak beklenen özellikler dışında, onları konvansiyonel yaylardan ayıran temel özellik; deformasyon miktarıdır. Sıradan bir yay, yük altında oldukça büyük deformasyonlar verir. Oysa tipik bir dönüştürücü yay elemanının elastik deformasyonu, dönüştürücünün boyutları ne olursa olsun, yalnızca 0.1 mm mertebelerindedir. Bu nedenle, dönüştürücü elemanları çok düşük esnekliğe ve yüksek hassasiyete sahip özel yaylardır.

Dönüştürücü yay elemanı bir çok açıdan hassas bir yay gibi davranış göstermesine karşın, dirençli uzama ölçerlerin yerleştirileceği alanda, birim şekil değişiminin yeterince büyük ve düzgün olduğu yüzeylere sahip fiziksel yapıya sahip olmak zorundadır. Genellikle dönüştürücünün toplam elastik deformasyonunun en aza indirilmesi gerektiğinden; dirençli uzama ölçerlerin yapıştırıldığı alan hariç; tüm yapı içinde gerilme seviyesini olabilen en düşük seviyeye indirebilmek amacıyla yay elemanı tasarımına özen gösterilmektedir.

Yay elemanının deformasyonunun en aza indirilmesinin esas nedeni, daha önce açıklanmış olan dönüştürücünün doğal frekansının en yüksek olması içindir. Bir diğer neden ise yükleme anında yükü ileten ve yükü taşıyan tüm konstrüksiyonun yay ile seri bağlanmış olmasıdır (Parlaktürk, 2000 - Measurements Group Yayını, 1988).

Ayrıca, dönüştürücü yay elemanının seçiminde büyük özen gösterilmesi gerekli diğer bir konuda, malzeme özelliklerinin imal edilecek olan dönüştürücünün performansını ve maliyetini doğrudan etkilemesidir. Bu seçim işlemi, mekanik özellikler, ısıl özellikler ve imalat özellikleri olarak üç aşamalı değerlendirilecektir.

2.3.3.1. Mekanik özellikler

Bir dönüştürücü çıkış sinyalinin doğrusallıktan sapması, malzeme davranışının yanında başka nedenlere de bağlı olabilmektedir. Ancak, en yüksek doğruluğa ulaşabilmek için öncelikle mekanik açıdan doğrusal özelliklere sahip bir yay elemanı malzemesi ile tasarıma başlanmalıdır. Dönüştürücü doğruluğunun belirlenmesindeki en önemli mekanik özelliklerden birisi malzemenin elastik alandaki doğrusallığıdır. İdeal olarak, dönüştürücünün tam yük kapasitesine karşılık gelen yüke kadar olan alanda, yay malzemesinin gerilme ile birim şekil değişimi arasında tam doğrusal ilişkiye sahip olmasıdır. Ayrıca, bir çok dönüştürücü tasarımında gerilme/birim şekil

değişimi ilişkisinde eğimin çekme yönünde olduğu kadar basma yönünde de aynı olması aranan bir diğer özellik olmaktadır.

Yay malzemesi, çalışılan tüm gerilme aralığı boyunca tam elastik davranış göstermeli ve histerisizi çok düşük olmalıdır. Böylelikle, her hangi bir ölçüm serisinde, hem artan hem de azalan ölçümler yapıldığında aynı gerilme için aynı birim şekil değişimi elde edilmelidir. Benzer şekilde, belirli bir yük uygulanıp zamanla sabit tutulduğunda, şekil değişimi de zamanla sabit kalabilmelidir. Bir başka deyişle, malzeme sürünme göstermemeli veya bu özelliği olabildiğince düşük olmalıdır. Bir diğer seçim kriteri ise ele alınan mekanik özelliklerin tekrarlı yüklemelerde zamanla kendisini tekrarlayabilmesidir.

Metallerin akma mukavemeti ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini veren tablolar, yay elemanı olarak kullanılacak olan malzemelerin performansının belirlenmesinde doğrudan kullanılamazlar. Bu tablolarda verilen değerler en çok yükleme altında dönüştürücüde oluşan şekil değişimi seviyesinin çok ötesindeki değerler için geçerlidir. Özellikle, aşırı yükleme sırasında göstereceği davranış ele alındığında, yay elemanı malzemesinin yapısal özellikleri çok önem taşıyabilmektedir. Kuvvet dönüştürücülerinin, belirli bir hasar oluşmadan önce tam kapasitesinin üzerindeki yüklere de dayanması istenmektedir. Bu tür beklentiler akma mukavemeti ve ilgili özelliklerin titizlikle değerlendirilmesini gerektirir. Eğer öngörülen aşırı yükleme altında herhangi bir hasar oluşumu engellenmek isteniyorsa; malzeme, dişli bağlantılar gibi gerilme yoğunluğunun bulunduğu bölgelerde hasar oluşumunu önlemek için yeterince sünek ve tok olmalıdır. Bu nedenle, sertliği 50 HRC'nin üzerinde olan çeliklerin yay elemanlarında kullanımı çok nadir olup kullanımı önerilmez. Sertlik değerinin artması, yay malzemesi özelliklerinin iyileştirirken, kırılabilirliği de arttırdığı bilinmektedir.

Bir kuvvet dönüştürücüsünün çok büyük sıklıkla kullanılması öngörülmesine karşın, iyi tasarlanmış bir yay elemanında yorulma mukavemeti ikinci değerlendirme parametresi olarak yer almaktadır. Çünkü, bir uzama ölçerinin yorulmaya karşı olan hassasiyeti sınırlayıcı bir parametredir. Yay elemanında, uzama ölçerinin yerleştirildiği bölgede oluşan en büyük şekil değişimine bağlı olarak (ki bu şekil değişimi uzama ölçerinin kullanım ömrünü belirler) elemanda yorulma riski olmamalıdır.

Dönüştürücü yay elemanında özel olarak aranan elastiklik özellikleri, malzeme seçimi aşamasında elastiklik modülüne (Young modülü) özel bir önem kazandırmaktadır. Bu amaçla, yay elemanı olarak uygun olabilecek çeşitli malzemeleri yüksek veya düşük elastik modüllü malzemeler olarak sınıflandırmak uygun olacaktır. Bu malzemelerin uygulama alanlarını birbirinden ayıran kesin bir kriter olmadığından yüksek elastik modüllü malzemeler (örneğin; çelik) genel olarak büyük kapasiteli kuvvet dönüştürücüleri için, düşük elastik modüllü malzemeler (alüminyum ve demir esaslı olmayan malzemeler) ise küçük kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinde kullanılmaktadır (Measurements Group Yayını, 1988).

Ayrıca kuvvet dönüştürücüsü üzerinde dirençli uzama ölçerlerin yerleştirileceği yerlerde yeterince yüksek (1000 - 1700 $\mu\text{m/m}$) birim şekil değişimlerinin elde edilebilmesi sağlanmalıdır. Yüksek kapasiteli dönüştürücülerde boyutları uygun tasarlanmış çelik elemanlarla bu koşulları yerine getirmekte bir sorun yoktur. Ancak, kapasite düştükçe dirençli uzama ölçerlerin yerleştirildikleri kısımlarda malzeme kalınlığı azaltılarak; gerekli birim şekil değişimi seviyesine ulaşılmaktadır. Bununla beraber, dirençli uzama ölçerlerin yerleştirildikleri kısımlarda çok ince kesitlerin varlığı, dönüştürücü performansını olumsuz yönde etkileyen çeşitli etkilere yol açmaktadır.

Dirençli uzama ölçerlerin yerleştirildikleri ince kesitler, eleman içerisindeki ısı transferini olumsuz yönde etkilemektedir. Dirençli uzama ölçerlerin yerleştirildiği bölgedeki uygunsuz ince kesitlerde ısı akışı belirli bir sıcaklık farkı yaratabilir ve bu fark dirençli uzama ölçer bulunduğunda daha da büyüktür. Böyle bir durum yalnızca dirençli uzama ölçer çıkış sinyalini değil, aynı zamanda da, kesitte ısıl gerilmeler yaratarak; bölgesel bir şekil değişimi farklılığı da yaratabilir.

Düşük kapasiteli yay elemanlarında daha kalın kesitler elde etmenin en etkili yollarından birisi, alüminyum alaşımları gibi düşük elastiklik modülüne sahip malzeme kullanımınıdır (Measurements Group Yayını, 1988).

2.3.3.2. Isıl özellikler

Yay elemanının mekanik özellikleri normal çalışma koşullarında yani oda sıcaklığı olarak tanımlanan + 20°C'de geçerlidir. Bir dönüştürücünün yüksek veya

düşük sıcaklıklarda kullanılması istendiğinde, tasarımında malzemenin istenen sıcaklığındaki mekanik özellikleri mutlaka değerlendirilmelidir.

Bunların dışında, yüksek veya düşük çalışma sıcaklığı dönüştürücünün performansında doğrudan etkilidir. Örneğin, yay elemanının ısı iletim özelliği dönüştürücünün doğrusallığını ve tekrarlanabilirliğini belirleyen en önemli etkenlerden biri olarak kabul edilmektedir. Yay elemanında oluşabilecek sıcaklık farklılıkları, dönüştürücü çıkış sinyalinde düzensiz ve hatalı sonuçlara neden olabilir. Sonuç olarak yay elemanı, mekanik özellikleri kadar sahip olduğu ısı iletimi özellikleri de dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Herhangi bir tasarımda, içeriden veya dışarıdan etkiyen ısı girdilerin etkisi altında eleman içindeki sıcaklık farklılıkları, malzemenin ısıl iletkenliği ile ters orantılı olarak değişmektedir. Dolayısı ile, ısıl iletkenlik özelliği yay malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken önemli olan özelliklerdendir.

Malzemenin ısıl genişleme katsayısı, her ne kadar yaygın olarak literatürde yer alıyorsa da yay malzemesi seçiminde birinci dereceden etkin rol oynamamaktadır. Dönüştürücü çıkış sinyali üzerinde, ısıl genişlemenin birinci dereceden etkileri, köprü devresinde kendinden sıcaklık kompanzasyonlu dirençli uzama ölçerler kullanılarak ortadan kaldırılmaktadır. Dönüştürücüler üzerinde 60°C'lik bir değişim % 0.1 ila 0.2 seviyesinde bir etki yaratabilir. Dönüştürücü çıkış sinyali üzerindeki bu etkilerinin yalnızca malzemesinden mi yoksa diğer etkilere mi kaynaklandığını belirlemenin olanağı yoktur. Bu nedenle, sıcaklık değişiminden kaynaklanan tüm etkileri içeren bir düzeltmenin uygulanması gerekmektedir (Measurements Group Yayını, 1988).

Malzemelerin elastiklik modülü sıcaklık ile değişim gösterebilmektedir. Metaller için her 60°C'lik değişim için bu değerdeki azalma % 1-3 seviyesindedir (Measurements Group Yayını, 1988). Bu etki, sıcaklık yükseldikçe dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalinin de artmasına neden olur. Dönüştürücülerde kullanılmak üzere sıcaklıkla değişim göstermeyen elastiklik modülüne sahip özel alaşımlar geliştirilmiş olması da soruna tam bir çözüm getirememiştir. Bunun nedeni, dirençli uzama ölçerin k-sabitinin de sıcaklıkla değişmesi olup dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalinin doğrudan etkilenmesidir. Sıcaklıktan kaynaklanan dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalindeki değişimleri kontrol etmek amacıyla çeşitli düzeltme yöntemleri kullanılmaktadır (Technical Note, 1992 – Kaufmann, 1983).

2.3.3.3. Üretim özellikleri

Yay malzemesinin mekanik ve ısı özelliklerine ek olarak ele alınması gereken üretim özellikleri de bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi malzemenin talaşlı işlenebilme kabiliyetidir. Günümüz dönüştürücülerinin bir çoğu oldukça karmaşık şekillerde talaşlı işlenmesi gereken yay elemanlarına sahip olacak biçimde tasarlanmaktadır. Yay elemanı tercihen tek parça malzemedен işlendiğinden girintili çıkıntılı tasarımlarda hassas işleme gerektirmekte olup alaşımın işlenebilirliği, dönüştürücünün performansını ve maliyetini etkilemektedir.

Bazı dönüştürücü tasarımlarında, yay elemanının birden fazla parçadan üretilmiş olması, kaynak veya lehim yoluyla elemanların yay elemanına bağlanması gerekebilmektedir. Böyle bir durumda, malzeme özellikleri kaynak veya lehim ile bağlanan parçalardan veya çok parçalı konstrüksiyonun getirdiği olumsuz etkilerden dolayı etkilenecektir. Yay malzemesinin seçimine etkiyen bir diğer faktör de malzemenin öngörülen üretim koşullarına uygun miktar, şekil ve boyutta ticari olarak var olup olmadığıdır. Her ne kadar ikincil olarak değerlendirilse de, malzeme maliyetleri yapılacak olan seçimi etkileyebilir.

Sertleştirme işlemi sırasında herhangi bir çarpılma veya bozulmaya uğramama, bir alaşımda aranan temel üretim özelliklerinden birisidir. Yay malzemesi olmaya uygun bir çok alaşım yalnızca sertleştirilmeden önce işlenmektedir. İstenilen mekanik özelliklerin oluşması için yüksek sıcaklıkta bir ısı işlem gerekiyor ise; orijinal şekil üzerinde ciddi çarpılmalar ve bozulmalar oluşabilmektedir. Ayrıca dönüştürücü şeklinin hem kalın hem de ince kesitler içermesi durumunda önemli sorunlarla karşılaşmaktadır.

Hiç bir yay elemanı tek başına her türlü uygulama için ideal çözüm olamayacağından, mekanik, ısı ve üretim özelliklerini bir arada değerlendirerek yay malzemesi seçimi yapılmalıdır. Belirli bir uygulama için en uygun yay malzemesi, istenen özelliklere göre dönüştürücünün başarısını belirleyen kriterlerle, uygulamaya özel önceliklerin karşılıklı olarak değerlendirilmesi ile belirlenir. Buradaki sınırlamalar olarak; yük kapasitesi, şekil ve boyut, işletme koşulları, üretim miktarı ve maliyet sayılabilir (Measurements Group Yayını, 1988).

2.3.4. Yay malzemesi seçimi

Dönüştürücü yay elemanı malzemesi seçiminde kullanılmak üzere Tablo 2.2'deki verilerden yararlanılabilir. Tablodaki malzemeler yüksek elastiklik modüllü malzemeler, düşük elastiklik modüllü malzemeler ve diğerleri olmak üzere üç ana grupta toplanmıştır. Malzemelerin mekanik özellikleri, doğrusallık, histerisiz ve sürünme gibi özellikleri için 1 den 10'a kadar bağlı puanlanmış performans değerlendirilmeleri yer verilmiştir. Bu puanların yüksekliği o özelliğin istenen seviyeye yakınlığının göstergesi olarak kabul edilmektedir. Tabloda yer alan tüm değerler normal koşullar altında kullanılan malzemeler için, oda sıcaklığındaki değerleridir. Bu tablo, malzeme seçiminde bir ön eleme şeklinde kullanılmalı, ardından o malzemenin mekanik özellikleri imalatçı firmadan istenmelidir. Olanaklar ölçüsünde tüm bu veriler kontrol edilmelidir. Malzemelerin birbirlerine göre göreceli değerlendirmelerindeki puanlama daha çok imalatçı ve tasarımcıların deneyimine dayanmakta olup burada genel bir fikir vermesi amaçlanmıştır (Measurements Group Yayını, 1988).

Yüksek elastik modüllü malzemeler, genel olarak orta ve yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücü üretimlerinde kullanılan çelik malzemelerdir. AISI 4140 ve AISI 4340 düşük alaşımlı çelikler yıllardır yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinin yay elemanlarında kullanılmaktadır. Dönüştürücünün boyutlarının büyük olduğu ve sertleştirme ısıl işlemi gerektiğinde çarpılma olasılığı düşük olan bu çelikler oldukça iyi birer çözüm olarak gözükmektedir. Maraging çelikleri de bugün için kullanılmakta olan en popüler yüksek elastisite modüllü yay malzemeleri arasındadır. Günümüzde paslanmaz çelik grubundaki malzemelere giderek artan bir oranda yönelme söz konusudur. Bu grupta daha çok tercih edilen çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerdir (17-4 PH – 17-7 PH). Bunlar sertleştirilmeden önce ve sonra rahatça işlenebilir, ardından oldukça düşük sıcaklıkta uygulanan ısıl işlemler ile çok düşük çarpılma oranına sahiptirler. Bu çeliklerin oksidasyona karşı dirençleri de dönüştürücü tasarımındaki önemli üstünlüklerinden birisidir. Ancak, bu çeliklerin en önemli sakıncası düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmaları ve diğer malzemelere nispeten maliyetlerinin az miktarda yüksek olmasıdır.

Günümüzde en yaygın kullanılan düşük elastik modüllü malzemeler ısıl işlem (yaşlandırma) uygulanabilir alüminyum alaşımlarıdır. Bunlar içinde en yaygın olarak

kullanılanları 2024-T6 ve 2024-T351 kodlu alüminyum alaşımlardır. Ancak, tümü içinde en iyi özelliklere 190°C civarında yaşlandırılan 2024-T81 kodlu alaşımın sahip olduğu görülmektedir. Toplam performans değerlendirildiğinde Be-Cu alaşımı düşük elastik modüllü malzemeler içinde en iyi performansı vermektedir. Malzemenin pahalı olması yanında, işlenirken de sıcaklığın Berilyum üzerindeki olumsuz etkileri olacağı düşünülerek gerekli önlemler alınmalıdır. Çeşitli, titanyum alaşımlarının da yay malzemesi olarak iyi sonuç vermesine karşın, fiyatlarının yüksekliği ve ısıl işlemden sonra belirgin çarpılmaların oluşması en büyük sakıncalarıdır. Ayrıca, olumlu özellikleri de çok düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmaları nedeniyle bir anda önemini yitirebilmektedir.

Diğer malzeme grubunda yer alan Mg alaşımları, düşük elastisite modüllü uygulamalar için kullanılabilir. Ancak, şu an için mevcut Mg-alaşımları, çok zayıf yay malzemesi özelliği göstermeleri ve mekanik özelliklerinin zamanla değişmesi nedeniyle nadiren kullanım alanı bulmaktadır. 18-8 kodlu ostenitik paslanmaz çelik (AISI 304) çok iyi oksidasyon direncine sahip olmasına karşın ısıl işlemlerle sertleştirilemediğinden dolayı sınırlı olarak kullanılmaktadır. Ni-Span-C alaşımı özellikle hassas yaylar için geliştirilmiştir. Uygun bir ısıl işlemle elastisite modülü geniş bir sıcaklık aralığında değişmez duruma gelebilmektedir. Ancak, bu özelliğin dirençli uzama ölçer uygulamalarında çok büyük önemi yoktur. İlk değerlendirmede mekanik özellikleri açısından iyi bir yay malzemesi gibi gözükse de yüksek maliyet ve işlenme güçlükleri nedeniyle pek tercih edilmemektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, her ne kadar yapılarındaki plastik matris zamana bağlı bazı değişimler oluştursa da; günümüz uygulamalarında her geçen gün daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Bu alanda elde edilen gelişmeler kompozit malzemelerin başlangıçta küçük kuvvet dönüştürücülerinin düşük ve orta sınıf doğruluğuna sahip olanları için kullanılacakları yönündedir.

Tablo 2.2. Kuvvet dönüştürücü yay elemanları için malzeme seçim tablosu (Measurements Group Yayını, 1988)

Kuvvet Dönüştürücü Yay Elemanı için Malzeme Seçim Tablosu																	
MALZEME	Özellikler										Karşılaştırma tablosu			Kullanımı			
	Elastisite Modülü GPa	Akma dayanımı (% 0,2), Mpa	Isıl Genleşme ppm/°C	Yoğunluk, g/cm ³	En yüksek kullanım sıcaklığı, °C	Isıl İletkenliği, Watt/m °C	Kopma uzaması, %	Rockwell C sertliği (Aksi) (HRC)	Isıl İletkenliği belirtilmemişse)	Doğrusallık	Histerisiz	Sürtme	Maliyet		İşlenebilirlik	Sertleşmede garpılma	Korzyon dayanımı	Kaynak ve lehim uygunluk
a) Yüksek Elastik Modüllü Malzemeler																	
AISI 4140 Çeliği	207	1380	11,7	7,84	204	38,9	12	42-45	3	8	7	9	5	3	1	5	İyidir ve yaygın kullanılır
AISI 4340 Çeliği	207	1449	11,3	7,84	260	37,4	12	43-46	3	8	8	8	5	3	1	5	Çok iyidir ve yaygın kullanılır
18 Ni (250) maraging çelik	186	1691	10,1	8,01	316	20,2	7-10	48-49	2	8	7	4	5	8	2	8	İyidir fakat nadir kullanılır
410 paslanmaz çelik	200	966	10,8	7,76	204	24,5	15	39	2	7	6	7	4	2	6	2	Nadir kullanılır
630 paslanmaz (17-4 PH) çelik	197	1277	10,8	7,76	204	19,4	14	41-44	2	7	7	6	6	8	7	7	Yaygın kullanılır
631 paslanmaz (17-7 PH) çelik	200	1518	10,3	7,65	204	18,7	6-7	46-48	2	8	7	6	6	8	7	7	Yaygın kullanılır
632 paslanmaz (15-7 PH Mo) çelik	200	1518	9,0	7,67	260	15,8	6	47	2	8	8	4	6	8	7	7	Çok iyidir fakat nadir kullanılır
S15500 paslanmaz (15-5 PH) çelik	197	1277	10,8	7,76	204	19,4	14	41-44	2	7	7	6	6	8	7	7	630 çeliğinin gelişmişidir
b) Düşük Elastik Modüllü Malzemeler																	
2014-T6 alüminyum alaşımı	73	414	22,3	2,80	93	155	10	B 135	8	6	7	5	8	9	3	3	İyidir
2024-T4/T351 alüminyum alaşımı	73	317	22,7	2,80	93	121	18	B 120	7	6	7	5	8	9	3	3	İyidir ve yaygın kullanılır
2024-T81 alüminyum alaşımı	73	449	22,7	2,80	121	150	8	B 128	8	7	8	5	8	9	3	3	Al. Alaşımını içinde en iyisidir
6061-T6 alüminyum alaşımı	69	276	23,2	2,71	66	167	14	B 95	8	5	4	6	7	8	4	5	Düşük performans gösterir
7075-T6 alüminyum alaşımı	72	483	23,2	2,80	38	121	10	B 150	7	7	6	5	8	8	3	2	Yüksek sıcaklıkta kullanılmaz
BeCu (C 17200) alaşımı	117	1173	16,7	8,25	121	108	2-3	40-42	7	8	8	2	5	9	3	4	Çok iyidir fakat ekonomik değildir
Ti-6Al-4V Titanyum alaşımı	114	1139	8,82	4,43	149	7,2	12	40	1	7	7	2	3	2	8	4	Özel uygulamalar içindir
c) Diğer Malzemeler																	
AISI 304 paslanmaz çelik (18-8)	193	1035	17,3	8,14	121	15,8	4-5	39	2	5	4	7	3	(C)	8	5	Nadir kullanılır
Ni-Span-C alaşımı*	193	1242	7,7	8,14	121	13	9	37-38	1	8	8	3	3	4	3	5	Çok iyi fakat pahalıdır
AZ31B magnezyum alaşımı	45	221	26,1	1,77	38	93,6	15	B 73	6	3	2	6	8	(C)	1	7	Çok zayıf bir malzemedir
Seramik, Al ₂ O ₃	380	450	5,9	3,91	260	37,4	(A)	Mohs:9	3	7	8	8	1-3	(C)	10	-	Özel uygulamalar içindir
Epoksi- cam laminat	34-48	480-	9,0 -	1,66 -	38	0,29	-	0	0	5	4	3	5	(C)	4	-	Özel ve düşük doğruluklu uygulamalar içindir.
690	14,4	1,94	93														

1- Karşılaştırma tablosunda 0-10 arasında verilen puanlar içinde en yüksek puan en istenen durumu göstermekte olup özellikler oda sıcaklığı için verilmiştir.

2- (A) malzemenin çok gevrek olduğunu ve (C) malzemenin ısı işleme sertleşmesini göstermektedir. Sertlik verilirken B ile gösterilenler ise Brinell sertlik değerini ifade etmektedir.

* Ni-Span-C alaşımı % 42 Ni, % 5 Cr, % 2,5 Ti alaşımı ve kalınlı Fe'den oluşmaktadır.

2.4. Kuvvet Dönüştürücü Kalibrasyonu ve Verilerin Değerlendirilmesi

Diğer tüm dünyadaki kuvvet laboratuvarlarında olduğu gibi UME Kuvvet Laboratuvarında da, çeşitli kapasitelerdeki kuvvet standardı makinaları kullanılarak, endüstri ve çeşitli kuruluşlardan gelen kuvvet ölçme cihazları Avrupa Birliği ülkeleri tarafından kullanılan EN 10002-3 standardına göre belirlenmiş olan prosedüre göre kalibre edilmektedir (Fank, 1995b). Bu çalışma kapsamında üretilmiş olan kuvvet dönüştürücüler de, performans özellikleri olarak adlandırılan tekrarlanabilirlik, doğrusalık ve histerisiz hatalarının belirlenmesi amacıyla bu kalibrasyon yöntemi kullanılarak ölçülüp değerlendirilmiştir.

Bu standard, kuvvet dönüştürücülerinin sürünme hatası ile ilgili bir ölçüm ve değerlendirmeyi kapsamamaktadır. Sürünme hatası, özellikle yasal metroloji kapsamı içinde kullanılan (teraziler, kantarlar vs.) ve yük hücresi olarak adlandırılan kuvvet dönüştürücüler için önemli bir parametredir. Amerikan Standard ve Teknoloji Enstitüsü'nde (NIST) kuvvet dönüştürücülerin sürünme hataları ile ilgili yapılan bir çalışmaya dayanılarak deneyler ve değerlendirmeler yapılabilmektedir (Bartel, 1997). Bu çalışma kapsamında üretilen kuvvet dönüştürücülerin sürünme davranışları, NIST'te yapılan sürünme hesaplarına göre değerlendirilmiş ve kuvvet dönüştürücüler için performans kriteri olarak kabul edilmiştir.

2.4.1. Kalibrasyon yöntemi

Küreselleşen dünyada ölçmenin mutlak gerekliliğinin yanında en temel koşul olan ölçümlerin karşılaştırılabilirliği koşulunu sağlamak amacıyla "Euro Norms"(EN) olarak tüm dillerde ifade edilen Avrupa Standardları geliştirilmiştir. Bu kapsamda tek eksenli deney makinalarının statik olarak doğruluklarının kontrolü için kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunu düzenleyen EN 10002-3 no'lu "Tek eksenli test makinalarının doğruluklarının kontrolü için kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu" standardı Mayıs 1994'de yürürlüğe girmiştir. Türkiye Cumhuriyeti'nin de Gümrük Birliği içinde yer alması ile T.C. sınırları içinde bu normların uygulanması koşulu oluşmuştur. (EN 10002-3, 1994 – Fank, 1995a - Fank, 1995b)

Bu standardta tarif olarak, kalibrasyonun değerleri kesin olarak bilinen kuvvetlerin, yükü taşıyan elemana uygulanması ve kuvvet lme cihazının ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilen sehim-lme sisteminde verilerin kaydedilmesinden ibaret olduğu belirtilmiştir. (EN 10002-3, 1994)

Bu standartlarda kalibrasyon, değerleri kesin olarak bilinen kuvvetlerin yükü taşıyan elemana uygulanması ve kuvvet lme cihazının ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilen deformasyon lme sisteminden okunan verilerin kaydedilmesi olarak tarif edilmektedir.

Kalibrasyonda dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri tüm dataların aynı koşullarda alınmasıdır. Ancak bu şekilde kalibrasyon verilerinin karşılaştırması ve değerlendirilmesi yapılabilir. Kalibrasyonda birbirini izleyen iki yükleme arasındaki zaman aralığı, olabildiğince düzgün olmalı ve kuvvet değişiminin başlangıcından itibaren minimum 30 saniye geçmeden gösterge değeri alınmamalıdır. Kalibrasyon, $\pm 1^\circ\text{C}$ kararlılığı olan bir sıcaklıkta gerçekleştirilmeli, bu sıcaklık 18 ila 28°C aralığında olmalı ve kaydedilmelidir (EN 10002-3, 1994). Kuvvet lme cihazının kararlı bir sıcaklığa ulaşması için yeterli zaman geçmelidir. Dirençli uzama ölçerli dönüştürücüler, kalibrasyon öncesinde 30 dakikadan az olmamak kaydıyla, enerji kaynağına bağlanmalıdır.

Kalibrasyon işlemine başlanmadan, ilk üretimden sonra her kuvvet dönüştürücünün aşırı yükleme olarak tanımlanan % 110 kapasite ile en az bir kez yüklenmesi önerilmektedir (EN 10002-3, 1994). Bu nedenle çalışmada ölçümlere başlanmadan önce her bir kuvvet dönüştürücü 110 kN kapasite ile yüklenmiştir. Kalibrasyonun başlangıcında basamaklı şekilde kuvvetler uygulanmadan önce, her bir kuvvet dönüştürücüye tam kapasite değeri olan 100 kN'luk maksimum kuvvet çekme yönünde üç defa uygulanır. Bu kuvvetlere n yk adı verilir ve her bir n yükün uygulanma süresinin bir dakika olarak alınması önerilir. Bu işlemden sonra kalibrasyon işleminde, lme cihazına artan değerlerde iki seri kuvvet değerleri cihaza uygun şekilde uygulanır. Ardından, iki ek seri artan ve azalan kuvvet değeri de uygulanmaktadır. Her bir ek kuvvet serisi arasında, lme cihazı kendi ekseni etrafında, 360° 'ye eşit olarak dağıtılmış 2 farklı konuma (0° , 120° , 240° aı ile) döndürülmektedir (EN 10002-3, 1994). Bu alışma kapsamında yalnızca

malzemeden kaynaklanan etkiler incelendiği için dönümden kaynaklanabilecek hataların belirlenmesine yönelik dönümlü ölçümlerden yararlanılmamış olup her bir dönüştürücüye iki seri artan-azalan yönde kuvvet değerleri uygulanmıştır.

Doğrusallık hatasının analizinde kullanılacak doğrusallık (enterpolasyon) eğrisinin belirlenebilmesi için kuvvet basamak sayısının en az sekiz olması ve bu kuvvetler kalibrasyon bölgesi üzerinde olabildiğince düzgün bir şekilde dağılmış olması koşulu aranmaktadır. Yapılan ölçümlerde kapasitenin % 10'u aralığındaki artışlarla 10 basamakta kuvvet uygulaması yapılmıştır (EN 10002-3, 1994).

Yüklemeler arasında, yüksüz duruma karşılık gelen gösterge değerleri, sıfır yüke dönülmesinin ardından en az 30 saniye bekledikten sonra kaydedilmekte olup ölçümler sırasında bu süre yük uygulama süresi kadar (30 sn) alınmıştır. Elektrikli kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonuna başlanmadan önce sıfır sinyali de kaydedilmektedir.

Sürünme ölçümleri sırasında kuvvet dönüştürücülere 100 kN'luk ön yük uygulanıp yük kaldırıldıktan sonra 5 dakika beklenmiş ve bu bekleme sonunda, tam yük değeri olan 100 kN kuvvet uygulanarak 20 dakika boyunca belirli zaman dilimleri içinde ölçüm değerleri kaydedilmiştir.

2.4.2. Kuvvet ölçme cihazlarının performansının değerlendirilmesi

Kuvvet dönüştürücüler ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasında yukarıda tarif edilen prosedüre göre çeşitli kuvvet adımları ile yüklenerek ölçüm verileri alınmaktadır. Kuvvet dönüştürücülerin performans kriteri olarak belirlenen tüm hataları, EN 10002-3 standardında belirtilen ve/veya literatürde verilen tanımına göre hesaplanmaktadır. Tüm hatalar için elde edilen fark değerinin tam yükteki çıkış verisine bölünmesi ile bağıl hatalar elde edilmekte olup hesaplamaların bağıl hatalar şeklinde gösterilmesi tercih edilmektedir (EN 10002-3, 1994 - Bartel, 1997).

2.4.2.1. Bağıl tekrarlanabilirlik hatası (relative repeatability error), b

Bu hata, kuvvet makinasının aynı yükleme koşullarına karşılık, kuvvet ölçme cihazından alınan tekrarlı ölçüm sonuçları olarak tanımlanmaktadır. Bu hata, her bir kalibrasyon kuvveti için (2.31) ve (2.32) no'lu bağıntılar kullanılarak kuvvet ölçme

cihaz konumunun sabit olduğu durumda hesaplanmaktadır (EN 10002-3, 1994). Yapılan ölçümlerin güvenilirliği açısından bu hatanın olabildiğince düşük olması istenir. En düşük tekrarlanabilirlik hatasına sahip kuvvet dönüştürücüler kuvvet standardı makinalarının uluslararası karşılaştırma ölçümlerinde kullanılmaktadır. Bu nedenle üreticiler bu hatayı en düşük seviyeye indirmeye çalışmaktadırlar.

$$b = \frac{|X_2 - X_1|}{\bar{X}_{ort-max}} \times 100 \quad (2.31)$$

$$\bar{X}_{ort-max} = \frac{X_{max-1} + X_{max-2}}{2} \quad (2.32)$$

b : Bağlı tekrarlanabilirlik hatası, %

X_1 : 1. serideki artan kuvvet değerlerine karşılık gelen dönüştürücü çıkışı, mV/V

X_2 : 2. serideki artan kuvvet değerlerine karşılık gelen dönüştürücü çıkışı, mV/V

X_{max-1} : 1. serideki en büyük kuvvet değerindeki kuvvet dönüştürücü çıkışı, mV/V

X_{max-2} : 2. serideki en büyük kuvvet değerindeki kuvvet dönüştürücü çıkışı, mV/V

$\bar{X}_{ort-max}$: Kuvvet dönüştürücünün maksimum yükteki çıkış değerlerinin

(X_{max-1} , X_{max-2}) ortalaması, mV/V

2.4.2.2. Bağlı doğrusallık hatası (relative interpolation error), f_c

Doğrusallık (non-linearity) hatası, lineerite veya interpolasyon hatası olarak da adlandırmakta olan bağlı doğrusallık hatası, kısaca ölçüm verilerinin en küçük kareler yöntemiyle elde edilmiş ideal kalibrasyon eğrisi ile ölçüm verileri arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Eğer bu ideal eğri birinci dereceden bir bağıntı ile ifade edilen bir düz çizgi şeklinde ise, kalibrasyon verileri ile bu çizgi arasındaki sapma veya fark doğrusallık hatasını vermektedir. Eğer ideal eğri ikinci veya üçüncü dereceden bir bağıntı olarak ifade ediliyorsa bu durumda interpolasyon hatası olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada yaygın kullanılan isim seçilerek bağlı interpolasyon hatası yerine bağlı doğrusallık hatası ifadesi kullanılmıştır.

Bu hata, kuvvet dönüştürücü çıkış değerlerini kalibrasyon kuvvetinin bir bağıntısı olarak veren birinci, ikinci veya üçüncü derece bir eşitlik kullanılarak belirlenmektedir (EN 10002-3, 1994).

$$f_c = \frac{\bar{X}_r - X_a}{\bar{X}_{ort-max}} \times 100 \quad (2.33)$$

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (2.34)$$

f_c : Bağıl doğruluk hatası, %

\bar{X}_r : 1. ve 2. serideki her bir artan kuvvet değerine karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışlarının ortalaması, mV/V

X_a : Ölçüm noktalarından geçen kalibrasyon eğrisine ait birinci, ikinci veya üçüncü derece bir eşitlik kullanılarak hesaplanan kuvvet dönüştürücü teorik değerleridir, mV/V. (Çalışmada üçüncü dereceden denklem kullanılmıştır)

2.4.2.3. Bağıl histerisiz hatası (relative hysteresis error), u

Tersinebilirlik hatası olarak da adlandırılan bu hata, kuvvet dönüştürücüde aynı yük değeri için artan ve azalan yükleme yönünde elde edilen sinyaller arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır.

Histerisiz hatası, doğruluk kontrolünün artan ve azalan kuvvetlerle yapıldığı her bir kalibrasyon sırasında belirlenmektedir. Artan ve azalan kuvvetlerde elde edilen değerler arasındaki fark, aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmakta ve histerisiz hatası elde edilmektedir (EN 10002-3, 1994).

$$u_{1-2} = \frac{X'_{1-2} - X_{1-2}}{X_{\max 1-2}} \times 100 \quad (2.35)$$

$$u_{ort} = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (2.36)$$

u : Bağıl histerisiz hatası, %

X'_{1-2} : 1. ve 2. serilerde azalan yönde uygulanan kuvvete karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışları, mV/V

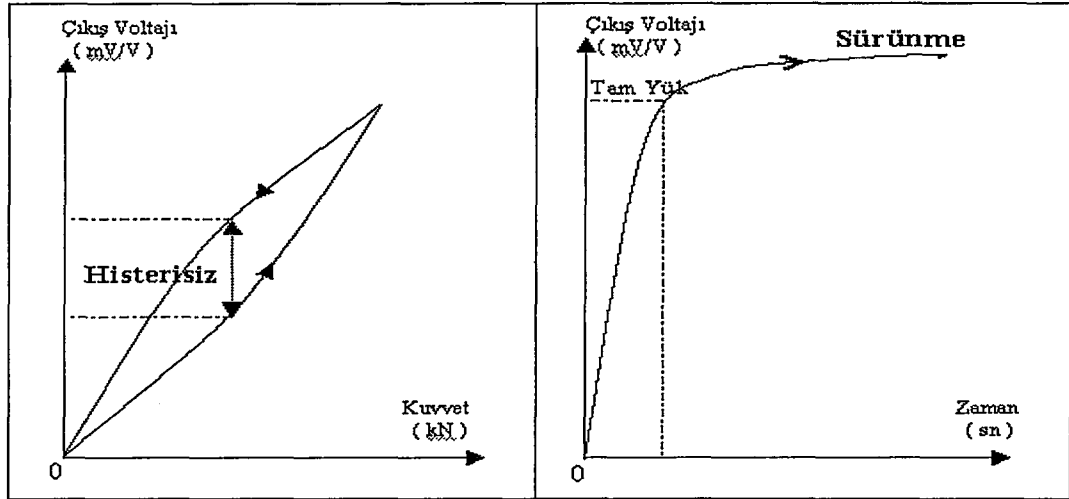
X_{1-2} : 1. ve 2. serilerde artan yönde uygulanan kuvvete karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışları, mV/V

$X_{\max 1-2}$: 1. ve 2. serilerde maksimum kuvvete karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışları, mV/V

u_1, u_2 : 1. ve 2. serideki histerisiz hatası, %

u_{ort} : 1. ve 2. serideki histerisiz hatalarının ortalaması, %

Şekil 2.8'de abartılı olarak çizilmiş olan kalibrasyon eğrisinin doğrusal olmayıp bir eğri şeklinde olduğu ve histerisiz hatasının orta noktada en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.8. Kuvvet dönüştürücülerde kuvvet karşılık çıkış voltajından elde edilen histerisiz ve sürünme eğrileri

2.4.2.4. Bağıl sürünme hatası (relative creep response), s

Kuvvet dönüştürücünün nominal kapasitesi kadar yük ile ani olarak yüklenmesi ve bu sabit yükün belirli bir süre beklenmesi veya yüklenmiş dönüştürücünün ani olarak boşaltılması sonucu, kuvvet dönüştürücünün çıkış sinyalindeki değişim veya kayma, sürünme olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.8). Sürünme cevabı olarak belirtilen bu durumu tanımlamada sürünme hatası ifadesi kullanılmıştır. Göstergeden okunan değerlere göre % olarak (2.37) bağıntısı kullanılarak bağıl sürünme hatası hesaplanmaktadır (Bartel, 1997). Tüm kuvvet dönüştürücülerin sürünme deneyi tam yük altında (100 kN) dakikada bir veri alınarak toplam 20 dakika süre için yapılmış olup, farklı ısıl işlemlerin yapıda sebep olduğu farklı sürünme davranışlarını belirleyebilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

$$s = \frac{r_n - r_{20sn}}{r_{20sn} - r_{sıfiryük}} \times 100 \quad (2.37)$$

s : sürünme hatası, %

r_n : yüklemeden sonra n. dakikada alınan kuvvet dönüştürücü çıkışı, mV/V

r_{20sn} : yüklemeden sonra 20. saniyede alınan kuvvet dönüştürücü çıkışı, mV/V

$r_{sıfiryük}$: yüklenmemiş konumda alınan kuvvet dönüştürücü çıkışı, mV/V

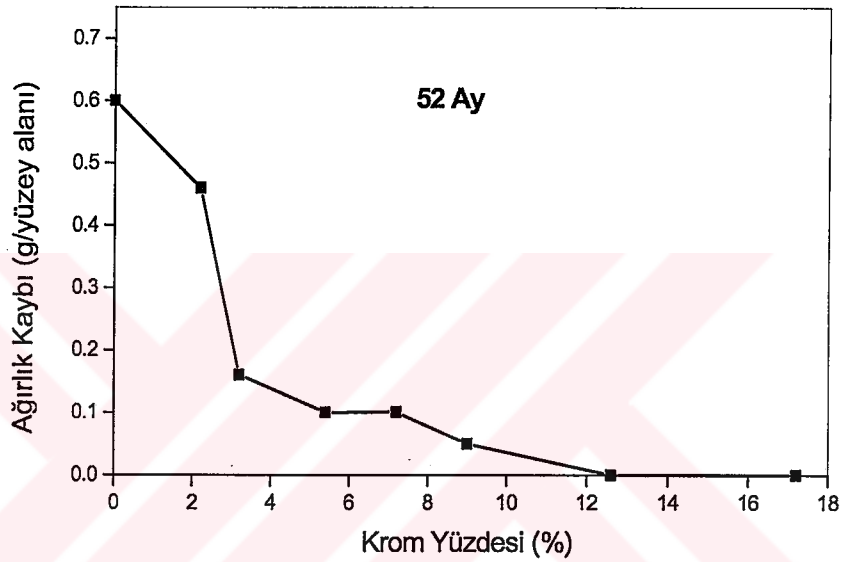
3. PASLANMAZ ÇELİKLER VE KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜ YAY ELEMANI OLARAK KULLANILAN ÇÖKELME SERTLEŞTİRMELİ PASLANMAZ ÇELİKLER

Bu bölümün birinci kısmında genel olarak paslanmaz çelikler ve farklı türleri; ikinci kısımda ise geniş bir şekilde kuvvet dönüştürücülerin üretiminde yay elemanı olarak kullanılan çökeltme sertleştirilmiş paslanmaz çelikler ve farklı türleri belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan 17-4 PH çökeltme sertleştirilmiş paslanmaz çelik malzemenin tüm özellikleri verilmiştir.

3.1. Paslanmaz Çelikler Hakkında Bilgi

Çağımızın endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri arasında yer alan paslanmaz çeliklerin her geçen gün kullanım alanlarının artmasının temel nedeni korozif ortamlarda, mekanik özelliklerini yitirmeden gösterdikleri yüksek korozyon dirençleridir (Kaluç ve Tülbentçi, 1998). Çelikte korozyon ve oksidasyona karşı mukavemeti arttıran ve katılması mutlak gereken alaşım elementi kromdur. Krom çeliği küçük taneli yapar, kritik soğuma hızını azaltarak şiddetli sertleştirici etkide bulunur. Demire az miktarda örneğin yaklaşık %5 Cr katılması bir miktar korozyon direnci sağlar, ancak çeliğin tam olarak paslanmazlık özelliklerine sahip olabilmesi için bileşiminde en az %12 Cr içermek zorundadır (Şekil 3.1). Bu sınır %10.5 Cr'a kadar inmesine rağmen yaygın olarak %12 Cr paslanmazlık sınırı bilinmektedir (Atlas steels, 2000). 2002 yılının sonlarında yayınlanan TS 2535-1 standardına göre paslanmaz çeliğin tanımı; “bu standardın amaçları bakımından, korozyona karşı dayanıklılık önde gelen bir özellik ise, en az % 10.5 Cr ve en çok %1.2 C içeren çelikler, paslanmaz çelik olarak kabul edilir.” olarak yapılmıştır. Bu standarddan önce geçerli olan yine aynı sayılı 1976 yılında yayınlanmış standardta ise paslanmaz çelik tanımı “çeşitli kimyasal etkilere karşı dayanıklı olan ve bileşiminde ağırlık olarak %11.5'tan çok krom içeren çeliktir” biçimindedir.

Klasik teorilere göre krom metal alt katmanlarını korozyondan koruyan bir oksit filmi oluşturmakla demir yüzeyini pasif hale getirir. Gerçekten, elektrokimyasal gerilim seviyesine bakıldığında krom, demirden daha az asil olan bir metaldir. Çeliğin içerdiği kromun koruyucu etkisi, krom ile oksijen arasındaki ilgiden ileri gelmektedir. Krom içeren çelikler yüzeyleri bir krom oksit tabakası ile örtülü olmadıkları sürece korozyona ve özellikle oksidasyona karşı çok hassastırlar; bu duruma “aktif” denir, buna karşın bu oksit tabakası oluşturma olanağı bulunduğunda metali korozif ortamlara karşı korur, dolayısı ile de çelikler “pasifleşmiş” olur.



Şekil 3.1. Çeliğin atmosferik korozyonu üzerine kromun etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1998)

Pasivitenin sınırları ile derecesi ortamın aktivitesi ile paslanmaz çeliğin tür ve bileşimine bağlıdır. Koşulların uygun olduğu durumlarda pasivite kalıcıdır ve paslanmaz çelik çok yavaş bir korozyon hızına sahiptir.

Bu pasif film yok olduğunda ve yeniden oluşturulması için gerekli koşulların bulunmaması durumunda paslanmaz çelik normal karbonlu ve az alaşımli çelikler gibi korozyona uğrayabilir. İşte bu koruyucu filmi oluşturmak için paslanmaz çelik oksitleyici maddelerle temas etmek zorundadır.

Paslanmaz çeliğin yüzeyinde pasif bir tabakanın oluşabilmesi için mutlaka bir kimyasal işlemede gerek yoktur. Bu film, yüzeyin oksijen ile teması halinde aniden oluşur, yani pasivasyon işlemi yüzeyde bulunan serbest demirin, oksitlerin ve diğer yüzey kirlerinin uzaklaştırılması esasına dayanır. Örneğin; çelikhaneden çıkan

paslanmaz çelik genellikle nitrik asit ve florik asit karışımı bir asit banyosunda temizledikten sonra, parça hava ile temas ettiğinde üzerinde hemen pasif film tabakası oluşur.

Alaşım elementi olarak çeliğin içinde %12'yi aşan miktarda kromun bulunması, çeliği atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, nitrik asit (HNO_3) gibi oksitleyici asitlere karşı da korur. Buna karşın yalnız Cr içeren çelikler hidroklorik asit (HCl) ve sülfürik asit (H_2SO_4) gibi asitlere karşı dirençli değildirler. Bu asitler yüzeyi koruyan krom oksit tabakasını ortadan kaldırır ve dolayısıyla çelik korumasız kalır. Günümüzde redükleyici asitlere karşı da iyi bir direnç gösteren, içinde nikel, molibden gibi alaşım elementleri bulunan paslanmaz çelikler üretilmektedir. Bu tür çelikler yapılarında kromun yanısıra yüksek miktarda nikel ve molibden içerirler; bu alaşım elementleri çeliklerin mikro yapılarını etkin bir biçimde değiştirebilir, bu durum paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasına yardımcı olur.

Günümüzde uygulamada kullanılmakta olan 200'e yakın paslanmaz çelik türü bilinmektedir. Bunun yanısıra sürekli yeni alaşımlar üretilmekte ve eski alaşımlarda optimize edilerek özellikleri geliştirilmektedir. Bazı türlerde krom içeriği %30'a ulaşmakta ve bazılarında da yeni elementler katılarak değişik özellikler elde edilmekte, örneğin, talaşlı işlenebilme kolaylığı sağlanmaktadır. Örneğin; nikel ve molibden korozyon direncini; karbon, molibden, titanyum, alüminyum ve bakır mukavemet arttırıcı yönde etkimektedir; selenyum ve kükürt ise paslanmaz çeliklerin talaşlı işlenebilme kabiliyetlerini geliştirmektedir.

Paslanmaz çeliklerin tarihi ilk önce kromun alman kimyager M.H. Klaproth ve Fransız Louis Nicolas Vauguelin tarafından 1797'de Ural dağlarından gelen "crocoite" adı verilen parlak kırmızı renkli bir mineralin analizi sırasında yeni bir element olarak bulunması ile başlar. Bileşiminde %64 kurşun içeren bu cevherden bu yeni elementin ayrıştırma çalışmaları sırasında mineralin çeşitli renkleri alması üzerine kristalograf Rene-Just Haüy'ün önerisi ile, Vauguelin bu yeni elemente Yunanca renk kelimesinden türetilmiş olan "krom" adını vermiştir. St. Petersburg sarayında eczacı olarak çalışan alman kimyager Tobias Lowitz, 1798 de kuzey Ural dağlarından getirilmiş, günümüz endüstrisinde krom eldesinde kullanılan kromit'ten (FeCr_2O_4) farklı bir şey olmayan bir demir cevheri numunesinden krom elde etmiştir.

Bilim tarihçilerine göre, demir krom alaşımları ilk kez 1821 de Fransız mineralojist Pierre Berthier'in çalışmalarına konu olmuş ve bu çalışmalar sonucunda da demir krom alaşımlarının kral suyuna dirençli olduğu görülmüştür.

Michael Faraday, %3 Cr'lu çeliğin ısıtılarak oksitlenmesi sonucu sıcaklığa bağlı olarak saman renginden çeşitli renkler aldığını araştırmalarında belirtmiştir (1822).

Fe-Cr alaşımının su içinde paslanmasını 1838'de Mallet, bu alaşımlara asitlerin ve karbonun etkilerini ise 1857 de Fremy incelemiştir. R.A. Hadfield, 1892 de %16'ya kadar Cr içeren Fe-Cr alaşımlarının asitlere karşı davranışlarını incelemiştir fakat o da kendisinden önceki araştırmacılar gibi deneylerinde sülfürik asit kullanmış olduğundan bu alaşımların hangi tür asitlere karşı korozyon direnci gösterdiğini saptayamamıştır.

İlk hazırlanan alaşımların bileşiminde %1 civarında bulunan karbon (C), oksitleyici asitlere karşı alaşım pasivitesini arttırırken, galvanik etki nedeniyle redükleyici asitlerin oluşturduğu korozyon hızını da arttırmıştır. Cr ve C nun görünüşteki birbirlerine bu ters etkileri, Fe-Cr alaşımlarının üstün özelliklerinin geç anlaşılmasına neden olmuş ve bu olayın aydınlanması ise ancak krom oksitini alüminyum tozu kullanılarak Goldschmidt yöntemiyle redüklenmesi ile az karbonlu kromun 1897 de büyük miktarda elde edilmesinden sonra olanak bulmuştur. 1904 – 1906 yılları arasında Fransa'da Leon Guillet, yoğun araştırmalar sonucu bir kısmını günümüzde de kullandığımız ferritik ve ostenitik iç yapıya alaşımları laboratuvar çapında geliştirmiş ve bu alaşımları dağlamak için çok kuvvetli asitlere gerek olduğunu belirtmiştir.

1911 yılında C. Dantsizen, General Electric firmasında elektrik ampullerinde flaman olarak kullanılmak üzere %14-16 Cr içeren bir Fe-Cr alaşımını, yine aynı yıllarda İngiltere de H. Brearley Fe-Cr alaşımlarının yüksek korozyon direncinden yararlanarak çatal , kaşık, bıçak yapmak üzere %12.8 Cr içeren bir alaşım geliştirmiştir. Brearley çalışmaları sırasında bu alaşımların ısı işlem sonucu sertleşebilirliklerini gördükten sonra bunları aşınma ve karıncalanmayı (çukurcuk korozyonunu) önlemek için top namlularında kullanılabileceğini belirtmiştir. Aynı araştırmacı bu alaşımların metalografik dağlama ayraçlarına dirençleri nedeniyle bunlara "paslanmaz çelik" adını vermiştir. Bu ad, aynı yıllarda Almanya da geliştirilen ostenitik yapıya Fe-Cr-Ni alaşımlarına da verilmiştir.

Bu ostenitik alaşımların asitlere direnci bir rastlantı sonucu 1912 de E. Maurer'in B. Strauss'un yapmış olduğu alaşımların laboratuvarda asit buharlarına karşı dirençli olduklarını fark etmesi sonucu bulunmuştur. Günümüzde paslanmaz çeliklere uygulanan Strauss Korozyon Deneyini bulan araştırmacı B. Strauss, Essen'deki Krupp Laboratuvarlarının şefi, Maurer ise ilk metalurjisti idi. Aslında bu alaşımlar işleme sırasında çatladıkları için bir kenara bırakılmışlardı. Maurer bunların asitlere dayanıklı olduğunu gördükten sonra, bu alaşımlar konusunda başkalarının da deneyimlerinden yararlanarak ısıtma işlemi uygulayıp krom karbürleri çözelti haline geçirerek alaşımı sünek hale getirmeyi başardı. Uzun çalışmalar sonucunda geliştirilmiş bu alaşımın patenti alındıktan sonra 1914 yılından itibaren Krupp V2A çeliği (%20 Cr, %7 Ni, %0.25 C) adı altında endüstrinin hizmetine sunularak endüstriyel çapta ilk paslanmaz çelik üretimini gerçekleştirmiştir.

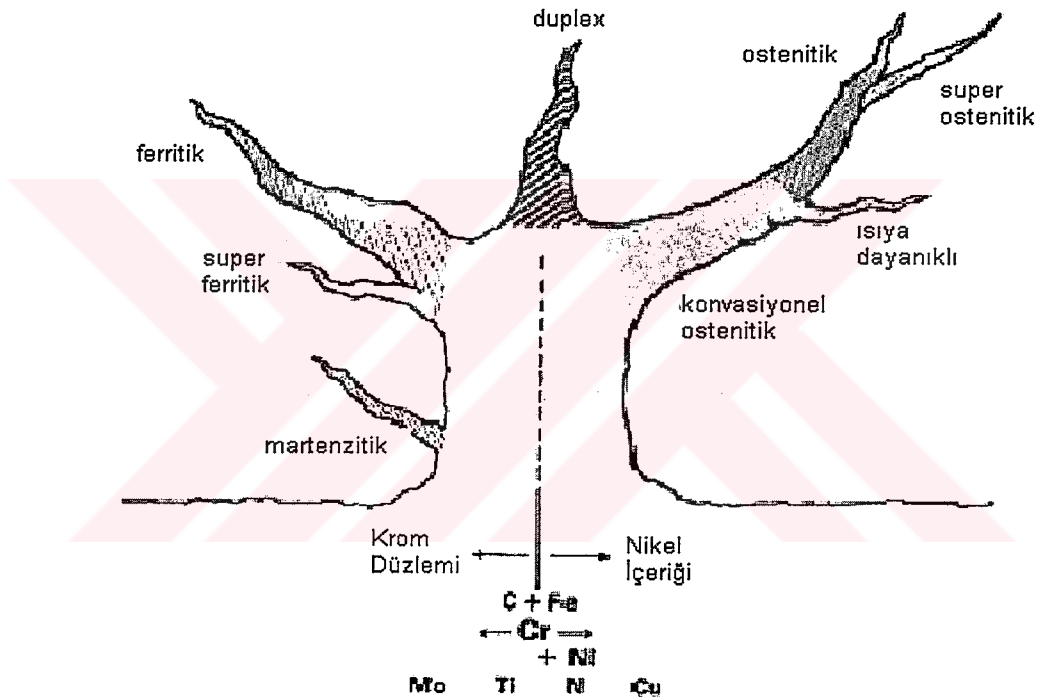
Bu çelik, o zamanlar Basf'da kurulmakta olan Fritz Haber sentetik amonyak tesislerinde kullanılmış ve bu olay, alaşımı Strauss tarafından bulunmuş Maurer tarafından özellikleri geliştirilmiş ostenitik paslanmaz çeliklerin kimya endüstrisindeki uygulamalarının ilki olmuştur.

1920'li yıllarda itibaren üretim tekniklerinin geliştirilmesi, üretim miktarlarının artması sonucu %17 Cr'lu ferritik, %18 Cr - %8 Ni içeren ostenitik paslanmaz çelikler kimya endüstrisinde geniş çapta kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde halen ostenitik paslanmaz çeliklerin üretimi, sadece Cr 'lu ferritik paslanmaz çeliklerin üretiminin iki katına yaklaşmaktadır. Özellikle İkinci Dünya Savaşı yıllarında, savaş koşulları nedeniyle ostenitik paslanmaz çelik için Ni bulunmasında karşılaşılan güçlükler, bu element yerine Mn ve N'un kullanılabilirliği konusundaki çalışmaları hızlandırmış ve bu gün AISI 200 serisi olarak tanımlanan ostenitik paslanmaz çeliklerin geliştirilmesine yol açmıştır.

İlk çift fazlı (duplex) paslanmaz çelik, 1933 yılında Fransa'da J. Holtzer Company'de %18 Cr, %9 Ni, %2.5Mo'li paslanmaz çeliğin üretilmesi sırasında yapılan bir alaşımlama hatası sonucu ostenitik matris içinde yüksek oranda ferrit içeren bir paslanmaz çeliğin ortaya çıkması ile tesadüfen bulunmuştur. Daha sonraki yıllarda bu konudaki araştırmalar devam ettirilmiş ve çeşitli patentler alınmıştır. 1930-1940 yıllarında İsveç'te ve ABD'de de duplex paslanmaz alaşımlarının geliştirilmesi ve endüstriyel üretimleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Kaluç ve Tülbentçi, 1998).

Paslanmaz çeliklerde çökeltme sertleştirmesinin temel içeriği ilk olarak 1934 yılında Foley tarafından ortaya atılmıştır (Peckner, 1977). Daha sonra yapılan çalışmalarla ilk olarak ikinci dünya savaşı yıllarında çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler geliştirilmiş ve 1946 yılında ticari olarak Stainless W ismi ile üretilmiştir.

Günümüzde ergitme ve saflaştırma teknolojilerindeki gelişmeler sonucu, asal gaz korumalı ergitme teknikleri, vakum saflaştırma teknikleri uygulanarak %0.01 den daha az karbon içeren metal dışı katkı maddelerinde arındırılmış yeni tür ferritik paslanmaz çeliklerin ve süper ostenitik (tam ostenitik) paslanmaz çeliklerin üretimi de gerçekleştirilmiştir.



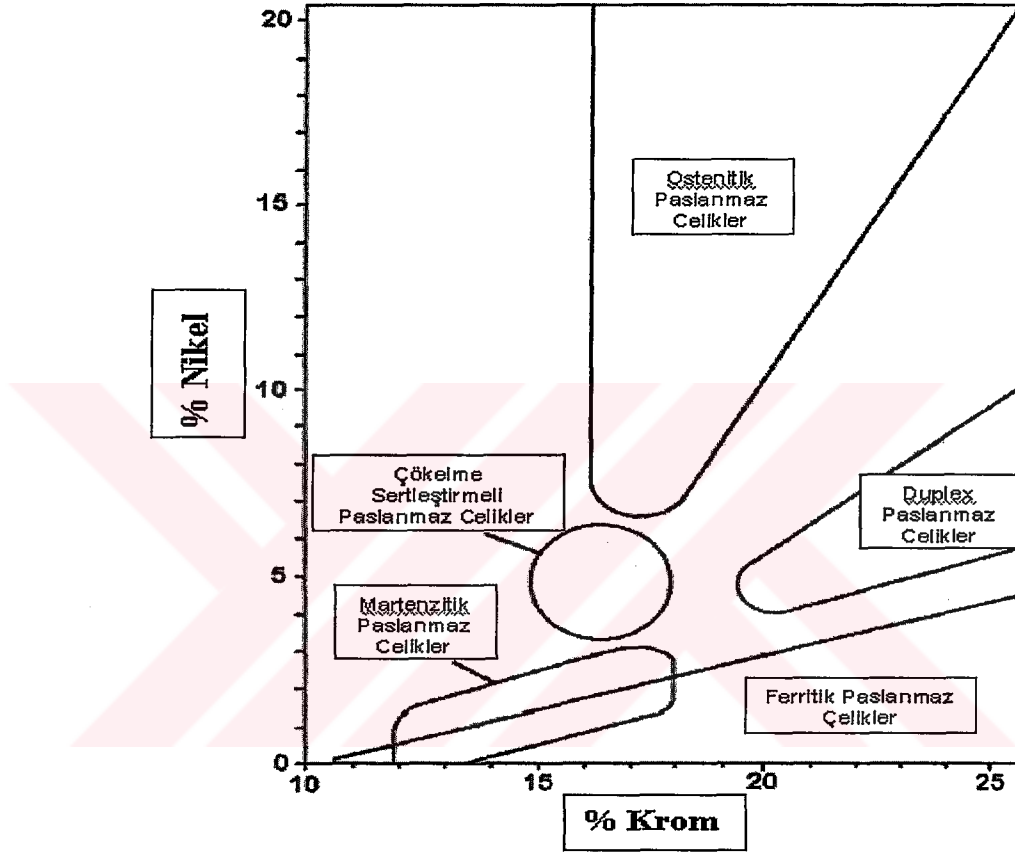
Şekil 3.2. Paslanmaz çeliklerin alaşım elementlerine göre gruplandırma şematik resmi

Gelişim süreci yukarıda açıklanmış olan bilinen yaklaşık 200'e yakın türü bulunan paslanmaz çelikler, özellikleri ve bileşimleri açısından bugünün endüstrisinde beş ana gruba ayrılırlar (Kaluç ve Tülbentçi, 1998).

- 1- Ferritik kromlu paslanmaz çelikler
- 2- Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler
- 3- Ostenitik krom nikelli paslanmaz çelikler
- 4- Çift fazlı (duplex) paslanmaz çelikler
- 5- Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler

Aslında bu ana gruplarının her birinin içinde aynı metalurjik iç yapı özelliklerine sahip ve bu geliştirilen özellikleri ile şekillendirilebilme, kaynak edilebilme ve talaşlı işlenebilme özellikleri geliştirilmiş alt grupları da vardır. Kısaca bu gruplar ve alt grupları aşağıda ele alınmıştır.

Paslanmaz çeliklerin yapılarında bulunan krom ve nikel içeriklerine göre türleri Şekil 3.2 ve 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Paslanmaz çelik gruplarının yapılarındaki Cr-Ni oranlarına göre gösterimi (şematik)

Paslanmaz çelik seçiminde kullanılmaya üzere, paslanmaz çelik grupları, temel alaşım elementi içerikleri, mekanik ve fiziksel özellikleri ve uygulama alanları kısaca Tablo 3.1 de belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Paslanmaz çeliklerin seçimi için genel rehber (Metals Handbook, 1998)

Tipi	Alaşım içeriği %	Mikroyapısı	Mekanik Özellikleri			Fiziksel karakteristikleri	Uygulama alanları
			Mukavemet (Mpa)		Uzama (%)		
			Çekme	Akma			
Ostenitik	15-27Cr, 8-35 Ni, 0-6 Mo, Cu, N	Ostenit	490 – 860	205 – 575	30 – 60	Isıl işleme sertleştirilemez, manyetik değildir	Genel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.
Ferritik	11-30 Cr, 0-4 Ni, 0-4 Mo	Ferrit	415 – 650	275 – 550	10 – 25	Isıl işleme sertleştirilemez, manyetikdir, korozyon direnci yüksektir (özellikle klorür içeren çözeltilere karşı)	Genel korozyon direnci ile gerilmeli korozyon direncinin birlikte istendiği uygulamalarda, deniz suyu uygulamalarında
Martenzitik	11-18 Cr, 0-6 Ni, 0-2 Mo	Martenzit	480 – 1000	275 – 860	14 – 30	Isıl işleme sertleştirilebilir, yüksek mukavemetlidir	Yüksek mukavemetli parçalarda, pompalar, vanalar, kağıt makineleri
Duplex	18-27 Cr, 4-7 Ni, 2-4 Mo, Cu, N	Ostenit ve ferrit	680 – 900	410 – 900	10 – 48	Isıl işleme sertleştirilemez	Tüp ve yüzey ısı değiştiricilerinde, atık su işlemlerinde ve soğutma parçalarında
Çökelme Sertleştirilmeli	12-28 Cr, 4-24 Ni, 1-5 Mo, Al, Ti, Co, Cu	Ostenit ve martenzit	895 – 1100	276 - 1000	10 – 35	Isıl işleme sertleştirilebilir, yüksek mukavemetlidir	Yüksek mukavemet, korozyon direnci ve/veya yüksek sıcaklık direnci istenen parçalarda

3.1.1. Ferritik kromlu paslanmaz çelikler

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler, keşfedilmelerini takiben ilk geliştirilen paslanmaz çelik türlerinden biri olmaları nedeni ile endüstride oldukça yaygın kullanım alanına sahiptirler. Esas olarak %16-30 Cr içerirler, manyetikler, soğuk veya sıcak haddelenebilirler. Ancak tokluk, süneklik ve korozyon dirençleri martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerden daha üstündür. Bu çeliklerin mikroyapıları normal ısı işlem koşulları altında çoğunlukla ferritik olarak kalır (HMK α demiri). Ferritik paslanmaz çelikler başlıca genel yapım malzemeleri olarak kullanılırlar. Bu yapım malzemeleri özel korozyon ve ısı direncinin istendiği malzemelerdir. Nikel içeren paslanmaz çeliklerle aynı derecede korozyon direncine sahip olmaları ve alaşım elementi olarak nikelin kullanılmaması nedeniyle bu çeliklerin maliyetlerinin düşük olması tasarım mühendisliği açısından tercih edilir bir özelliktir. Ayrıca ostenitik krom nikelli çeliklere nazaran şu üstünlüklere sahiptirler:

- Klorürlü çözeltilerde gerilmeli korozyon çatlamasına karşı daha dirençlidirler,
- Daha yüksek akma mukavemetine sahiptirler,
- Daha az şiddette soğuk şekil değiştirme sertleşmesi gösterirler,
- Manyetikleşme özelliğine sahiptirler.

Buna karşın ferritik paslanmaz çelikler sünekliklerinin azlığı, çentik hassaslıkları ve düşük kaynaklanabilirliklerinden dolayı kullanımları ostenitik paslanmaz çeliklerden daha sınırlıdır. Standard ferritik paslanmaz çeliklerin süneklik problemlerini aşmak için düşük karbon ve azot içerikli yeni ferritik paslanmaz çelikler geliştirilmiş ve ticari olarak üretilmiştir. Ayrıca bu alaşımlar iyileştirilmiş korozyon direnci ve kaynaklanabilirliğe sahiptir.

Bu tür çeliklerin ısı genleşme katsayıları, az alaşımlı çeliklerinkine yakındır; bu özellik, mimari yapılarda olduğu gibi büyük konstrüksiyonlarda sade karbonlu çelikler ile birarada kullanılmaları durumunda ısı genleşme farkının doğuracağı sorunları önler. Buna karşın, bu tür çeliklerin ısı iletkenlik katsayıları normal çeliklerin yarısı kadardır.

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler bileşimlerinde korozyon direncini sağlayacak yeterli miktarda krom veya kroma ek olarak yüksek sıcaklıklarda ostenit oluşumunu önleyici Al, Nb, Mo ve Ti gibi ferrit dengeleyici elementler içeren Fe-Cr-C alaşımlarıdır. AISI standardına göre martenzitik çelikler gibi 4XX serisi içerisinde gruplandırılan bu tür çelikler DIN 17440 ve TS 2535'e göre yüksek alaşımlı çelikler

gibi X6Cr17 (430), X10CrN28 (446),...vb. olarak simgelendirilmektedir. TS 2535, ferritik paslanmaz çelikleri "bileşiminde %11.5 ila 18 Cr, en çok %0.2 C bulunan, nikelsiz, genellikle ferritik kristal yapılu paslanmaz çeliktir. 750 °C'ye kadar manyetiktir, ısı işleme ile sertleştirilemezler." diye tanımlarken günümüzde % 30'a kadar Cr ve hatta yeni geliştirilen bazı türlerde % 4'e kadar Ni içeren ferritik paslanmaz çelikleri kapsam dışı bırakmaktadır. Bu olay TS 2535'in 1976 da hazırlanmış olmasından kaynaklanmaktadır.

3.1.2. Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler

Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler, %11.5'tan fazla krom içeren ve yüksek sıcaklıkta ostenit yapısına sahip olan ve uygun bir soğutma işlemi ile de iç yapıları oda sıcaklığında martenzitik olan paslanmaz çeliklerdir. Yukarıdaki tanım bu tür paslanmaz çeliklerin krom içeriğini sınırlamaktadır zira bu dönüşümün gerçekleşebilmesi için çeliğin bileşiminin yüksek sıcaklıkta ostenit (γ) alanı içine düşmesi gerekmektedir. Bilindiği üzere karbon, γ halkasını genişlettiğinden uygulamada çeliğin içeriğinde bulunan karbon yardımı ile %18 Cr içeren çelikte yüksek yüksek sıcaklıkta tam ostenitik yapıya dönüşebileceğinden bu gruba girmektedir. Bu tür paslanmaz çeliklerin karbon miktarı alttan %11.5, üstten de %18 ile sınırlanmıştır. Burada alt sınırı korozyon direnci, üst sınırı ise yüksek sıcaklıkta çeliğin tamamen ostenitik yapıya dönüşebilme özelliğini belirlemektedir.

AISI normuna göre 4XX serisi şeklinde gruplandırılan bu tür çelikler DIN ve TSE standardlarına göre yüksek alaşımlı çelikler grubu gibi simgelendirilerek X10Cr13, X105CrMo17, vb. tarzında işaretlenmektedir. TS 2535 paslanmaz çelikleri "çeşitli kimyasal etkilere karşı dayanıklı olan ve bileşiminde ağırlık olarak %11.5'tan çok krom içeren çeliktir" diye tanımlar iken, "martenzitik paslanmaz çelikleri, bileşiminde %11.5 – 18 Cr bulunan ve ısı işleme ile sertleşebilen martenzitik yapılu paslanmaz çeliktir" diye tanımlamaktadır.

Yüksek alaşımlı çelikler gibi sertleştirilip temperlenen bu çelikler manyetikler ve oldukça üstün mukavemet özelliklerine sahiptirler.

Piyasada su verilmiş ve temperlenmiş olarak temin edilen bu tür çeliklerin cazip çekme mukavemeti özellikleri imalatçıları bunların diğer özelliklerini gözönüne almadan dahi kullanmaya teşvik etmektedir. Martenzitik paslanmaz

çeliklerin çekme mukavemeti aynı karbon içeriğine sahip karbonlu ve az alaşımlı çeliklerden çok daha yüksektir.

Bu tür çeliklerin sertleşmiş durumda toklukları düşüktür ve genellikle uygun tokluk için bir temperleme ısıl işlemine gerek duyulur. Temperleme sıcaklığı, değişik mukavemet seviyeleri sağlamak için ayarlanabilir.

3.1.3. Ostenitik krom nikelli paslanmaz çelikler

Ostenitik krom nikelli paslanmaz çelikler % 16 – 26 Cr, %10 – 24 Ni, %0.40'a kadar C ve diğer bazı özelliklerini geliştirmek için katılmış Mo, Ti, Nb, Ta ve N gibi elementler içerirler. Son yıllarda geliştirilmiş olan tam veya süper ostenitik paslanmaz çelikler diye adlandırılan alt gruplarda ostenit yapıcı elementlerin miktarları daha da arttırılmıştır.

Ostenitik paslanmaz çeliklerde soğuma sırasında ostenit → ferrit dönüşümü olmadığından su verme yolu ile sertleştirilemezler. Antimanyetik olan bu tür paslanmaz çelikler AISI 3XX serisi içerisinde gruplandırılmalarının yanısıra DIN 17440 ve TS 2535'e göre yüksek alaşımlı çelikler halinde olduğu gibi simgelenirler. TS 2535 ostenitik paslanmaz çelikleri "bileşiminde korozyona karşı krom ve ostenitik bir yapı sağlamak amacıyla nikel bulunan, oda sıcaklığında manyetik olmayan, ısı işlemi ile sertleştirilemeyen soğuk biçimlendirilmeye elverişli paslanmaz çeliktir" diye tanımlar.

Ostenitik krom nikelli paslanmaz çeliklerin korozyon dirençleri martenzitik kromlu ve ferritik kromlu paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. İç yapının ostenitik olmasıda ferritik paslanmaz çeliklerde karşılaşılan çok önemli bir sorun olan geçiş sıcaklığının altındaki gevrekleşme bu tür çeliklerde görülmez. Gerek sıfır altı (-270 °C'ye kadar) ve gerekse yüksek sıcaklıklardaki korozyon dirençleri, mekanik özelliklerin üstünlüğü bu çelik grubunun birçok alanda rakipsiz bir yapı çeliği olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır.

En yaygın olarak karşılaşılan X5CrNi1810 (304) ostenitik paslanmaz çelik, korozyon direnci ve iyi biçimlendirilebilme kabiliyeti bakımından tercih edilmektedir. Bu tür çeliğin şekil değiştirme sertleşmesi de arttırılmış olduğundan yüksek mukavemet gerektiren makina parçalarının yapımında oldukça sık kullanılır. X2CrNi1911 (304L) çeliği, X5CrNi1810 (304) çeliğinin karbon miktarı azaltılmış

türüdür. Bunun dışında pek çok farklı bileşim ve özellikte ostenitik paslanmaz çelik bulunmaktadır.

Yüksek derecede şekil değiştirme sertleşmesinin bu tür çeliklerin çok yüksek akma ve çekme mukavemetine sahip olmalarının yanında bu yüksek akma ve çekme mukavemetlerinde dahi süneklik ve tokluklarının bir kısmını korumaları önemli bir özelliktir. Bu bakımdan ostenitik paslanmaz çelikler soğuk haddelenmiş veya çekilmiş durumunda yüksek mukavemetli ve yüksek korozyon dirençli çeliklerdir. Doğal olarak kaynak işlemi gibi bir üretim yönteminin uygulanması durumunda parçanın tümü veya bir bölümü soğuk şekil değiştirme ile kazanılmış özellikleri yitirecektir. Ancak çok iyi düşünülmüş geliştirilmiş kaynak yöntemi ve çok iyi tasarlanmış bir bağlantı ile bu tür paslanmaz çelikler rahatlıkla birleştirilmektedir. Hatta uygulamada, soğuk şekil değiştirmenin mukavemet üzerine yapmış olduğu tüm etkilerden yaralanılmaktadır. Bu konuda en iyi uygulama örnekleri soğuk şekil değiştirilmiş ostenitik paslanmaz çeliklerin kullanıldığı demiryolu taşıtları, kamyon , treyler kasaları ve özel roketlerdir.

3.1.4. Duplex (çift fazlı) paslanmaz çelikler

Duplex paslanmaz çelikler basit anlamda iki ayrı fazı bünyesinde bulundurlar: ferrit ve ostenit. Dolayısı ile, ferritik-ostenitik veya ostenitik-ferritik paslanmaz çelikler olarak tanınırlar. Ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin en iyi ortak özelliklerini taşırlar. Ferritik yapı ile mukavemet ve gerilmeli korozyon çatlama direnç, ostenitik yapı ile tokluk ve genel korozyon direnci sağlanır. Böylece iki fazlı ince taneli, yüksek mukavemetli ve iyi korozyon dirençli bir çelik ortaya çıkmaktadır.

Çift fazlı bir iç yapıya sahip, ferrit taneleri içinde ostenit veya ostenit taneleri içinde ferrit içeren bu tür çeliklerin ostenitik paslanmaz çeliklere nazaran en önemli üstünlükleri akma mukavemetlerinin iki veya üç kat daha büyük olması ve çok daha iyi korozyon dirençleridir. Endüstriyel uygulamalarda klor içeren sıvıların kullanılması, kullanılacak malzemelerin bilinen paslanmaz çelik türlerine göre arttırılmış mukavemet ve geliştirilmiş korozyon dirençlerine sahip olmalarını gerektirir. Bu ancak yukarıda belirtilen özelliklere sahip duplex paslanmaz çelikler ile sağlanabilmektedir (Kaluç ve Tülbentçi, 1998).

Duplex paslanmaz çeliklerin içeriğinde bulunan başlıca alaşım elementleri Cr, Ni, Mo ve N dur. Cr ve Mo ferriti dengelerken, Ni ve N osteniti dengeler. Bazı türlerde ise bunlara ek olarak Mn, Cu ve W bulunur.

Duplex paslanmaz çelikler günümüzde gelişmiş çelik üretim teknikleri kullanılarak üretilirler. Bu tür paslanmaz çelikler üstün özelliklerinden dolayı değişik biçim ve boyutlarda endüstrinin hizmetine sunulurlar ve de ısı eşanjörü, petrol, gaz ve deniz suyu boruları ile bağlantı elemanlarında, deniz petrol platformlarında, gaz kuyularında, taşıyıcı kaplarda, döküm pompa ve vana gövdelerinde, gemi pervanesi ve parçaları yapımında, jeotermal uygulamalarda büyük çapta kullanılmaktadırlar. Örneğin, X2CrNiMoN2253 (DIN 1.4462, UNS S31803 veya yeni UNS'e göre S39205) çeliği, çukurcuk ve aralık korozyonuna 317L kadar, gerilmeli korozyona ise 304L ve 316L'den daha dirençli olması nedeni ile kimya endüstrisinde gittikçe genişleyen bir uygulama alanına sahiptir. Ayrıca, duplex paslanmaz çeliklerin mukavemet özellikleri, ostenitik çeliklerin mukavemet özelliklerinden daha yüksektir.

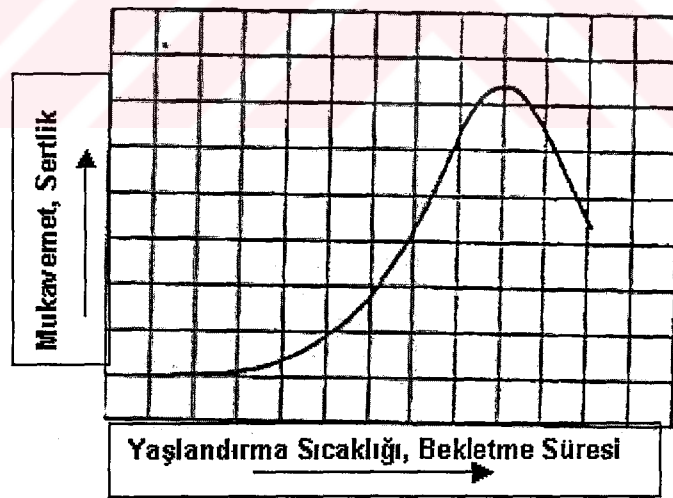
3.2. Çökeltme Sertleştirmeli Paslanmaz Çelikler

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler bakır, molibden, titanyum ve alüminyum gibi alaşım elementleri içeren, bu elementlerin bir veya birkaçının etkisi ile çökeltme sertleştirmesi gösteren Fe-Cr-Ni'li paslanmaz çelik ailesinin bir grubudur.

Çökeltme sertleştirmesi, prensip olarak alaşımı çözeltiye alma tavından sonra uygulanan soğumayı takip eden bir yaşlandırma ısı işlemidir. (Kaluç ve Tülbentçi, 1998 - MKE Seminer Notu, 1982). Yukarıda belirtilen ve çeliğin içinde bulunan alaşım elementleri, çözeltiye alma tavi sırasında çözünürler ve yaşlandırma işlemi sırasında da çok küçük (submikroskobik) zerrecikler halinde çökeltme matrisin sertlik ve mukavemetini arttırırlar. Bu işlem sonucu çelik, martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerine ve AISI 304 türü ostenitik paslanmaz çeliğin korozyon direncine sahip olabilmektedir. Bu tür çeliklerin üretimde sahip oldukları en önemli üstünlük, normalize durumlarında (solusyona alma işlemi sonrası) kolaylıkla işlenip biçimlendirildikten sonra nispeten düşük sayılan 480 – 620°C'de bir ısı işlem uygulanarak mekanik özelliklerinin geliştirilmesidir. Mukavemetleri

yaklaşık 1700 MPa'ya kadar çıkabilmekte ve böylece martenzitik paslanmaz çeliklerin mukavemetlerinin üzerindeki değerlere de ulaşabilmektedir.

Çökeltme sertleştirme mekanizması, alüminyum alaşımlarının sistemine benzerdir. Malzeme veya yapı tek fazlı bölgeye kadar ısıtılır ve içindeki çökeltme parçacıkları ergiyik durumuna gelinceye kadar beklenir, sonra iki fazlı bölgeye hızlı soğutulur. Hızlı soğuma denge halinde görülen faz ayrışmasını önler ve böylece aşırı doymuş katı erigiyik elde edilir. Daha sonra uygulanan yaşlandırma işlemi ile çok ince yapılar oluşur ve metal matris yapıyı mukavemetlendirir. Bu şekilde çökeltme fazı atomlarının matris fazı ile sürekli veya birbirini tutan (koherent) kümeler halinde toplanması durumunda maksimum mukavemet elde edilir (Perry ve Jasper, 1977). Mukavemet artışı çökeltme yapıların dislokasyon hareketlerini kısıtlayan gerilme alanlarına ve bölgesel iç yapı distorsiyonlarına neden olmalarından kaynaklanır (Onaran ve Erman, 1988). Yaşlandırma sıcaklığının ve/veya süresinin artırılması ile çökeltme kümecikleri etraftaki komşu diğer kümelerle birleşerek büyürler. Çökeltme kümeciklerindeki büyüme iki faz arasındaki yüzey ve tane sınırını kritik boyut ve şekle getirir. Bu kümeciklerin ve dislokasyon hareketlerini engelleyen bölgelerin azalması mukavemeti düşürür ve aşırı yaşlanma olarak bilinen olayı oluşturur.



Şekil 3.4. Çökeltme sertleştirme sıcaklığı ve bekleme süresinin mukavemet, sertlik üzerindeki etkileri

Bir çok metalurjik işlemde olduğu gibi çökeltme sertleşmesi de zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Artan sıcaklık ve zamanın mukavemeti düşürdüğü, nisbeten düşük sıcaklık ve zamanında mukavemeti arttırdığı yaygın olarak kabul edilir. Ancak, sıcaklık ile mukavemet arasında ilişki Şekil 3.4'te gösterildiği şekilde

olup; başlangıçta artan sıcaklıkla birlikte mukavemet artışı görülmekte, çökeltme taneciklerinin boyutları giderek büyümekte ve belirli bir tepe noktadan sonra irileşen tanecikler sebebiyle mukavemette düşme görülür.

Bu çelikler için çökeltme sertleştirme reaksiyonları oldukça karmaşıktır. Çökeltmeyi oluşturan elementler olarak bilinen alüminyum, bakır, titanyum ve bazen molibden'in tek veya bileşim halinde reaksiyonları bazı durumlar hariç tam olarak açıklanamamıştır.

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerde çökeltme sertleşmesi işleminin iki temel amacı vardır;

1. Tokluk, süneklik ve korozyon direncini arttırmak için martenzitin oluşturduğu gerilmeleri azaltılması,
2. Metallerarası bir bileşiği çökeltmek ek bir sertlik sağlamasıdır.

Paslanmaz çeliklerde çökeltme sertleştirmesinin temel içeriği ilk olarak 1934 yılında Foley tarafından ortaya atılmıştır (Peckner, 1977). Daha sonra yapılan çalışmalarla ilk olarak İkinci Dünya Savaşı yıllarında çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler geliştirilmiş ve 1946 yılında ticari olarak Stainless W ismi ile üretilmiştir.

Bu yıldan sonra birçok yeni çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik geliştirilerek uçak, uzay, savunma endüstrisinde ve sensör teknolojilerinde uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde üretilen çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler, yüksek hızlı uçakların dış yüzeylerinde, füze gövdelerinde, deniz taşıtlarında, yakıt tanklarında, uçakların iniş takımlarında, pompalarda, millerde, somun, civata, kesici aletler, kavramalarda ve hassas sensörlerde gövde malzemesi olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler ile ilgili olarak TS 2535-1 standardı "çökeltmeyle sertleşen çelikler" tanımını kullanmakta ve şunları ifade etmektedir; "Isıl işleme bu çeliklere daha büyük mekanik mukavemetin yanı sıra korozyona karşı dayanımda kazandırır. Dayanıklılık artışı, sonuncu ısıl işlem uygulaması sırasında martenzitik yapıda inter-metalik bileşiklerin (iki veya daha fazla metal veya metalik olmayan malzemelerin yaptığı bileşik) çökeltmesinden kaynaklanır. Özel ısıl işlem koşulları, mekanik özelliklerin istenen düzeyine ve üretici tarafından verilen bilgilere göre ayarlanmalıdır."

3.2.1. Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik türleri

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler, çözeltiye alma tavından sonraki işlemler sonucu çeliğin yapısal değişimine ve özelliklerine bağlı olarak üç türde gruplanmaktadır. Bunlar:

- Martenzitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler,
- Yarı ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler,
- Ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerdir.

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) standartlarında 6XX serisi içine alınan ancak literatürde bu seri yaygın kullanım alanı bulamadığı için uygulamada standard olmayan kaliteler arasında ticari simgeleri ile tanınan çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler ve kimyasal bileşimleri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler arasındaki bu gruplama ve yapısal farklılıklar, bu tür çeliklerin kaynak kabiliyetlerini ve ısıl işlemdeki davranışlarını doğrudan etkilemektedir (Kaluç ve Tülbentçi, 1998).

Tablo 3.2. Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler ve kimyasal bileşimleri

Simge	Kimyasal Bileşim ^a (%)									
	Cr	Ni	C	Mn	Si	Cu	Mo	Ti	Al	Diğer
Martenzitik Çökeltme Sertleşmeli Türler										
Stainless W ^b	16.75	6.75	0.07	0.50	0.50	-	-	0.80	0.20	-
17 - 4 PH	16.50	4.25	0.04	0.40	0.50	3.60	-	-	-	Nb + Ta 0.25
15 - 5 PH (XM - 12)	15.00	4.60	0.04	0.25	0.40	3.50	-	-	-	Nb + Ta 0.35
CROLOY 16 - 6 PH	15.75	7.50	0.03	0.80	0.45	-	-	0.60	0.40	-
CUSTOM 450 (XM - 25)	14.90	6.50	0.03	0.30	0.25	1.50	0.80	-	-	Nb + Ta 0.75
CUSTOM 455 (XM - 16)	11.75	8.50	0.03	0.20	0.20	2.25	-	1.20	-	Nb + Ta 0.30
PH 13 - 8 Mo (XM - 13)	13.00	8.00	0.04	0.05	0.05	-	2.25	-	1.00	-
ALMAR 362 (XM - 9)	14.50	6.50	0.03	0.30	0.20	-	-	0.80	-	-
IN - 735	10.00	10.00	0.02	0.10	0.10	-	2.00	0.20	0.30	-
Yarı - Ostenitik Çökeltme Sertleşmeli Türler										
17 - 7 PH	17.00	7.00	0.07	0.70	0.40	-	-	-	1.15	-
PH 15 - 7 Mo	15.00	7.00	0.07	0.70	0.40	-	2.25	-	1.15	-
AM - 350	16.50	4.25	0.10	0.75	0.35	-	2.75	-	-	N 0.10
AM - 355	15.50	4.25	0.13	0.85	0.35	-	2.75	-	-	N 0.12
PH 14 - 8 Mo ^c (XM - 24)	15.50	8.75	0.05	0.10	0.10	-	2.50	-	1.35	-
Ostenitik Çökeltme Sertleşmeli Türler										
17 - 10 P	17.0	10.50	0.12	0.75	0.50	-	-	-	-	P 0.28
HNM	18.5	9.50	0.30	3.50	0.50	-	-	-	-	P 0.25
A - 286	15.0	25.0	0.06	1.20	0.50	-	1.20	2.00	0.25	V 0.30

^a Geri kalanı demir,
^b Ferritik yapıca üstün,
^c Vakum endüksiyon fırında üretilmiş,
 Parantez içindeki simgeler ASTM'e göredir.

Tablo 3.3. Çökeltme sertleştirmeli çelikleri geliştirenler ve/veya esas üreticileri

Alaşımların İsmi*	Geliştiren ve/veya Esas Üretici	Kimyasal Bileşimi, %								
		C	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Diğer
A-286	Allegheny-Ludlum	0.05	1.45	14.75	25.25	1.30		0.15	2.15	V 0.30; B 0.005 N 0.10 N 0.12
Almar 362		0.03		14.5	6.5				0.8	
AM-350		0.10	0.75	16.5	4.25	2.75				
AM-355		0.13	0.85	15.5	4.25	2.75				
AM-736		0.02		10.0	10.0	2.0		0.3	0.2	
17-4 PH	Armco Steel	0.04	0.30	16.0	4.2		3.4			Cb 0.25 Cb 0.25 N 0.005 P 0.30
15-5 PH		0.04	0.30	15.0	4.5		3.4			
PH13-8Mo		0.04	0.03	12.7	8.2	2.2		1.1		
17-7 PH		0.07	0.50	17.0	7.1			1.2		
PH15-7Mo		0.07	0.50	15.2	7.1	2.2		1.2		
PH14-8Mo		0.04	0.02	15.1	8.2	2.2		1.2		
17-10P		0.10	0.60	17.0	11.0					
Custom 450	Carpenter Technology	0.03	0.25	15.0	6.0	0.8	1.5			Cb 0.3 Cb 0.3
Custom 455		0.03	0.25	11.75	8.5		2.5		1.2	
AFC-77	Cmcible Steel	0.15		14.5		5.0				Co 13.0, V 0.4
CD-4MCu+	Cooper Alloy	0.04		26.0	5.0		3.0			
PH55Al		0.04		20.0	8.8	4.0				
Croloy 16-6PH	Babcock & Wilcox	0.035	0.80	15.75	7.5			0.40	0.60	
Illium P+	Stainless Foundry & Eng	0.20		28.0	8.0	2.0	3.0			Co 7.0
Illium PD+		0.08		27.0	5.0	2.0				
14-6Ti	Republic Steel	0.05		14.5	6.5				0.75	
Stainless W	U.S. Steel	0.06	0.50	16.75	6.25			0.2	0.8	
Unimar CR-1	Universal Cyclops	0.01		11.5	10.25			1.15	0.3	

*Bunların dışında başka alaşımlarda geliştirilmiştir. Bu tablo yalnızca bu alaşımların ticari üretimi olanları göstermektedir.

+ Yalnızca döküm

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin gösterildiği Tablo 3.3 incelendiğinde diğer malzeme grupları gibi mukavemet, korozyon direnci ve tek bir kimyasal bileşim yerine pek çok firmanın farklı isimli ürünleri karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde giderek standardlaştırılma çalışmaları hala süregelse de bu tür çelikler firma isimleri ile alınıp satılmaktadır.

3.2.2. Yarı ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler

Yarı ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler çözeltiye alınmış yani "Durum A" ile tanımlanan ostenitik durumda temin edilirler ve yaşlandırmadan önce özel bir ısıl işlem yardımı ile ostenit martenzite dönüştürülür ve yaşlandırma uygulanır. Bu tür alaşımları üretmek için ostenit ve ferrit arasındaki dengenin çok sıkı korunması gereklidir. Ostenit ve/veya ferrit çok yüksek ise ostenit martenzite

dönüşemeyecek kadar kararlı olacaktır. Ostenit oranı çok düşükse kısmi veya tamamen martenzite dönüşüme direnç gösteren tavllanmış koşullardaki kararlı ostenit üretilemez (Erdoğan, 2000)

Yarı ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin yapıları metalurjik olarak oldukça karmaşıktır. Çözeltiye alma tavlama uygulanmış veya normalize hallerinde yapı ostenitiktir, ancak % 5-20 delta ferrit içerir. İzlenen uygun ısı işlemler sonucunda da ferrit dönüşmeden yapıda kalabilir. Martenzitik çökeltme sertleştirmeli türler ile karşılaştırıldıklarında normalize hallerinde rahatlıkla soğuk şekil değiştirebilecek derecede yumuşak ve sünektirler. Tavlama sıcaklığından itibaren oda sıcaklığına hızlı soğutulduklarında ostenitik iç yapılarını koruduklarından soğuk biçimlendirme işlemleri için uygun tokluk ve sünekliğe sahiptirler. Bu tür çeliklerin Ms sıcaklıkları, bileşimine ve tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak oda sıcaklığının oldukça altında bir bölgede değişir. Sertlik ve mukavemetin artması için bu ostenitik yapının martenzitik yapıya dönüşmesi gereklidir. Bu amaç için, üç yöntem uygulanabilir. Çelik, çökeltme sertleştirmesi ısı işlemine tabi tutulmadan;

- 650 – 880°C sıcaklık aralığına ısıtılıp karbürlerin ve diğer bileşiklerin çökeltmesi sağlanır. Osteniti kararlı hale getiren elementlerin çökeltme ile ayrışması sonucu, çelik oda sıcaklığına soğutulduğunda ostenit → martenzite dönüşür.
- Çelik, -73°C gibi Ms sıcaklığının çok altında bir sıcaklığa kadar soğutulmuş olarak dönüşüm sağlanır.
- Çeliğe, ostenit martenzit dönüşümü sağlayacak biçimde soğuk şekil değiştirme uygulanır.

Martenzitik dönüşüm sağlandıktan sonra bu tür çeliklere 450 – 600°C arasında bir yaşlandırma ısı işlemi uygulanarak çökeltme sertleştirmesi gerçekleştirilir. Sonuçta tokluk, süneklik, korozyon direnci ve sertlikte iyileşmeler sağlanır.

Yapıda çökelmelerin oluşması veya bir temperleme etkisinin görülmesi tamamen çeliğin bileşimine bağlıdır. Yarı ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin Ms sıcaklığı, çözeltiye alma tavlama ve bileşimlerinin etkisi altındadır. Örneğin; AM 350 çeliği, 930°C nin altındaki sıcaklıklarda çözeltiye alma tavlama uygulandığında karbürlerin tam olarak çözeltiye geçmemesi sonucu Ms sıcaklığı oda sıcaklığının üzerine çıkar. 930°C nin üzerinde olduğu zaman ise, Ms sıcaklığı da ani

olarak düşer. Uygulamada yüksek sıcaklıklarda delta ferrit oluşumu ortaya çıkacağından 1050°C'yi geçilmemesi önerilir (Kaluç ve Tülbentçi, 1998).

3.2.3. Ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler

Ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler genel olarak çözeltiliye alınmış, ostenitik durumda temin edilirler ve ostenit yapı içerisinde yaşlandırma ile çökeltme sertleştirmesi oluşturulur (Peckner, 1977).

Bu tür paslanmaz çelikler, tavlandıktan ve herhangi bir yaşlandırma veya sertleştirme işleminden ve hatta soğuk şekil değiştirmeden sonra bile ostenitik iç yapıyı kararlı olarak tutacak şekilde alaşım elementleri içerirler.

Bu tür çeliklerde çökeltme sertleştirmesini oluşturan faz, 1100 – 1130°C sıcaklıklarda çözeltiliye geçer ve bu sıcaklıklardan itibaren de hızlı soğutma halinde bile ostenitik yapı içinde çözeltili halinde kalır. Çözeltiliye alma işlemini takiben 650 – 770°C sıcaklık aralığında uzun süreli bir yaşlandırma işleminde Al, Ti, P gibi elementler metallerarası bileşikler oluşturarak ostenitik yapının sertlik ve mukavemetini artırır. Erişilen sertlik, martenzitik veya yarı ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerde elde edilen değerlerden düşük olmasına karşın yapı manyetik olmayan özelliğini korur.

Tüm ostenitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler, genel olarak şekillendirmede, kaynak edilmelerinde ve ısıl işlemlerde ostenitik iç yapılarını korurlar. Ancak çökeltme sertleştirmesini gerçekleştirmek için katılan bazı alaşım elementleri kaynak kabiliyetlerini önemli ölçüde etkiler (Kaluç ve Tülbentçi, 1998).

3.2.4. Martenzitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler

Bu tür çelikler genel olarak üreticiden martenzitik yapıda temin edilir ve basit bir yaşlandırma ısıl işlemi ile çökeltme sertleşmesi oluşturulabilen çeliklerdir. Kullanım alanları bakımından martenzitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler diğer aynı gruptaki malzemelere göre daha yaygındırlar (Peckner, 1977, Erdoğan, 2000) .

Bu tür çelikler 1040 – 1080°C sıcaklıkları arasında ki çözeltiliye alma tavlama sırasında tamamen ostenitik yapıda olmalarına karşın soğumada ostenit → martenzite dönüşerek tamamen martenzitik bir iç yapıya sahip olurlar. Ms (martenzitik dönüşüm başlama) sıcaklığı 95 – 150°C dir. Daha sonra bu çelikler 480 – 650°C sıcaklık

arasında bir sıcaklığa ısıtılarak yaşlandırılırlar. Çeliğin içerisinde bulunan Mo, Ti, Cu, Nb ve Al gibi elementlerden biri veya bir kaçının bu ısıl işlem sonucunda çok küçük zerrecikler halinde çökmesi ile sertlik ile mukavemet artışı sağlanır. Endüstride kullanılan martenzitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik türlerine uygulanan ısıl işlemler tablolar halinde verilmiş olup çeliğin mekanik özellikleri yaşlandırma sıcaklığı ve sıcaklık süresine bağlı olarak değişir, bu şekilde özel kullanım istekleri karşılanabilir.

Uygulanan ısıl işlemler sonucunda, çekme mukavemetlerindeki değişime bağlı olarak martenzitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler iki gruba ayrılırlar. Örneğin, 17-4 PH, 15-5 PH, Custom 450, Stainless W gibi türler 1378 MPa'ya kadar varan çekme mukavemetleri ile orta mukavemetli, PH 13-8 Mo ve Custom 455, 1378 MPa'dan daha fazla çekme mukavemetleri ile yüksek mukavemetli olarak gruplandırılırlar.

Metalurjik olarak bu tür paslanmaz çeliklerde bileşimin dengelenmesi oldukça kritik bir konudur. Bileşimde oluşabilecek az bir dalgalanma, çözeltiliye alma tavlamasında çok miktarda delta ferrit oluşmasına neden olabilir. Ostenitin çok dengeli olması durumunda da, çözeltiliye alma tavlama sonrasında da sıcaklığında çok fazla miktarda ostenit iç yapıda kalabilir. Bu iki olay, yaşlandırma sırasında tüm sertleşmeyi önler, bu dengeyi karbon ve azot içeriği belirgin bir biçimde etkiler. Atölyedeki veya atmosferdeki kirlilik karbon ve azotun artmasına neden olabilir. Örneğin, 17-4 PH ve Stainless W gibi türler, martenzitik yapı içinde bir miktar ferrit dizileri içerirler, 15-5 PH ve Custom 450 gibi türler ise hızlı soğutma işleminden sonra ferrit içermezler (Kaluç ve Tülbentçi, 1998).

Bu çalışmada tercih edilen malzeme olan 17-4 PH martenzitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemenin geniş olarak tanıtımı aşağıda verilmiştir.

3.2.5. 17 – 4 PH çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik

17-4 PH martenzitik paslanmaz çelikler içerisinde yüksek mukavemetli ve iyi korozyon dirençli tek bileşim olup, en yaygın olarak kullanılan türdür. H 1075 yaşlandırması sonucu minimum 1000MPa veya H1150 çift yaşlandırma durumunda minimum 930 MPa çekme mukavemeti sağlar. Yüksek çekme mukavemeti ve yüksek akma mukavemetini çözeltiliye alma ve tek veya çift düşük sıcaklıktaki yaşlandırma ısıl işlemleri sonucu sağlaması karakteristik özelliğidir. Kaynak

kabiliyetleri de oldukça iyidir. Bunlarla birlikte, çoğu korozif ortamda 304 türü ostenitik paslanmaz çelik ile karşılaştırıldığında yaklaşık eşit değerdedir.

Bu malzemenin yaygın olarak kullanım alanları deniz, uzay, kimya, petro kimya, gıda, kağıt, ölçme sistemleri ve genel amaçlı metal uygulama işleridir. Uygulamalarda kullanıldığı yerleri ise şöyle sayabiliriz: pompa milleri, uçak parçaları, vana parçaları, hidrolik bağlantı elemanları, çiviler, vidalar, kavramalar, aşınma halkaları, tekerlekler, sensör gövdeleri ve yiyecek taşıma ekipmanları vb.

Aşağıda tablolar halinde 17-4 PH malzemesine ait özellikler sıralanmıştır. Ülkemizde ve diğer ülkelerdeki malzemenin tanımlamaları ve kimyasal bileşimi Tablo 3.4'te verilmiştir. Bu malzemeye uygulanabilen çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemlerinin koşulları Tablo 3.5'te, bu işlemler sonucunda malzemenin mekanik özellikleri de Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.4. 17-4PH paslanmaz çelik malzemenin diğer ülkelerdeki tanımları ve kimyasal bileşimi (AMS 5643P, 1999 – Interlloy technical data 630, 2003 - Ak steel technical data, 2003)

İlgili Tanımlamaları			
	Avusturya	AS 2837-1986-630	
	Almanya	W.Nr 1.4542 X5CrNiCuNb17 4 W.Nr 1.4548 X5CrNiCuNb 17 4 4	
	Japonya	JIS G4303 SuS 630	
	ABD	AISI 630 AISI S17400 ASTM A564/A564M-99-630 SAE J467 17-4 PH UNS S17400	
Kimyasal Bileşimi		Min.	Maks.
	Karbon		0.07
	Silisyum		1.0
	Mangan		1.0
	Nikel	3.0	5.0
	Krom	15.0	17.5
	Bakır	3.0	5.0
	Niobyum	0.15	0.45
	Fosfor		0.04
	Sülfür		0.03
	Molibden		0.05

Tablo 3.5. 17-4PH paslanmaz çelik malzemeye uygulanabilen ısı işlemler

Standard Isıl İşlemler					
Çözeltiliye Alma	Yaşlandırma				
	Durum Adı	Yaşlandırma Sıcaklığı		Bekletme Zamanı (saat)	Soğutma Ortamı – 90 °F (32 °C) altına
±15 °F		±9 °C			
Durum A 1900°F ± 25°F (1038°C ± 14°C) Havada soğutma	H900 (H480)	900 °F	480 °C	1	Havada
	H925 (H495)	925 °F	495 °C	4	Havada
	H1025 (H550)	1025 °F	550 °C	4	Havada
	H1075 (H580)	1075 °F	580 °C	4	Havada
	H1100 (H595)	1100 °F	595 °C	4	Havada
	H1150 (H620)	1150 °F	620 °C	4	Havada
	H1150M (H620M)*	1400 °F	760 °C	2	Havada
	(+) Artı	1150 °F	620 °C	4	Havada
	H1150D (H620D)*	1150 °F	620 °C	4	Havada
	(+) Artı	1150 °F	620 °C	4	Havada
* çift aşırı yaşlandırılmış durum					

Tablo 3.6. 17-4PH paslanmaz çelik malzemede ısı işlemler sonrası elde edilen mekanik özellikleri

Tipik Mekanik Özellikleri – Çözeltiliye alma ve yaşlandırma ısı işlemleri sonrası oda sıcaklığındaki değerleri						
Durum adı	Çekme mukavemeti Mpa	Akma mukavemeti MPa	Uzama (%) 50 mm. de	Sertlik	Charpy (V) darbe enerjisi	
				HRC	ft/lbs	Joule
H900 (H480)	1375	1275	14	40-47	15	20
H925 (H495)	1310	1205	14	38-45	25	34
H1025 (H550)	1170	1140	15	34-42	35	47
H1075 (H580)	1140	1035	16	31-38	40	54
H1100 (H595)	1035	930	17	30-37	45	61
H1150 (H620)	1000	860	19	28-37	50	68
H1150M (H620M)	860	600	22	24-30	100	135
H1150D (H620D)	950	800	20	24-30	90	120

17-4 PH malzemesinin martenzit dönüşüm sıcaklığı olan M_s 132°C ve M_f 32°C olarak tablolarda verilmiştir.

Tüm durumlarda 17-4 PH malzemesi manyetikdir.

Isıl işlem uygulama sıcaklıklarına dikkat edildiğinde çelikler için düşük sayılabilecek derecelerdir. Bu da hem maliyeti hemde parçanın ısıl işlem sonrasında çarpılması olanağını düşürmektedir. Durum A yapısındaki malzemenin H 900'e sertleştirme işleminde boyut değişim $0.0004\text{mm} - 0.0006 \text{ mm/mm}$; H 1150'e sertleştirme işleminde ise boyut değişimi $0.0008 - 0.0010 \text{ mm/mm}$ dir (Kattus, 1978 – Ak steel technical data, 2003). Diğer sertleştirme durumları için boyutsal değişimler sertleştirme sıcaklığı ile ilgilidir. Uygulanan sıcaklığa karşı boyutsal değişimlerin düşük olması kaynak sonrası oluşan çarpılma miktarını da azaltacaktır.

Tablo 3.7 de farklı ısıl işlemler uygulanmış 17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinden olan yoğunluk, elektriksel direnci, ısıl genişleme katsayısı, elastiklik modülü ve Poisson oranı verilmiştir (Ak steel technical data, 2003).

17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelikler üstün korozyon direncine sahiptirler. Bunların korozyon dirençlerinin laboratuvar koşullarında belirlenmesinde saf çözeltiler kullanılır. Elde edilen bu veriler diğer malzemelerle korozyon direncinin karşılaştırılmasında kullanılabilir, ancak bu malzemelerin gerçek çalışma koşullarındaki performanslarını tam olarak vermez. Tablo 3.8 da AISI 304 paslanmaz çelik ile karşılaştırmalı olarak listelenmiştir. Burada görüldüğü gibi korozyon direnci 17-4 PH malzemedeki ısıl işlem koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Ak steel technical data, 2003).

Özellikle havacılık, uçak sektöründe, kuvvet ve ağırlık ölçümlerinde kullanılan hassas sensörlerin gövde malzemesi olarak ve bunun dışında pek çok alanda yaygın kullanılan 17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik yüksek mukavemet, üstün korozyon direnci, üretim kolaylığı ve uygun fiyatı nedeniyle giderek endüstride önem kazanan malzemelerdendir.

Tablo 3.7. Farklı ısı işlemleri 17-4 PH malzemelerin fiziksel özellikleri

	Durum A (Manyetik)	Durum H 900 (Manyetik)	Durum H 1075 (Manyetik)	Durum H 1150 (Manyetik)
Yoğunluk, lbs/in ³ (g/cm ³)	0.28 (7.78)	0.282 (7.80)	0.283 (7.81)	0.284 (7.82)
Elektriksel Direnç, mikroh-m-cm	98	77	-	-
Özel Isı Btu/lb/ °F (32-212°F) kJ/kg*K (0-100°C)	0.11(0.46)	0.11(0.46)		
Isı İletim Katsayısı BTU/hr/ft ² /in/°F(W/m*K) 300°F(149°C) 500°F(260°C) 860°F(460°C) 900°F(482°C)		124(17.9) 135(19.5) 156(22.5) 157(22.6)		
Esas Isıl Genleşme Katsayısı in/in/°F{um/m*K} -100 - 70 °F(-73-21 °C) 70 - 200°F(21 - 93°C) 70 - 400°F(21 - 204°C) 70 - 600°F(21 - 316°C) 70 - 800°F(21 - 427°C) 70 - 900°F(21 - 482°C)	- 6.0 x 10 ⁻⁶ (10.8) 6.0 x 10 ⁻⁶ (10.8) 6.2 x 10 ⁻⁶ (11.2) 6.3 x 10 ⁻⁶ (11.3) -	5.8 x 10 ⁻⁶ (10.4) 6.0 x 10 ⁻⁶ (10.8) 6.0 x 10 ⁻⁶ (10.8) 6.3 x 10 ⁻⁶ (11.3) 6.5 x 10 ⁻⁶ (11.7) -	- 6.3 x 10 ⁻⁶ (11.3) 6.5 x 10 ⁻⁶ (11.7) 6.6 x 10 ⁻⁶ (11.9) 6.8 x 10 ⁻⁶ (12.2) -	6.1 x 10 ⁻⁶ (11.0) 6.6 x 10 ⁻⁶ (11.9) 6.9 x 10 ⁻⁶ (12.4) 7.1 x 10 ⁻⁶ (12.8) 7.2 x 10 ⁻⁶ (13.0) 6.3 x 10 ⁻⁶ (13.1)
Elastiklik Modülü, psi (MPa)		28.5 x 10 ⁶ (197 x 10 ³)		
Süneklik Modülü, Burulmada, ksi (MPa)	9.68 x 10 ³ (67 x 10 ³)	11.00 x 10 ³ (76 x 10 ³)	-	10.10 x 10 ³ (70 x 10 ³)
Poisson Oranı (Tüm Şartlarda)		0.272		

Tablo 3.8. Değişik kimyasal ortamlarda 17-4 PH malzemedeki korozyon miktarları

Kimyasal Madde	Konsatrasyon %	Sıcaklık °C	Korozyon Miktarı, mils per year (mpy) (a)				
			17-4 PH (b)				Type 304(b)
			H 925	H 1025	H 1075	H 1150	İşlemsiz
H ₂ SO ₄	1	35	Hiç	Hiç	Hiç	Hiç	28
	2		Hiç	Hiç	Hiç	Hiç	57
	5		4	7	11	9	240
	1	80	1	1	1	1	350
	2		8	9	13	17	480
	98	35	Hiç	Hiç	Hiç	Hiç	-
	98	80	5	5	7	6	-
HCl	1/2	35	2	2	3	16	33
	1		35	174	518	650	240
HNO ₃	25	Kaynatma	14	6	7	8	2
	50		70	35	47	31	4
	65		125	85	107	79	10 {c}
Formik Asit	5	80	3	1	1	2	81
	10		2	3	3	5	100
Asetik Asit	33	Kaynatma	6	6	4	4	300
	60		2	2	2	2	250
H ₃ PO ₄	1-1/2	Kaynatma	Hiç	Hiç	Hiç	Hiç	Hiç
	20		1	1	1	2	2
	50		4	4	3	5	7 {c}
	70		86	57	60	119	32 {c}
NaOH	30		5	5	7	8	Hiç
	50		3	3	4	5	1
	30		8	7	11	11	68{1}
	50		480{1}	450{1}	560{1}	560{1}	80{1}
Amonyum Hidroksit	10	Kaynatma	Hiç	Hiç	Hiç	Hiç	Hiç
10% HNO ₃ -1% HF	-		1500	1500	1500	1500	380
10% HNO ₃ -3% HF	-		4300	4300	4300	4300	840
Alkolsüz Kolalı Şurup	Konsantre		Hiç	Hiç	Hiç	Hiç	Hiç
Tuz-Şeker-Sirke	-	Kaynatma	Hiç	Hiç	Hiç	Hiç	Hiç

(a) Korozyon miktarı, toplam 5/8"(15.8mm) çaplı ve 5/8"(15.8mm) uzunluktaki silindirik numunenin 5 defa 48 saat boyunca daldırılması olarak tanımlanır. Numuneler son 3 periyotlarında elektolitik olarak aktifirler, yalnızca %65 nitrik asitte kaynatma ve de 304 numunenin sodyum hidroksitte kaynatılması hariçtir.

(b) Parantez içerisindeki rakama testin tekrar sayısını gösterir. Hiç - korozyon oranının 1mil/yıl dan daha düşük olduğunu gösterir.

(c) Korozyon miktarı periyottan periyota artar. Miktar 5 periyodun ortalamasıdır.

Tablo 3.9. Çökeltme sertleştirilmeli paslanmaz çeliklerin ısıtma koşulları (Metals Handbook, 1998)

Alaşım Adı	Durum Adı	Çözeltiye alma	Ara İşlem	Yaşlandırma	
Martenzitik PH13-8 Mo	A	925 °C, 15-30 dakikada; yağ veya havada 15 °C	...	...
	RH950	925 °C, 15-30 dakikada; yağ veya havada 15 °C	Soğutma -75 °C, 8 saatte	510 °C, 4 saatte; havada	
	H950	925 °C, 15-30 dakikada; yağ veya havada 15 °C	...	510 °C, 4 saatte; havada	
	H1000	925 °C, 15-30 dakikada; yağ veya havada 15 °C	...	535 °C, 4 saatte; havada	
	H1050	925 °C, 15-30 dakikada; yağ veya havada 15 °C	...	565 °C, 4 saatte; havada	
	H1100	925 °C, 15-30 dakikada; yağ veya havada 15 °C	...	595 °C, 4 saatte; havada	
	H1150	925 °C, 15-30 dakikada; yağ veya havada 15 °C	...	620 °C, 4 saatte; havada	
	15-5PH	A	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C
		H900	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	480 °C, 1 saatte; havada
		H925	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	495 °C, 4 saatte; havada
		H1025	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	550 °C, 4 saatte; havada
H1075		1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	580 °C, 4 saatte; havada	
H1150		1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	620 °C, 4 saatte; havada	
17-4PH		A	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C
	H900	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	480 °C, 1 saatte; havada	
	H925	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	495 °C, 4 saatte; havada	
	H1025	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	550 °C, 4 saatte; havada	
	H1075	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	580 °C, 4 saatte; havada	
	H1100	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	595 °C, 4 saatte; havada	
	H1150	1035 °C, 30 dakikada; yağ veya havada 30 °C	...	620 °C, 4 saatte; havada	
Custom 450	A	1035 °C, 1 saatte; suda	...	...
	H900	1035 °C, 1 saatte; suda	...	480 °C, 4 saatte; havada	
	H1000	1035 °C, 1 saatte; suda	...	535 °C, 4 saatte; havada	
	H1150	1035 °C, 1 saatte; suda	...	620 °C, 4 saatte; havada	
Custom 455	A	830 °C, 1 saatte; suda	...	...
	H900	830 °C, 1 saatte; suda	...	480 °C, 4 saatte; havada	
	H950	830 °C, 1 saatte; suda	...	510 °C, 4 saatte; havada	
	H1000	830 °C, 1 saatte; suda	...	535 °C, 4 saatte; havada	
Yarı - ostentitik 17-7PH ve PH15-7 Mo	A	1065 °C, 30 dakikada/25 mm (1 in.) kalınlıkta; havada	...	...
	T	1065 °C, 30 dakikada/25 mm (1 in.) kalınlıkta; havada	760 °C, 1 1/2 saat; havada 15 °C, 30 dakikada	...	
	TH1050	1065 °C, 30 dakikada/25 mm (1 in.) kalınlıkta; havada	760 °C, 1 1/2 saat; havada 15 °C, 30 dakikada	565 °C, 1 1/2 saatte; havada	
	A1750	1065 °C, 30 dakikada/25 mm (1 in.) kalınlıkta; havada	955 °C, 10 dakikada; havada	...	
	R100	1065 °C, 30 dakikada/25 mm (1 in.) kalınlıkta; havada	955 °C, 10 dakikada; havada; soğutma -75 °C, 8 saatte	...	
	RH950	1065 °C, 30 dakikada/25 mm (1 in.) kalınlıkta; havada	955 °C, 10 dakikada; havada; soğutma -75 °C, 8 saatte	510 °C, 1 saatte; havada	
	C	1065 °C, 30 dakikada/25 mm (1 in.) kalınlıkta; havada	Soğuk bölgede bekletme	...	
	CH900	1065 °C, 30 dakikada/25 mm (1 in.) kalınlıkta; havada	Soğuk bölgede bekletme	480 °C, 1 saatte; havada	

Tablo 3.9. (Tablo Devam Ediyor)

Alaşım Adı	Durum Adı	Çözeleliye alma	Ara İşlem	Yaşlandırma
AM-350	H	1065 °C, 90 dakika/25 mm (1 in.) kalınlıkta; hızlı soğutma	...	...
	L	1065 °C, 90 dakika/25 mm (1 in.) kalınlıkta; hızlı soğutma	930 °C, 90 dakikada/25mm (1in.) kalınlıkta; havada; soğutma -75 °C, 3 saatte	...
	SCT1850	1065 °C, 90 dakika/25 mm (1 in.) kalınlıkta; hızlı soğutma	930 °C, 90 dakikada/25mm (1in.) kalınlıkta; havada; soğutma -75 °C, 3 saatte	455 °C, 3 saatte; havada
	SCT1000	1065 °C, 90 dakika/25 mm (1 in.) kalınlıkta; hızlı soğutma	930 °C, 90 dakikada/25mm (1in.) kalınlıkta; havada; soğutma -75 °C, 3 saatte	535 °C, 3 saatte; havada
AM-355	H	1025 °C, 90 dakika/25 mm (1 in.) kalınlıkta; hızlı soğutma	...	...
	L	1025 °C, 90 dakika/25 mm (1 in.) kalınlıkta; hızlı soğutma	930 °C, 90 dakikada/25mm (1in.) kalınlıkta; havada (a)	...
	SCT1850	1025 °C, 90 dakika/25 mm (1 in.) kalınlıkta; hızlı soğutma	Soğutma -75°C; 930°C, 90 dakikada/25mm (1in.) kalınlıkta; havada; soğutma -75°C, 3 saatte	455 °C, 3 saatte; havada
	SCT1000	1025 °C, 90 dakika/25 mm (1 in.) kalınlıkta; hızlı soğutma	Soğutma -75°C; 930°C, 90 dakikada/25mm (1in.) kalınlıkta; havada; soğutma -75°C, 3 saatte	535 °C, 3 saatte; havada
Ostenitik A-286	ST1650	900 °C, 2 saatte; yağ veya suda	...	...
	ST1650A	900 °C, 2 saatte; yağ veya suda	...	730 °C, 16 saatte; havada
	ST1800	980 °C, 1 saatte; yağ veya suda	...	...
	ST1800A	980 °C, 1 saatte; yağ veya suda	...	730 °C, 16 saatte; havada

(a) Çubuk ve lama malzemeler için, 930°C de yeniden çözeleliye alma işleminden önce 745 - 800°C'de 3 saat + 535 - 620°C'de 3 saat (Durum E + OT) eşitleme ısı işlemi uygulanır.

3.2.5.1. Cökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliğin ısıtıl işlemleri ve metalurjik özellikleri

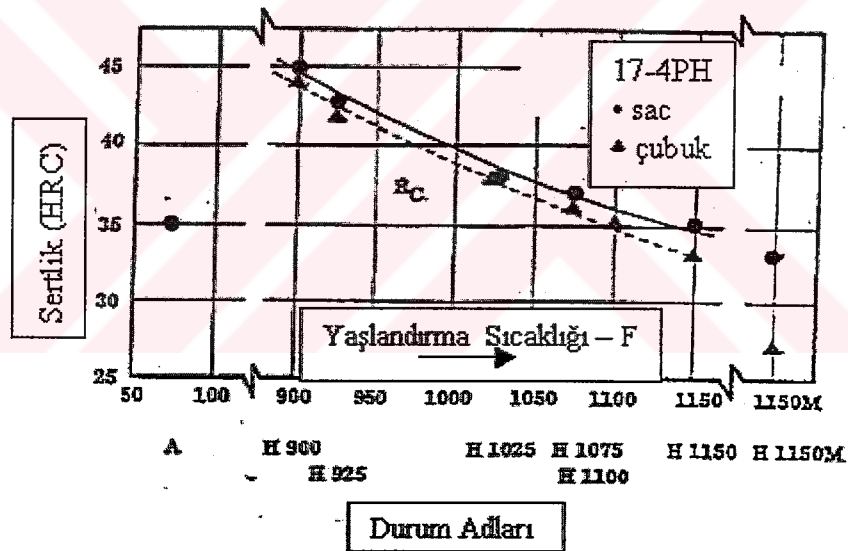
Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklere uygulanan ısıtıl işlemlerin akışı; çözeltili alma, ostenit oluşumu için bekleme, dönüşüm soğutması ve yaşlandırma şeklindedir. Bu malzemelere uygulanabilen ısıtıl işlemler Tablo 3.9 da verilmiştir. Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerden 17-4 PH türü martenzitik mikro yapısından dolayı martenzitik grup içerisinde yer alır. Bu çelikler için çökeltme sertleştirme reaksiyonları oldukça karmaşıktır. Çökeltme sertleşmesi mekanizması genel olarak bilinen alüminyum alaşımlarındaki sisteme benzerdir. Malzeme veya yapı tek fazlı bölgeye kadar ısıtılır ve içindeki çökeltme parçacıkları ergiyik durumuna gelinceye kadar beklenir, sonra iki fazlı bölgeye hızla soğutulur. Hızlı soğuma denge halinde görülen faz ayrışmasını önler ve böylece aşırı doymuş katı ergiyik elde edilir ve bu işleme çözeltili alma ısıtıl işlemleri de denir. Genel olarak, bu malzeme üreticiden çözeltili alınmış durumda (Durum A halinde) temin edilir. Bu işlem $1038 \pm 14^\circ\text{C}$ de malzemenin boyutuna bağlı olan bir zamanda çözeltili alınır ve bunu takiben havada 32°C 'nin altına soğutma yapılır (AMS 5643P, 1999). Sonuçta, martenzitik bir yapı içerisinde C, Cu ve Nb aşırı doymuş katı çözeltili durumuna geçerler. Malzeme oldukça gevrek ve sertliği yaklaşık 35 HRC civarındadır (Allgeier, 1994). Talaşlı işleme malzeme bu durumda iken gerçekleştirilebilir, ancak yapısal olarak, tokluğunun ve çentik darbe enerjisinin çok düşük olması nedeniyle kullanıma uygun değildir.

Bu çeliklerde mukavemet artışı iki mekanizma ile sağlanır; birincisi martenzit oluşumu, ikincisi ise yaşlandırma işlemidir. Yapıda martenzit oluşumu gerçekleştirilmiş Durum A olarak temin edilen malzemenin sertlik ve tokluk artışı 480°C ila 620°C dereceleri arasında uygulanan yaşlandırma ısıtıl işlemleri ile sağlanır. Ayrıca yaşlandırma işleminin amacı, tokluk, süneklik ve korozyon direncini arttırmak için martenzitin oluşturduğu gerilmeleri rahatlatmayı ve metallerarası bir bileşiği çökeltmek ek sertlik sağlamaktır. Literatürde yaşlandırma ısıtıl işlemlerinin durum adları Fahrenheit sıcaklığı cinsinden (örneğin; 900°F (482°C) için H900 gibi) ifade edilmiştir. Tablo 3.6 ve 3.7'ten görüldüğü gibi H900 durumunda 482°C de 1 saat bekletip havada soğutma ile en yüksek sertlik ve mukavemet değerleri elde edilmektedir. Bu nedenden dolayı yaygın olarak bu tür çelik kuvvet dönüştürücü üretiminde tercih edilir. Artan sıcaklık ve zaman, düşük mukavemet ve sertliğe yol

açarken, çentik darbe enerjisini yükseltir. Aşırı yaşlandırılmış durum olarak ifade edilen bu durumda (örneğin H 1150 M) malzemenin şekillendirilebilmesi, sıcak işlenmesi, kaynağı ve lehimlenmesi oldukça iyidir (Kattus, 1978). Bu olay çözeltiliye alma tavlaması sırasında ostenit matris içerisinde çözünen bakır tanecikleri soğutma ile martenzit yapı içerisinde sıkışır. Maksimum sertliğin elde edildiği yaşlandırma sıcaklıklarında çökelti tanecik boyutlarının optimum değerde olduğu bilinmektedir, ancak artan yaşlandırma sıcaklıkları ile birlikte çökelti boyutları büyümekte ve bu ise doğal olarak tane boyutlarının artmasına ve sertlik değerinin düşmesine yol açmaktadır.

17-4 PH malzemenin yaşlandırma ısıl işlemi ile sertliğinin değişimi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

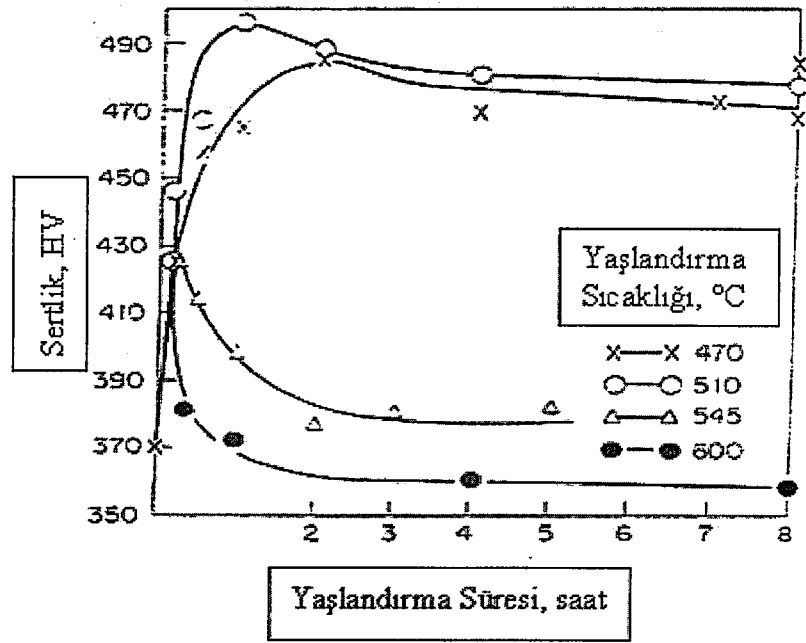
Kattus'un (1978) yaptığı çalışmada literatürde yer alan standard ısıl işlem koşullarında dolu çubuk ve sac malzemelerde sertlik değişimini incelemiştir.



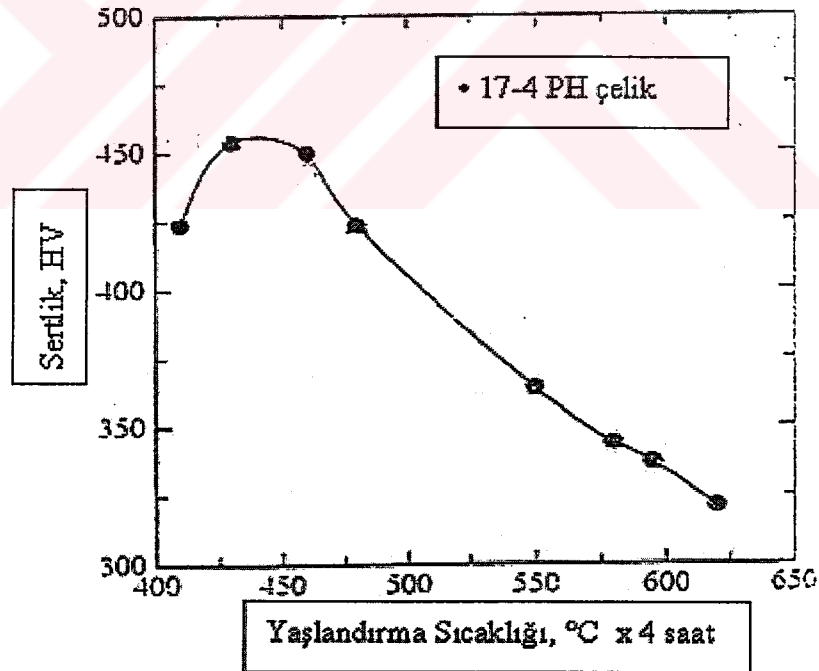
Şekil 3.5. Yaşlandırma sıcaklığının sertlik üzerindeki etkileri (Kattus, 1978)

Viswanathan (1988) tarafından yapılan diğer çalışmada 17-4 PH malzemenin farklı yaşlandırma sıcaklıkları üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmaya göre 510°C de 1 saat süre sonunda en yüksek sertlik değeri elde edildiği görülmüştür.

1997 yılında Isogawa tarafından çalışmada ise, 450°C de 4 saat bekleme sonunda maksimum sertlik değerinin elde edildiği belirtilmiştir.

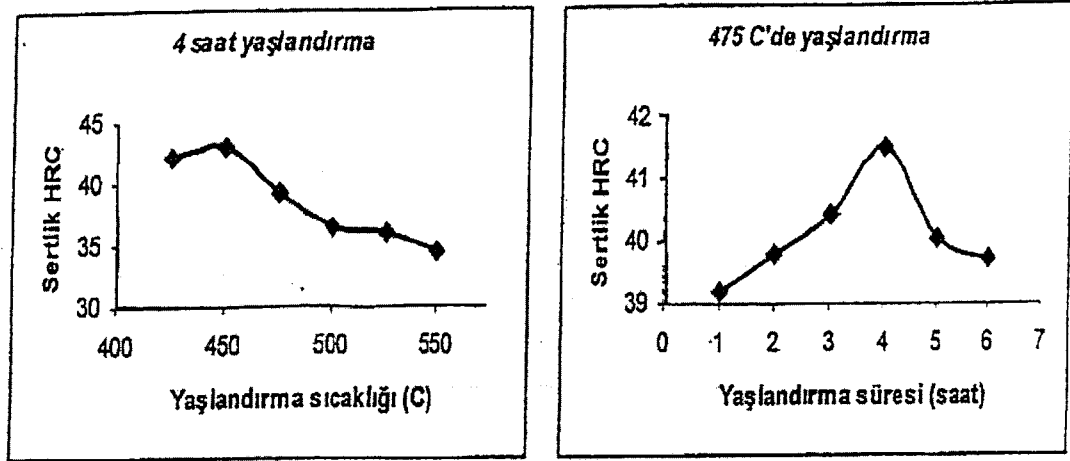


Şekil 3.6. Farklı sıcaklık ve zaman değerleri için malzemeden elde edilen sertlik değerleri (Viswanathan,1988)

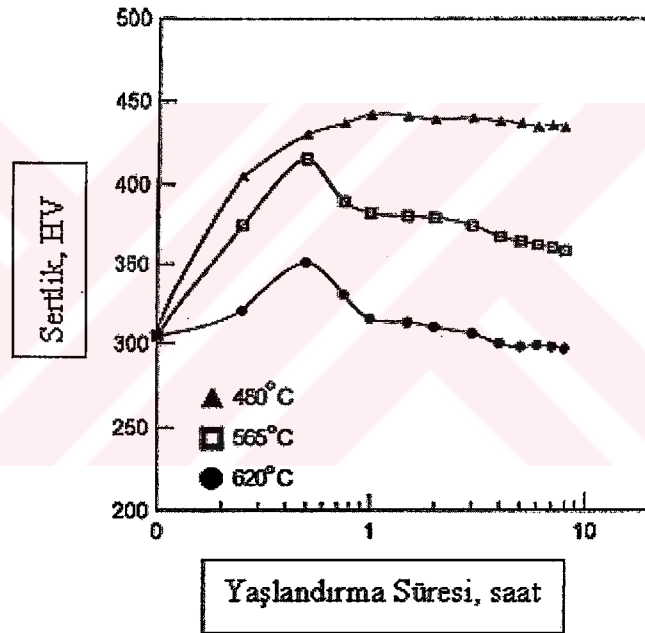


Şekil 3.7. Yaşlandırma sıcaklığının sertlik üzerindeki etkileri (Isogawa, 1997)

Salman ve arkadaşlarının (2002) yaptıkları çalışmada 17-4 PH malzemesinde 450°C de ve 4 saat sürede maksimum sertlik değerleri elde edildiği rapor edilmiştir.



Şekil 3.8. Yaşlandırma sıcaklığına ve süresine bağlı sertlik değişimi grafikleri (Salman, vd., 2002)



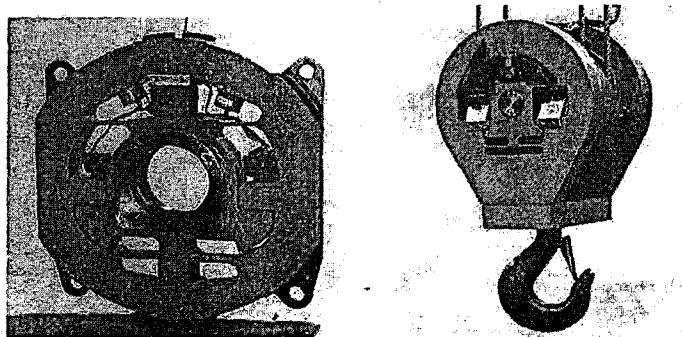
Şekil 3.9. Yaşlandırma sıcaklığı ve bekleme süresi ile sertlik değişimi (Hsiao vd., 2002)

Yaşlandırma sıcaklığı ile bekleme zamanı arasındaki ilişki üç farklı sıcaklık için zamana bağlı değişimleri verilmiştir (Şekil 3.9). Buradan da açık bir şekilde görüldüğü gibi 480°C de 1 saat bekleme zamanı sonrası en yüksek sertlik değeri elde edilmiş ve artan bekleme zamanı ile sertlikte önemli bir düşüş olmamıştır. 565 ve 620°C lerde ise 30 dakikalık bir bekleme zamanında sertlik değeri en yüksek seviyesine ulaşmakta ve sonra önemli bir düşüş göstermektedir (Hsiao vd., 2002).

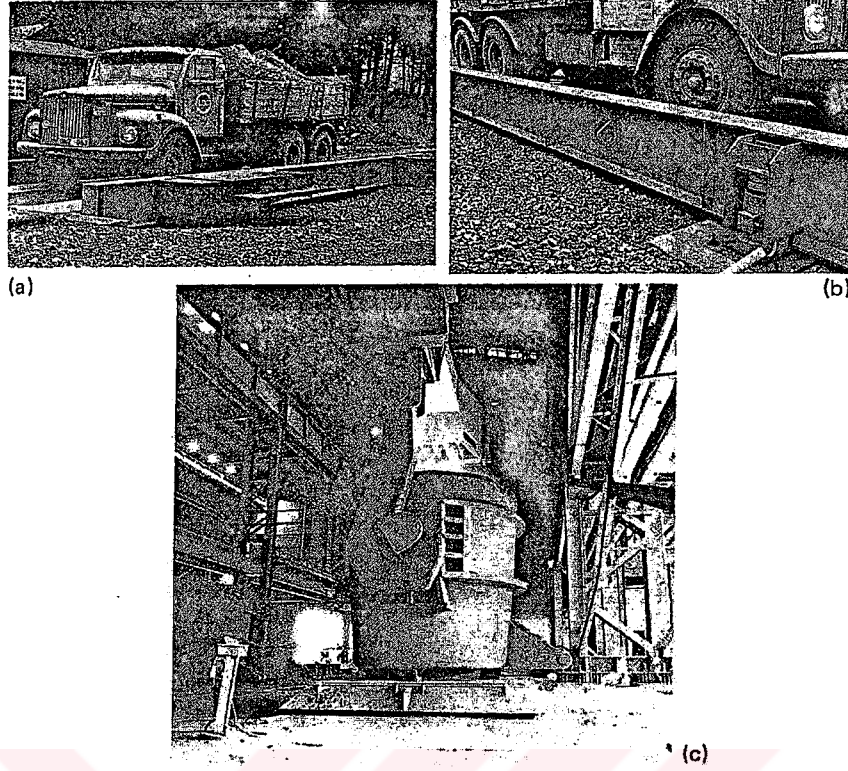
4. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜLER VE PERFORMANSLARI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARIN ARAŞTIRILMASI

Kuvvet ve kütle endüstriyel alanda mühendislik ölçümleri için temel büyüklüklerdir. Kuvvet ve kütle Newton'un hareket kanununa göre ilişkilendirilir ve $F = m.a$ olarak gösterilirler. Burada a kütlelenin ivmesi olup, uzunluk ve zamana bağımlı bir büyüklüktür. Ağırlık ise kuvvet ve kütleyle birleştiren bir ifade olup, $G = m.g$ ile gösterilir. g yerçekimi ivmesini göstermekte olup dünyanın her noktasında değişen bir büyüklüktür. Örneğin, İngiltere içerisinde g 'nin değişimi % 0.1 oranında iken, ekvator ile kutuplar arasında ise % 0.5 oranında değişim gösterir. Ayrıca deniz seviyesinden her 1000m. yükselmede g değeri % 0.03 azalır. Bu durumlar yüzünden 3. Genel Ağırlıklar ve Ölçümleri Konferansında (1979) bir gövdenin standard ağırlığının tanımlanmasında, kütleyle gelen standard yerçekimi ivmesi 9.80665m/s^2 olarak tanımlanmıştır (Erdem, 1982)

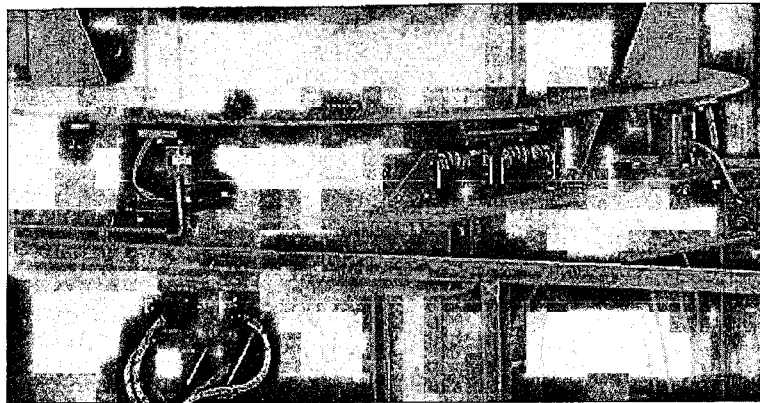
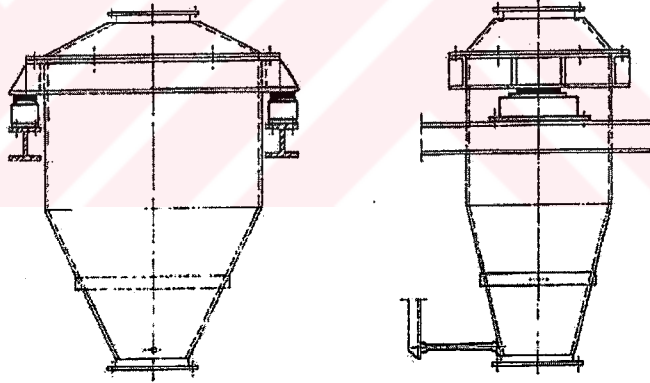
Genel ağırlık ölçümleri, mekanik sistemlerde, bilinen bir ağırlık ile bilinmeyen bir ağırlığın karşılaştırması ile yapılmaktadır. Ancak, gelişen teknoloji ile daha hızlı ve büyük kapasiteli kuvvet dönüştürücü ve ağırlık ölçer elektronik sistemlerin kullanımı giderek artmıştır. Birçok kullanım alanı olan kuvvet dönüştürücülerin bazı uygulama alanları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Norden, 1984).



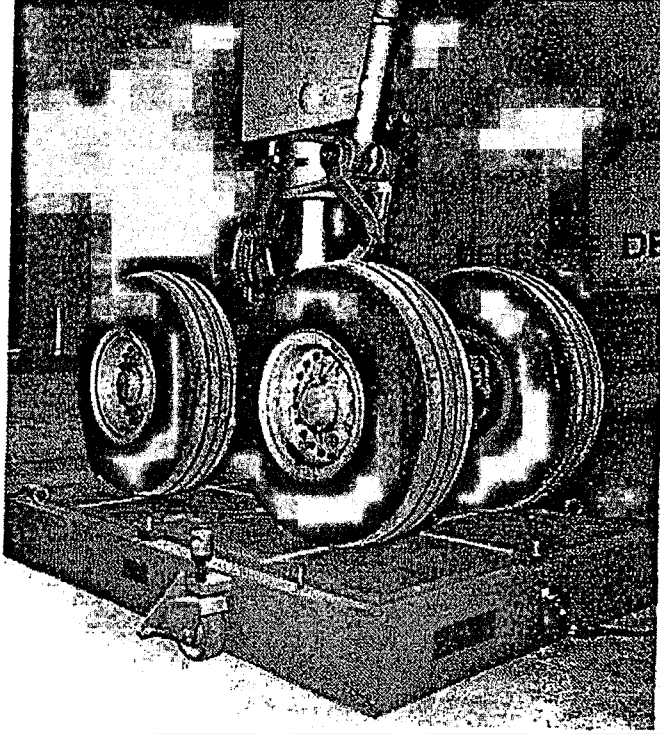
Şekil 4.1. Vinç sistemlerinde kullanılan kuvvet dönüştürücüler



Şekil 4.2. Kamyon kantarları ve ergitme ocaklarında kullanılan kuvvet dönüştürücüler

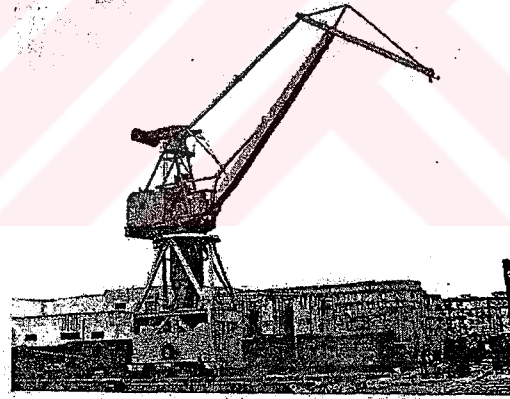


Şekil 4.3. Karışım veya hammadde silolarında kuvvet dönüştürücü kullanım yerleri

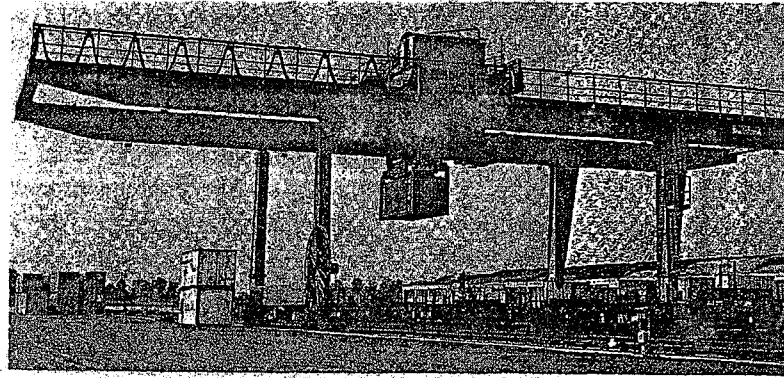


Şekil 4.4. Uçakların ağırlıklarının ölçümünde kullanılan kuvvet dönüştürücüler

(a)



(b)



Şekil 4.5. Büyük kapasiteli vinçlerde ağırlık ölçümünde kullanılan kuvvet dönüştürücüler

Tüm kuvvet dönüştürücülerinde amaç, çalışma bölgesi içinde gerilme (uygulanan yük) ve uzama arasında doğrusal bir ilişki kurmaktır. Kuvvet dönüştürücüler temel olarak 3 elemandan meydana gelirler: yay malzemesi, dirençli uzama ölçer ve gösterge ünitesi. Yay malzemesi gerilme ile uzama arasındaki doğrusallıkta en önemli belirleyicilerden olup, özellikleri en uygun malzemeler olan takım çelikleri, paslanmaz çelikler, alüminyum, titanyum veya Cu-Be alaşımları yay malzemesi olarak tercih edilirler. Yay malzemesinden istenen özellikleri sağlayabilmek için özel ısıl işlemler geliştirilmiştir. En yüksek malzeme kararlılığı sıfır altı (sub-zero) ısıl işlem ile sağlandığı, bu işlem ile 735A50 takım çeliği için gerilme – uzama arasındaki doğrusallığı önemli ölçüde geliştirdiği Erdem 'in 1982 yılında yaptığı çalışmada belirtilmiştir (Erdem, 1982).

Gassman vd. (1993) 'te yaptığı çalışmada yeni dizayn edilmiş bir dönel eğme türü kuvvet dönüştürücünün tanıtımı ve ölçüm sonuçları verilmiştir. Almanya'da kuvvet dönüştürücü imalatı yapmakta olan GTM firması tarafından hazırlanan 2kN, 5MN ve 10MN kapasiteli 3 adet kuvvet dönüştürücünün tekrarlanabilirlik, sürünme, histerisiz, sıcaklık etkisi ve yanal kuvvetten gelen etkileri incelemiş ve grafiksel olarak verilmiştir.

Barbato vd. 1981 yılında yayınladığı çalışmada kuvvet dönüştürücü tasarımında nümerik yaklaşımlarla deneysel yöntemlerin araştırmasını yaparak çeşitli yaklaşımlar sunmuşlardır. Yine Barbato vd. 1984 yılında dirençli uzama ölçerinin "square-ring" türü kuvvet dönüştürücü üzerinde yerleşme konumlarına göre kuvvet dönüştürücünün performanslarını incelemiş ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çeşitli yaklaşımlarda bulunmuşlardır.

Debnam ve Jenkins (1972) tarafından yüksek hassasiyete sahip kuvvet ölçme cihazlarının performansları ve etkili olan kriterleri incelenmiştir.

Lukas'ın 1986 yılında yapmış olduğu çalışmada ise yarı iletken dirençli uzama ölçer kullanılarak kuvvet dönüştürücüdeki doğrusallık ve ısıl kompanzasyonun yapılışı anlatılmıştır.

Basma türü kuvvet dönüştürücülerde uygulanan kuvvetin dönüştürücünün eksenine ile çakışmaması ve farklı açılarda uygulanması ile ortaya çıkan hatalar Peters'in (1984) yapmış olduğu çalışmada verilmiştir.

Hellwig'in (1986) çalışmasında ise Almanya'da kuvvet dönüştürücü imalatı yapmakta olan HBM firması tarafından geliştirilen, Uluslararası karşılaştırma

ölçümlerinde kullanmak amacıyla üretilmiş, tasarım aşamasından başlayarak performans değerlendirmesine kadar olan kademeler anlatılmış olup, özellikle kuvvet dönüştürücünün tekrarlanabilirlik ve sürünme hatası değerlerinin oldukça düşük olduğu belirtilmiştir.

Spoor, 1986 yılında dirençli uzama ölçerli kuvvet dönüştürücülerin sürünme performansları üzerine bir çalışma yayımlamıştır. Çalışmanın sonucunda, sürünmenin zaman bağlı bir kavram olduğu ve kuvvet dönüştürücünün doğrusallık ve histerisiz performansından etkilenebileceği; ısıl işlem ile yapıdaki artık gerilmelerin azaltılmasının sürünme verilerini azaltacağı; dirençli uzama ölçerin taşıyıcı plaka ve yapıstırıcı kalınlığının sürünme üzerinde en etkili faktör olduğu belirtilmektedir.

Çalışmada kullanılan çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik yay malzemesinin yük altındaki davranışları konusunda yapılan literatür araştırmasında çok az yayınla karşılaşmıştır. Allgeier (1995), çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemelerden 15-5PH ve 17-7PH yay malzemeleri olarak eğme tipi kuvvet dönüştürücüler üzerinde çalışmıştır. Çalışmasında, 15-5PH malzeme için H900 durumu ve özel ısıl işlem prosedürü sonrası eğme zorlanmalı kuvvet dönüştürücünün histerisiz performansına; 17-4PH malzeme için ise H900 durumu, 1000°C ve 1080°C de çözeltiye alma ve de özel ısıl işlem prosedürü sonrası yine eğme zorlanmalı kuvvet dönüştürücünün histerisiz performansını elde etmiştir. Burada H900 durumu ve çözeltiye alma ısıl işlemleri sonrası histerisiz değerleri yüksek olmasına karşın, uygulanan ısıl işlem prosedürün açıklanmadığı özel ısıl işlem prosedürü uygulanması sonucunda histerisiz değerleri çok düşük değerlere inmiştir. Sonucunda da histerisiz olayının yay malzemesinin davranışından, tasarım detaylarından, uzama ölçer (strain gage) uygulama tekniğinden ve farklı uzama ölçer üreticilerinin ürünlerinden etkilendiği belirtilmiştir. Ayrıca ısıl işlemin, çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerde histerisiz hatasını olumlu etkilediği ve endüstriyel olarak yüksek doğruluklu kuvvet dönüştürücü üretiminde yeni ısıl işlem prosedürlerinin geliştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Allgeier'in 1997 yılında yaptığı çalışmada yay malzemesi olarak 15-5PH malzemesinden üretilmiş olan Durum A, H900 ve özel ısıl işlemleri ile AL 2024 malzemesinin histerisiz sonuçlarını karşılaştırmıştır. AL 2024 malzemedeki kuvvet dönüştürücüsünün histerisiz değerlerinin ısıl işlem prosedürü açıklanmamış özel ısıl işlemleri 15-5PH malzemedeki kuvvet dönüştürücüsünün çok az altında

olduğunu belirtilmiştir. Sonuçta, anelastisite olayında dislokasyonlar ve çökelti tanecikleri arasındaki hareketler etkili olmaktadır. Bu olayları çökelti taneciklerinin boyutu, türü ve dağılımı da etkilemektedir.

Allgeier'in 1994 yılında yaptığı doktora çalışmasında ise eğme tipi kuvvet dönüştürücüsünde yay malzemesi olarak 15-5PH ve 17-4PH çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemeleri kullanmıştır. Çalışmasında 15-5PH malzeme için koşul A, H900 ve özel ısıl işlem olarak RSGQ ve RSOQ olarak tanımladığı ısıl işlemler sonrası; 17-4PH malzemesi için H900 ve özel ısıl işlem olarak RSGQ ile RSOQ ısıl işlemleri sonrası histerisiz ve sürünme değerleri verilmiştir. Sonucunda, çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik yay malzemeli eğme zorlanmalı kuvvet dönüştürücülerde, histerisiz olayının malzeme ve metalurji mühendisliğinin tam olarak bir mekanizma bulamadığı konularından birisinin olduğu; fakat dislokasyon yoğunluğunun ve çökeltme taneciklerinin boyut, şekil ve dağılımlarının bu olayda etkili olduğunu; ısıl işlem prosedürleri ile çok yüksek doğruluklu çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik yay malzemeli kuvvet dönüştürücü yapılabileceğini; kuvvet dönüştürücünün performansında uzama ölçer uygulama tekniğinin, üreticisinin, kalibrasyon sisteminin ve yükleme şeklinin doğrudan etkili olduğunu belirtmiştir.

Fank'ın (2002) doktora çalışmasında ise kuvvet dönüştürücüsü yay malzemesi olarak AISI 4340 çelik kullanılmıştır. AISI 4340 malzemeye uygulanan ısıl ve mekanik işlemler sonrası farklı yapılar ve farklı sertlikler elde edilmesi sonucu kuvvet dönüştürücü performansları incelenmiştir. Sonuç olarak;

- Histerisiz ve sürünme hatasının sertliğe bağlı olarak değiştiği,
- Malzeme içerisindeki dislokasyon yoğunluğunu arttırıcı ve dislokasyon hareketlerini kısıtlayıcı her olayın histerisiz performansını arttırdığı,
- Histerisiz hatasının tane boyutuna bağlı olarak değiştiği,
- Doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hatalarının yay malzemesine ve uygulanan ısıl ve mekanik işlemlere bağlı olmadığı,
- Ön şekil değişiminin histerisiz hatasını iyileştirdiği, sürünme hatasını kötüleştirdiği,
- Ve kuvvet dönüştürücü imalatında kullanılacak AISI 4340 çeliği için optimum performansın sağlanabileceği ısıl ve termo-mekanik işlemler, verilmiştir.

Yine Fank'ın 2003 yılında yaptığı çalışmada da AISI 4340 malzemeden kuvvet dönüştürücülerin histerisiz hatası üzerine ısı ve mekanik işlemlerin etkisini incelemiştir. Sonuç olarak;

- Malzeme içerisindeki dislokasyon yoğunluğunu artırıcı ve dislokasyon hareketlerini kısıtlayıcı her olayın histerisiz performansını arttırdığı,
- 45 RSD-C sertliğindeki yapılar karşılaştırıldığında en küçük histerisiz hatasının beynitik yapıda görüldüğü,
- Ön çevrimsel gerilme uygulanmasının ancak yumuşak numunelerin histerisiz hatasında iyileşme sağladığı,
- Ön sürünme zorlamasından histerisiz hatasının olumsuz yönde etkilendiği,
- Ön plastik şekil değişiminin histerisiz hatasının iyileşmesine neden olduğu,
- İnce taneli yapılarda histerisiz hatasının daha düşük elde edildiği belirtilmiştir.

Bu kaynaklarının dışında, farklı malzemelerde ve uygulamalarda malzemelerin histerisiz ve sürünme özelliklerini inceleyen çok sayıda makaleler mevcuttur. Bunlardan sonuçlar bölümünde hataların değerlendirilmesi kısmında bahsedilecektir.

5. ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLANMASI

Bu çalışmada, kuvvet dönüştürücülerde performansı etkileyen parametreler, bunların etki seviyeleri ve en iyi performans özelliklerinin hangi koşullarda sağlandığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bunun üzerine yapılan ön çalışmalarda, kuvvet dönüştürücü yay elemanın performans üzerinde önemli seviyelerde etkili olduğu tespit edilmiş ve bunun için uygun yay malzemesi olarak dönüştürücü üretiminde yaygın kullanılan 17-4PH çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik seçilmiştir. Bu malzeme üzerine yapılan kuvvet dönüştürücü çalışmaları araştırıldığında Allgeier'in 1994, 1995 ve 1998 yıllarında yapmış olduğu yayınlara rastlanmıştır. Allgeier çalışmalarında 15-5PH, 17-4PH ve 17-7PH çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler, yay malzemesi olarak kullanmış ve eğme türü kuvvet dönüştürücüler üzerinde çalışmıştır. 17-4PH malzeme üzerinde H900 durumu; 1000°C ve 1080°C de çözeltiye alma ve de RSOQ (Re-Solutioned Oil Quenched) ile RSGQ (Re-Solutioned Gas Quenched) isimli özel ısıl işlem prosedürü sonrası yine eğme zorlanmalı kuvvet dönüştürücünün histerisiz performansını elde etmiştir. RSOQ isimli ısıl işleminde; 1040°C'ye vakum ortamında parçayı ısıttıktan sonra 30 dakika beklemiş ve gaz ortamında soğutup, sıvı azot içerisinde 1 saat tuttuktan sonra parçayı azot atmosferinde 450°C'de ısıtıp 2 saat beklemiş ve yine gaz ortamında oda sıcaklığına parçayı soğutmuştur. RSGQ isimli ısıl işleminde ise; yine 1040°C'ye vakum ortamında parçayı ısıttıktan sonra 30 dakika beklemiş ve vakum içerisinde yağ ortamında soğutup, sıvı azot içerisinde 1 saat tuttuktan sonra parçayı azot atmosferinde 450°C'de ısıtıp 2 saat beklemiş ve yine gaz ortamında oda sıcaklığına parçayı soğutmuştur. Bunların sonucunda, H900 durumu ve çözeltiye alma ısıl işlemleri sonrası histerisiz değerleri yüksek olmasına karşın, uygulanan RSOQ ile RSGQ özel ısıl işlem prosedürleri sonucunda histerisiz değerleri çok düşük değerlere indiğini belirtmiştir. Ayrıca çalışmasında yaşlandırma ısıl işleminde 450°C'de 2 saat bekleme ile 480°C'de 1 saat bekleme arasında mukavemet ve sertlik olarak bir fark olmadığını ama histerisiz hatası yönünden 1. işlemin daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir. Ayrıca 17-4PH ve 15-5PH numunelerin

optik mikroskopla mikroyapılarını ve 15-5PH malzemesinin farklı ısıl işlemleri için birer adet TEM fotoğrafı incelemesini doktora çalışmasında vermiştir.

Fank'ın (2002) doktora çalışmasında ise kuvvet dönüştürücüsü yay malzemesi olarak AISI 4340 çelik kullanılmıştır. Kuvvet dönüştürücü performans kriterleri olarak tekrarlanabilirlik, doğrusallık, histerisiz ve sürünme hataları seçilmiş ve AISI 4340 malzemeye uygulanan ısıl ve mekanik işlemler sonrası farklı yapılar ve farklı sertliklerin etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmalar ışığında, öncelikle kuvvet dönüştürücü performans kriterleri olarak tekrarlanabilirlik, doğrusallık, histerisiz ve sürünme hatalarının incelenmesi gerektiğine karar verilmiştir. Daha sonra, 17-4PH paslanmaz çelik yay malzemesi için literatürde yer alan ısıl işlemlerin kuvvet dönüştürücü performans kriterleri üzerine etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla H900, H925, H1025 ve H1150 ısıl işlem prosedürlerinin numunelere uygulanmasına karar verilmiştir. Kuvvet dönüştürücülerin performanslarını daha da iyileştirebilmek için özel ısıl işlem şartları araştırılmıştır. Öncelikle Allgeier'in bulunduğu RSOQ ve RSGQ ısıl işlemleri vakum ortamında gerçekleştirilmeleri sebebiyle, uygulanması özel cihazlar gerektirmekte ve bu cihazların piyasada sayılı firmalarda bulunması bu ısıl işlemlerin uygulanmasını güçleştirmektedir. Bu ısıl işlemlere alternatif daha basit cihazlarla uygulanabilecek ısıl işlem prosedürleri geliştirilmesi planlanmıştır. Farklı ısıl işlem firmaları ile, bu malzemeyi kullanan farklı sektördeki firmalar ile ve metalurji ve malzeme mühendisi çeşitli kişilerle görüşmeler, tavsiyeler ve deneyimleri üzerine alınan bilgilerle denemeler gerçekleştirilmiştir. Denemeler sonucunda H450, Y450, G450 ve S450 ısıl işlem prosedürleri belirlenmiş ve kuvvet dönüştürücü performansları üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca, kuvvet dönüştürücü performansına etki eden iç yapıyı belirleyebilmek amacıyla, tüm numunelerin optik mikroskop, SEM, X-ışını ve TEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Deneysel Kuvvet Dönüştürücü Numunelerinin Hazırlanması

6.1.1. Kuvvet dönüştürücü tasarımı

Kuvvet dönüştürücüsü olarak üretilen deney numunelerinin tasarımından, dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılmasına ve kalibrasyonuna kadar uygulanan tüm işlemlere ait bilgiler burada belirtilecektir.

6.1.1.1. Kapasite ve boyutlandırma

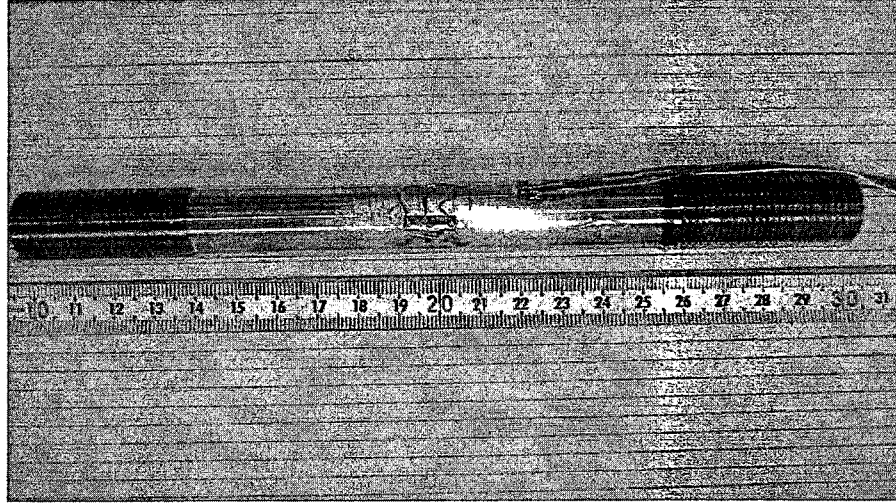
Kuvvet dönüştürücüsü tasarımındaki temel parametre olarak, dönüştürücünün kapasitesi yani çalışma koşullarda maksimum uygulanacak kuvvet veya yük gelmektedir. Kuvvet ölçümlerinde ve piyasadaki kantar uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir değer olduğu için bu çalışma kapsamında kapasite 100 kN (~10 tonf) olarak seçilmiştir. Bu değer seçilmesinin diğer nedenleri olarak, kuvvet standardı makinasında ölü ağırlıklarla oluşturulabilen kuvvet değerlerinin 100 kN ile sınırlı olması ve daha küçük kapasiteli seçilmesi durumunda yay elemanının boyutlarındaki küçülmenin dirençli uzama ölçer yapıştırılmasını zorlaştıracak olması gösterilebilir.

Sadece çekme zorlanması uygulanacak 17-4PH çeliği için literatürdeki elastiklik modül değeri kullanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır.

$$E= 197 \text{ GPa}$$

$$F= 100 \text{ kN (kuvvet dönüştürücünün nominal kapasitesi)}$$

$\epsilon= 1500 \text{ } \mu\text{m/m}$ (bu değer, dirençli uzama ölçerden en iyi performansın alınabildiği ve yorulma sınırı olarak kabul edilen bir değer olup aynı zamanda uzama ölçerin yapıştırıldığı yerde önerilen 1000-1700 $\mu\text{m/m}$ aralığının içinde kalmaktadır).



Şekil 6.1. Deneylede kullanılan bir kuvvet dönüştürücünün fotoğrafı

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \varepsilon \quad (6.1)$$

Hesaplanarak;

$A = 338\text{mm}^2$ (kuvvet dönüştürücü yay elemanının kesit alanı)

Buradan da;

$d = 20.74 \text{ mm}$. bulunmuştur.

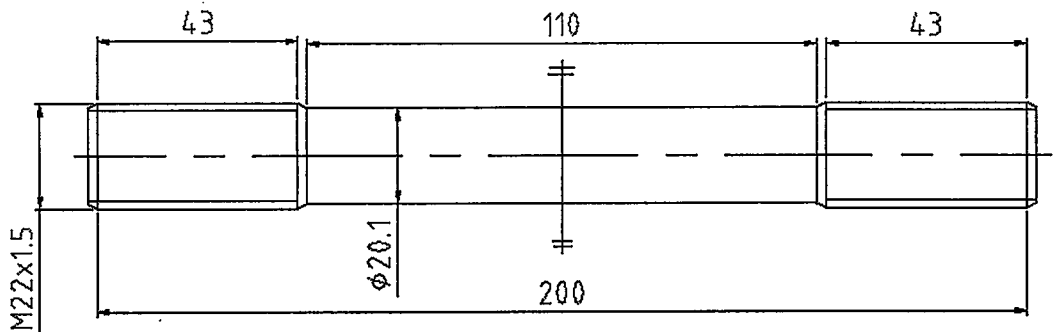
Buna göre, olası uç etkilerinden kaçınmak için ölçü boyu en az

$L = 5 \cdot d$

olarak alınacak olursa,

$L = 103.8\text{mm}$. olmalıdır.

Bu boyutlandırmaya göre yapılan tasarıma ait detaylar Şekil 6.2’de verilmiştir. Taşlama sonrası çap ölçüsü 20.1 mm olarak elde edilebilmiştir. Bu çapa karşılık gelen birim şekil değişimi miktarında önemli bir değişikliğin olmadığı ve $\varepsilon = 1601 \mu\text{m/m}$ değerini aldığı görülmüştür.



Şekil.6.2. Deneylede kullanılan kuvvet dönüştürücü yay elemanının boyutları

6.1.1.2. Yükleme şekli

Yükleme şekli, yükün veya kuvvetin uygulama şeklini belirten kuvvet dönüştürücüsü tasarımında belirleyici olan bir diğer önemli parametredir. Bu çalışmada yükleme şekli, sadece çekme yönünde ve statik yükleme olarak seçilmiştir. Bunun çeşitli nedenleri olup kısaca şöyle özetlenebilir:

- a) Basma modunda kolon türü üretilen kuvvet dönüştürücü yükleme sırasında noktasal yük uygulanmasına olanak verecek küresel başlı eleman ve bunun başlığına gereksinim duyar.
- b) Basma türü kuvvet dönüştürücüyü kuvvet makinasına yerleştirirken makinanın tablasına tam olarak merkezlemek gerekmektedir. Merkezden olan kaçıklık ise ölçüm sonuçlarına doğrudan yansımaktadır. Çekme türü kuvvet dönüştürücülerde ise küresel yataklı çekme aparatları ile merkezleme tam olarak ve kendiliğinden gerçekleştirilebilmektedir.
- c) Kalibrasyon sırasında kuvvet dönüştürücünün yük eksenini ile kuvvet makinasının yüklemeye eksenini üst üste çakışmalıdır. Aksi takdirde olası eğilme momenti nedeniyle ölçüm sonuçları etkilenecektir.
- d) Basma modunda kolon türü üretilen bir yay elemanını kuvvet dönüştürücü şeklinde oluşturup yüklemeye yapılabilecek konuma getirebilmek için ek parçalara gereksinim duyulmaktadır. Öncelikle, kolonun üzerine oturup bağlanacağı bir tabla, kolonun yüklemeye sırasında sağa-sola eğilmemesi için dairesel bir diyafram ve bu diyaframı destekleyecek tablaya bağlı bir gövde gerekmektedir.
- e) Son olarak çekme modunda üretilen kuvvet dönüştürücüler tek parçalı olduğu için üretim kolaylığı vardır.

6.1.1.3. Yay elemanı türü

Dönüştürücünün kapasitesi, yüklemeye şekli ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak yay elemanı türü seçilmektedir. Bu çalışmada, üretimin kolay olması, dirençli uzama ölçerlerin kolay uygulanabilmesi ve kuvvet standardı makinasına kolay takılıp olası

merkezleme problemlerinin yaşanmaması nedeniyle çekme modunda çalışacak kolon türü yay elemanı tercih edilmiştir.

6.1.1.4. Çalışma sıcaklığı

Yay malzemesi seçim kriterlerinde de bahsedildiği gibi belirleyici olan bir diğer parametre de, dönüştürücünün kullanım ortamındaki çalışma sıcaklık aralığıdır. Bu deneyler sırasında üretilen dönüştürücülerin oda sıcaklığında kullanılacağı kabul edilmiştir. Numunelerin hazırlandığı ve deneylerin yapıldığı UME Kuvvet ölçümleri laboratuvarı $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de çalışan bir klima sistemine sahip olup, sıcaklık bir kalibrasyon işlemi boyunca en fazla sıcaklık değişimi ± 0.2 ile 0.3°C olacak şekilde sıcaklık kontrol edilmektedir. Bu da, numuneler arasında sıcaklık farkından doğabilecek hataları ve farklı sinyal alınmasını engellemektedir. Ayrıca kullanılan dirençli uzama ölçerler belirli sıcaklık kompanzasyonu yapabilme özelliğine sahiptir. Kullanılan dirençli uzama ölçerlerin sıcaklık kompanzasyon numarası olan (06) 17-4 PH çeliğine uygun olarak, ilgili tablolardan özel olarak seçilmiştir (Bergqvist, 1986 – Measurements Group katalog). Bu kompanzasyon numarası, 17-4 PH çeliğinin ısı genleşme katsayısına göre uygun bir kompanzasyon sağlayarak sıcaklığın olası olumsuz etkilerinin en alt düzeye indirilmesini sağlamaktadır.

6.1.1.5. Yay elemanının talaşlı imalatı

Yukarıdaki anlatılan esaslara göre tasarlanan kuvvet dönüştürücülerin talaşlı imalatları son işlem olarak gerçekleştirilir. Torna tezgahında numunelerin dirençli uzama ölçer yapışacağı kısım toleranslı olacak şekilde imalatı gerçekleştirilir. Sonra belirlenen ısı işlemler ve en son olarak taşlama işlemi yapılır. Bu bölümün yay malzemesi kısmında talaşlı imalattan tekrar bahsedilecektir.

6.1.1.6. Kullanılan dirençli uzama ölçerler

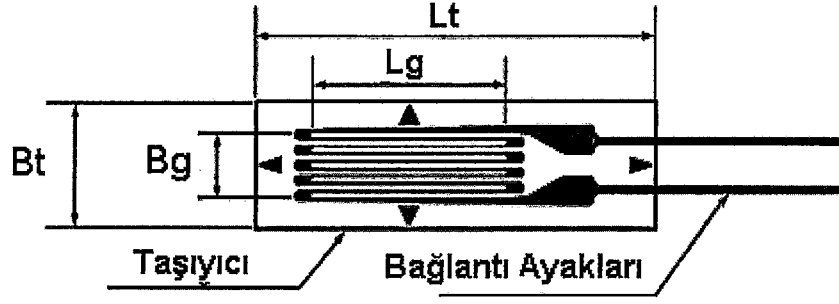
Bu çalışmada, 17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemesine en uygun olan Measurement Group tarafından üretilen “Dönüştürücü Sınıfı (Transducer-Class)” N2A-06-S053P-350 tipi dirençli uzama ölçerler kullanılmıştır (Measurements Group katalog).

Dönüştürücü sınıfı dirençli uzama ölçerler, dönüştürücü uygulamaları için özel olarak tasarlanmış ölçme ızgarasına sahiptir. Deneylerde kullanılan N2A serisi dirençli uzama ölçerlerin sahip olduğu genel özellikler şu şekilde sıralanmaktadır:

- a) Konstantan alaşımından oluşan metal ızgara, ince polimid film taşıyıcı üzerine işlenmiştir,
- b) Düşük ve tekrarlı sürünme (kuvvet dönüştürücü elektriksel çıkışında sabit yük altında zaman içinde oluşan değişim) performansına sahiptir,
- c) Sağlam yapıya sahip olmaları nedeniyle yapıştırma sırasında oluşabilecek hasarlar en alt düzeye indirilmiştir,
- d) Hassas statik ölçümlerde sıcaklık aralığı – 75 ile +95 °C ‘dir,
- e) Yorulma ömrü $\pm 1700 \mu\epsilon$ ‘da 10^6 çevrimdir. Tek ekseninde $1500 \mu\epsilon$ ‘da ise 10^7 çevrimdir.

Bu uygulamalarda kullanılan N2A-06-S053P-350 tipi dirençli uzama ölçerin teknik özellikleri ise şu şekilde tanımlanmaktadır:

■ Tasarım	: 90° açı ile iki adet ızgara
■ Yapıştırılacağı malzeme	: Çelik
■ Ölçme ızgaralarının malzemesi	: Konstantan
■ Ölçme ızgaralarının uzunluğu (Lg)	: 2.54 mm
■ Ölçme ızgaralarının genişliği (Bg)	: 2.54 mm
■ Taşıyıcı uzunluğu (Lt)	: 10.54 mm
■ Taşıyıcı genişliği (Bt)	: 3.30 mm
■ Direnç	: 350 Ω
■ Dirençteki tolerans	: \pm % 0.2
■ İzin verilen en çok besleme gerilimi	: 15 V
■ k-faktörü:	: 2.08



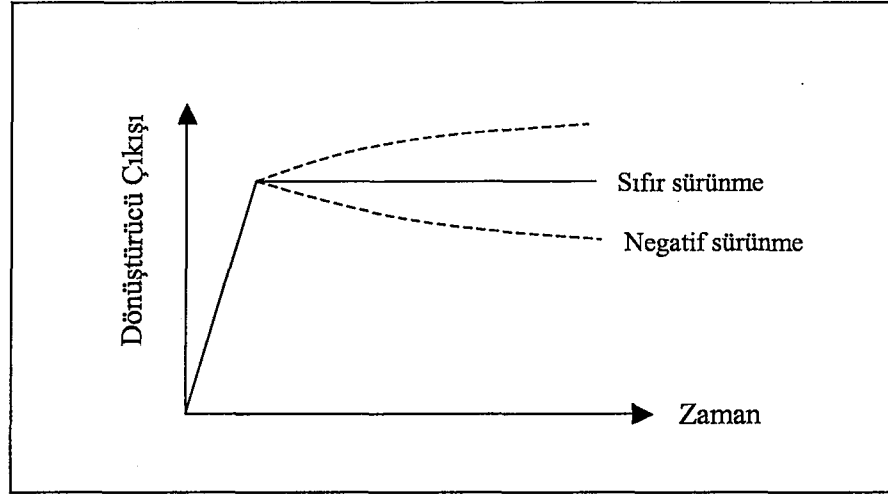
Şekil 6.3. Dirençli uzama ölçer boyut parametreleri

Dönüştürücü sınıfı uzama ölçerler metal ızgarasını üzerinde bulunduran taşıyıcı plastik olduğu için kuvvet dönüştürücülerde sürünmeye neden olan ve artıran en önemli etkenlerden biridir. Farklı taşıyıcı kalınlıkları, farklı sürünme davranışına neden olacağı için uzama ölçerlerin taşıyıcı kalınlıklarının hassas toleranslarda üretilmesi önemlidir. Dönüştürücü türü dirençli uzama ölçerler optimum taşıyıcı kalınlık toleransına sahip oldukları için sürünme değişimleri en aza indirilmiştir (Measurements Group katalog).

Dirençli uzama ölçerlerin üzerinde, kenar orta noktalarını gösteren minik ok şeklinde merkezleme çizgileri bulunmaktadır (Şekil 6.3). Bu merkezleme çizgileri, yay malzemesi üzerine dirençli uzama ölçerler yapıştırılırken eksenlerin çakışması yardımı ile iyi konumlamayı sağlamaktadır. Bu sayede, dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılması daha kolay olmakta, harcanan zaman azalmakta ve doğru bir yerleştirme sağlanacağı için buna bağlı olabilecek ölçüm hataları azaltılmış olmaktadır.

Tüm kuvvet dönüştürücülerinin en düşük sürünme değerine sahip olması istenir. Bu seviyeyi sağlamak için uzama ölçerlerin sürünme özelliği ile yay elemanının sürünmesini eşleştirmek gerekmektedir. Dönüştürücü sınıfı uzama ölçerlerin çoğu yük altında negatif veya pozitif sürünme gösterecek şekilde ayarlanabilmekte olup bu durum şematik olarak Şekil 6.4'te görülmektedir. Yay elemanı malzemesi yük altında genellikle pozitif sürünme göstermekte, dirençli uzama ölçerler ise negatif sürünme göstermektedirler. Bu nedenle, dirençli uzama ölçerler yay elemanı malzemesinin sürünmesine göre kompanzasyon sağlayacak şekilde özel olarak üretilmektedir. Dönüştürücünün sürünmesi yay elemanı malzemesi, uygulanan ısıl işlem, dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılacağı bölgedeki birim şekil değişimi alanı, yapıştırıcı türü ve

deney sıcaklığı gibi birçok değişkene bağlı olduğu için bu değer yapılıcak deneylerle belirlenmesi gerekmektedir. Bu şekilde sürünme kompanzasyonu sağlanarak iyi bir sürünme sonucu elde edilmesi olanağı vardır.



Şekil 6.4. Kuvvet dönüştürücülerde görülen sürünme çeşitleri (Measurements Group katalog)

Uzama ölçerler için çeşitli sürünme kompanzasyon kodları vardır ve uygulamanın türüne göre ve önceden yapılmış deneylere göre hangi türdeki sürünme kompanzasyon kodunun uygulanacağı belirlenmekte ve en azından bir dönüştürücü için % 0.1'lik bir sürünme hatası sağlanabilmektedir. Daha yüksek bir sürünme, zayıf (akma mukavemeti düşük) bir yay elemanı malzemesinin seçildiğine veya uygun olmayan bir uzama ölçer yapılandırıldığına işaret etmektedir (Measurements Group katalog). Söz konusu uzama ölçerler sürünme kompanzasyonu sağlayacak şekilde ön deneylerden geçirilen ve farklı ısıl işlem uygulanmış kuvvet dönüştürücülere göre özel olarak üretilebilmektedir. Bu durum, özellikle seri imalat yapan kuvvet dönüştürücü firmaları için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, fazla sayıda ve toplu bir üretim ile kuvvet dönüştürücü üretilmediği ve ekonomik olmadığı için sürünme kompanzasyonu gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle tüm özellikleri aynı olan uzama ölçerler seçilerek en düşük sürünmeyi verecek malzeme özelliği belirlenmeye çalışılmıştır.

6.1.1.7. Dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılma ortamı

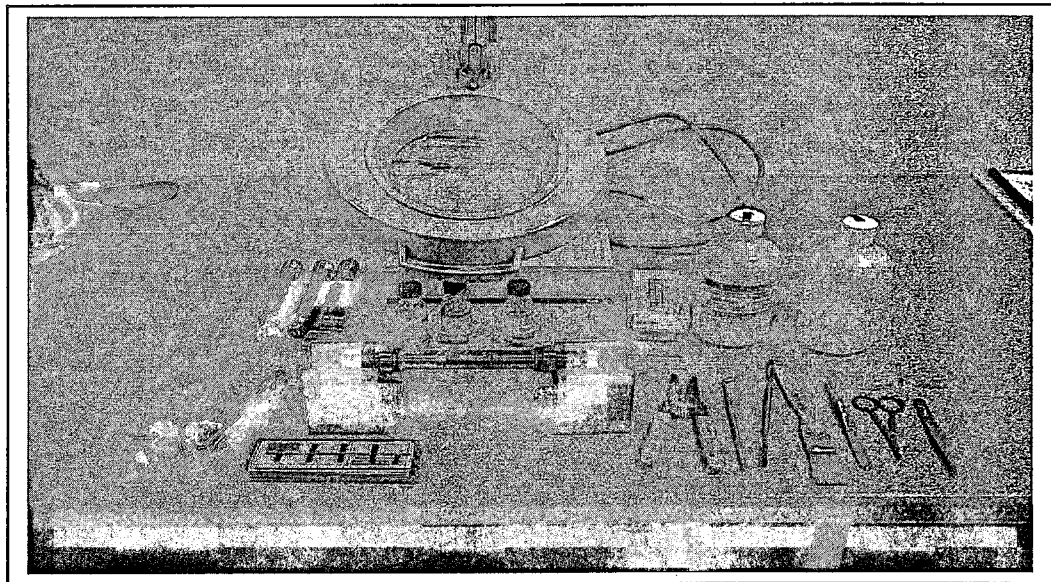
Dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılacağı ortam tozsuz olmalı, bunun içinde ortama filtrelenmiş tozsuz ve yağ buharı olmayan hava gönderilmelidir. Işık seviyesi

iyi aydınlatılmış ofis ışığı şiddetinde (yaklaşık 1600 Lümen/m²) olmalıdır. İdeal ortam sıcaklığı 24±2 °C nem ise 45±5% olmalıdır. Ortamda bulunan malzemelerin ortamın koşullarını değiştirmemesi için yağsız ve temiz olması, ortamda yağ buharı oluşturacak herhangi bir işlem yapılmaması gerekmektedir (Technical Note, 1978 - Hoffmann, 1984). Bu nedenle bu malzemeler dışarıda iyice temizlendikten sonra ortama alınmalıdır. UME Kuvvet ölçümleri laboratuvarında gerçekleştirilen tüm yapıştırılarda istenen ortam koşullarının sağlanmasına özen gösterilmiştir.

6.1.1.8. Dirençli uzama ölçer yapıştırma işlem kademeleri

Dönüştürücüler için dirençli uzama ölçerlerin yapıştırma işleminin özen ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Aksi durumda yapılacak hataların önceden gözle algılanması çok zor olmakta ve ancak kullanım sırasında performans problemleri olarak ortaya çıkmaktadır.

Çalışmada dönüştürücü türü dirençli uzama ölçerlerin yay elemanına yapıştırılması özel bir prosedür çerçevesinde gerçekleştirilmiş ve kullanılan işlemler sırasıyla aşağıda açıklanmıştır (Technical Note, 1978). Bu işlemlere deney numunelerine dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılması sırasında adım adım uyulması, istenilen verimin alınabilmesi, dirençli uzama ölçer ve yapıştırmadan gelebilecek hataların en aza indirilebilmesi açısından önem verilmelidir. Şekil 6.5'te yapıştırma aşamasında kullanılan malzemeler; temizleyiciler, yapıştırıcı, büyüteç, yardımcı malzemeler ve deney numunesi görülmektedir.



Şekil 6.5. Deney numunesi ve dirençli uzama ölçer yapıştırma malzemeleri

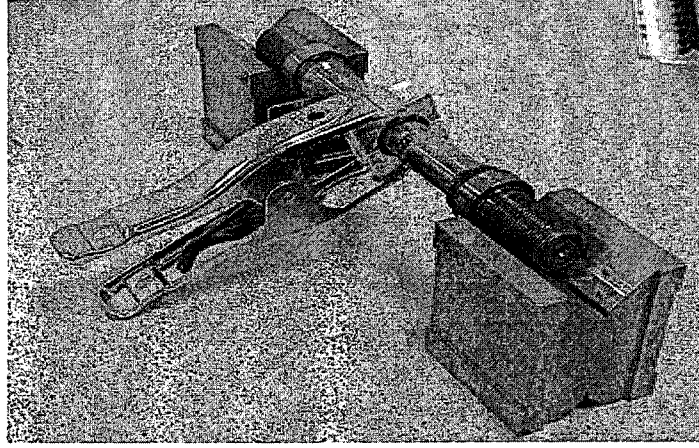
Dönüştürücü yay malzemesi yüzeyine dirençli uzama ölçerleri yapıştırmak için uygulanan işlemler sırasıyla şunlardır:

- 1) Dönüştürücü yay malzemesinin dirençli uzama ölçer yapıştırılacak kısmı öncelikle etil alkol ile temizlenir.
- 2) Temizlenip kurulandıktan sonra dirençli uzama ölçer yapıştırılacak alan 220 ve/veya 320 mesh numaralı zımparalar ile yüzeyde pürüzlük oluşacak şekilde zımparalanır.
- 3) Zımparalama işleminden sonra son temizlik için ultrasonik banyoya alınması önerilmekle birlikte bu olanak UME'de olmadığı için zımparalamadan sonra yüzeylerin etil alkol ile iyice temizlenmesi tercih edilmiştir.
- 4) Temizleme işleminden sonra yüzeyin oksitlenmemesi için yapıştırma işlemi olabildiğince çabuk gerçekleştirilmelidir. Bu süre literatürde yay malzemesi olarak kullanılan çelikler için en çok iki saat olarak önerilmektedir.
- 5) Dirençli uzama ölçerin yük eksenine tam olarak paralel yapıştırılması gerektiğinden dolayı yapıştırma yüzeyi üzerine çok hafif dikey ve yatay çizgiler çizilerek dirençli uzama ölçerin bunlara tam dik olarak yapışması sağlanmalıdır. Bunun için yapıştırma yüzeyi mürekkepsiz bilya uçlu kalem ile temiz ve çok ince olarak çizilmiştir. Özellikle yay elemanları üzerine çizilen ince çizgilerin herhangi bir gerilme konsantrasyonu oluşturmaması ve çizilen yerde pislik birikip yapıştırma kayıplarına neden olmamasına özen gösterilmelidir.
- 6) Yüzey tekrar etil alkol ile sonra da Measurements Group firmasına ait conditioner A ve nötralizer 5 adı verilen temizleyiciler ile temizlenip; her seferinde toz bırakmayan bezler yardımı ile silinir.
- 7) Dönüştürücü sınıfı dirençli uzama ölçerler paketinden bir cımbız aracılığıyla alınıp önceden temizlenmiş cam bir yüzey üzerine yerleştirilmiştir.
- 8) Dirençli uzama ölçerin üzeri *Mylar tape* olarak isimlendirilen ve kurutma sırasında uygulanan sıcaklığa dayanabilen bir bantla kapatılmıştır.
- 9) Dirençli uzama ölçer bantla birlikte, yüzeyden kaldırılıp önceden işaretlenmiş olan yere taşınarak ve yapıştırıcı sürülmeden önce yerleşeceği tam pozisyon ayarlanmıştır.

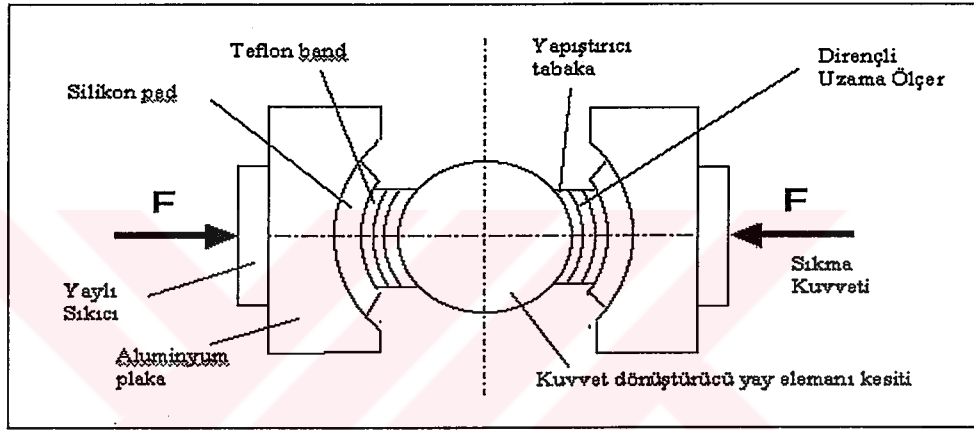
- 10) Bant kaldırılarak dirençli uzama ölçerin arka yüzeyine M-bond 610 isimli yapıştırıcı kendi fırçası yardımı ile sürülmüştür. M-bond 610 yapıştırıcının tercih edilmesinin nedeni, dönüştürücü uygulamaları için çok yaygın olarak kullanılması ve yüzeyde çok ince bir tabaka oluşturmasıdır. Bu durum özellikle sürünmesiz (creep-free) bir yapıştırma sağlaması açısından önemlidir (Technical Note, 1978 - Hoffmann, 1984)
- 11) Yapıştırıcının havada 25 °C sıcaklık ve % 50 nemde 5-30 dakika arasında kuruması önerilmektedir. Daha düşük sıcaklık ve nemde ise daha uzun süre beklenmesi gerekmektedir.
- 12) Bekleme süresi sonunda dirençli uzama ölçer yerleştirileceği pozisyona bant yardımı ile konumlanır ve bir sonraki işlem olan sıkma (basınç uygulama) aşamasına gelinir.

Kurutma işleminden önce, yapıştırma işleminin bir kademesi olarak, dirençli uzama ölçerin yüzeyine belirli bir düzgün dağılmış (üniform) basınçta sıkma uygulanır. Bu basınçın, dirençli uzama ölçerdeki gerilme durumunu ve yapıştırıcı kalınlığını kontrol etmek açısından önemi büyüktür. Yapıştırma sırasında uygulanacak basıncın M Bond 610 yapıştırıcı için 300-400 kPa (3-4 bar) civarında olması önerilmektedir. Hesaplama, uygulanan kuvvetin dirençli uzama ölçer üzerine sırayla koyulan elemanlardan yüzeye temas eden plastik ped alanına basitçe bölünerek yapılmaktadır (Technical Note, 1978).

Gerekli basıncı sağlayacak kuvveti oluşturmak için ölü ağırlıklar, yaylı ve vidalı sıkıcılar, basınçlı hava kontrollü pnömatik sıkıcılar ve manivelalı sıkıcılardan veya benzer sistemlerden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada, Şekil 6.6'da fotoğrafı Şekil 6.7'de ise şematik gösterimi verilen uzama ölçerlerin ve yapıştırıcının da imalatçısı olan Measurements Group firmasının yaylı sıkıcısı kullanılmıştır. Tüm numunelerde aynı yaylı sıkıcı kullanılmıştır. Bu yaylı sıkıcının baskı kuvvetleri kalibreli bir kuvvet dönüştürücü ile kontrol edilmiştir. 40 mm ağız açıklığında yaylı sıkıcının 84 N'luk baskı kuvveti oluşturduğu saptanmıştır. Dirençli uzama ölçerlere uygulanan basıncın 300-400 kPa aralığında olması önerildiğinden 350 kPa basınca göre pedlerin alan hesaplamaları yapılmıştır. 84 N baskı kuvvet oluşturan yaylı sıkıcı için kullanılacak pedin alanı 240 mm^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.6.Dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılmasında kullanılan yaylı sıkma düzeneği



Şekil 6.7. Dirençli uzama ölçerlerin numune üzerine yapıştırılması sırasında oluşan tabakalar ve işlemi gösteren şematik resim

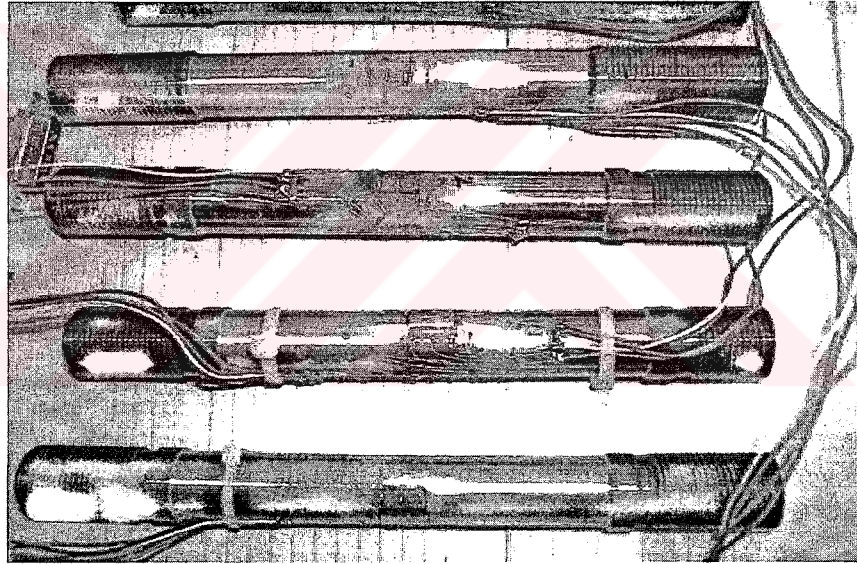
Yapıştırılma ve sıkma işlemlerini takiben dirençli uzama ölçerlere kurutma işlemi uygulanır. Kurutma işlemi, uygun yapıştırıcı kalınlığının elde edilmesi, kabarcık oluşmaması ve dolayısıyla iyi bir performans sağlanması açısından çok önemlidir. Kurutma işlemi için gerekli 175°C 'lik sıcaklığa fırında $10^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızı ile çıkılmıştır. Hızın çok yavaş olması durumunda düzgün olmayan bir yapıştırıcı kalınlığı elde edilmekte, hızın çok yüksek olması durumunda ise kabarcık oluşumu görülmektedir (Technical Note, 1978 - Hoffmann, 1984). Ön kurutma işleminde 175°C 'de 1 saat bekletilen parçaların sıkma elemanı sökülmeden önce önerildiği gibi parça sıcaklığının 55°C 'ye düşmesi beklenmiştir.

Yapıştırma sırasında sıkma kuvvetinden dolayı ve sıkma aparatlarının ön kurutma işleminde sökülmemesinden dolayı, dirençli uzama ölçer üzerinde bir miktar artık gerilme kalmaktadır. Bunu yok etmek için sıkma elemanları söküldükten sonra üretici tarafından da önerilen son kurutma işlemi uygulanmıştır. Son kurutma

işleminde sıkma elemanları sökülüp numune 215°C sıcaklıktaki fırın içinde 2 saat bekletilmiş ve sonra fırından çıkartılıp havada soğutulmuştur.

Dirençli uzama ölçerin elektriksel bağlantısını sağlayabilmek amacıyla, dirençli uzama ölçerin bağlantı uçlarının, dönüştürücünün yüzeyine tutturulmuş bağlantı noktasına lehimleri yapılır. Bağlantı noktasından da kablolar yardımıyla bağlantı jackına taşınır ve buradan gösterge elemanına yapılan bağlantı ile giriş ve çıkış sinyalleri elde edilir.

Son işlem olarak, Measurements Group firmasının havadaki rutubet, yağ ve kimyasal çözücülerin ve elin uzama ölçere temasını önlemek amacıyla geliştirmiş olduğu M-Cover A kodlu katkısız ve saydam silikon reçinesi, koruyucu olarak bütün yüzeye uygulanır. Şekil 6.8’de tüm işlemleri tamamlanmış numuneler görülmektedir.



Şekil.6.8. Tüm işlemleri tamamlanmış ve ölçümlere hazır hale getirilmiş numuneler

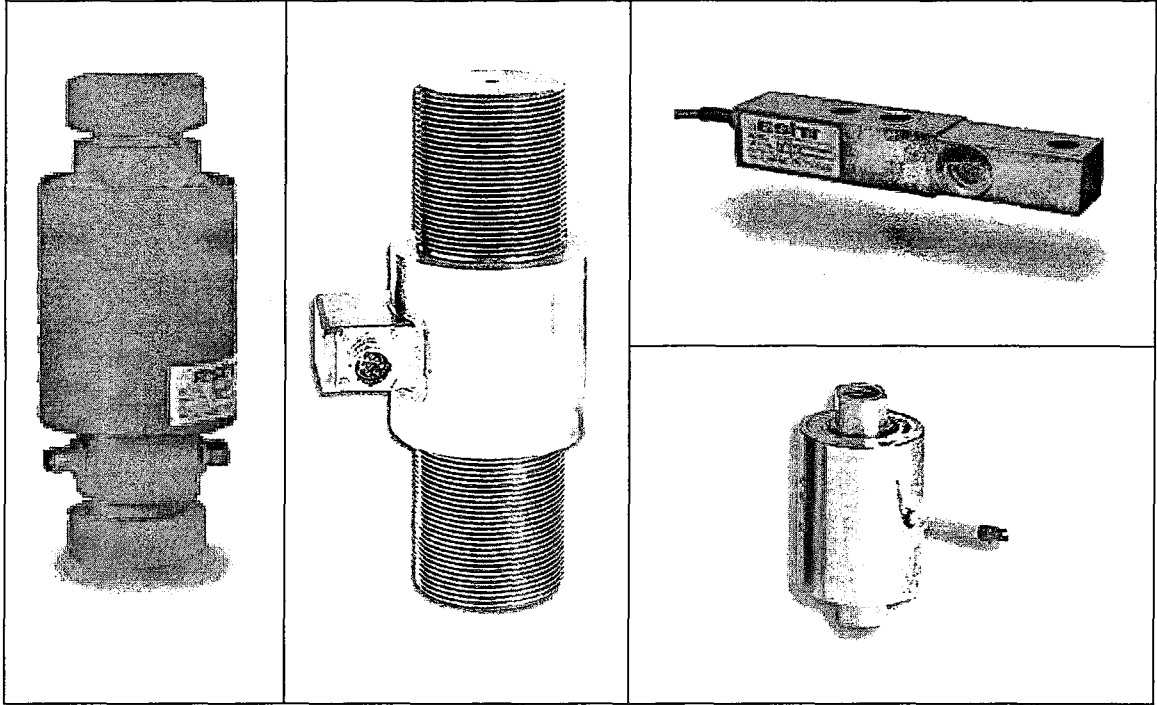
6.1.2. Yay malzemesi ve uygulanan işlemler

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemeler ilk olarak 1940’da uzay ve havacılık malzemesi olarak geliştirilmiştir. Daha sonra denizcilik ekipmanlarında, güç santrallerinde ve son yıllarda da kuvvet dönüştürücülerde yay malzemesi olarak kullanım alanları bulunmaktadır (Allgeier, 1994). Bu çelikler kuvvet ölçme cihazlarının yay elemanı malzemesi olarak ideal özellikleri bünyesinde bulundurmaktadır (Measurements Group Yayını, 1988). Yay elemanı malzemesi olarak; yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olmalarının yanında işlenmesi de zor

değildir. Bunun yanısıra, genellikle 600°C'nin altında basit ısıtılma işlemi gerek duymaları, iyi bir korozyon direncine sahip olmaları, kaynak edilebilmeleri ve genellikle vakum veya elektro-eritme yöntemi ile üretilmeleri nedeniyle daha hassas kimyasal özelliklerinin kontrolü olanağının bulunması diğer üstünlükleri olarak sıralanabilir. Sınırlaması olarak ise ısıtılma iletkenliğinin kötü olması gösterilebilir.

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler; martenzitik, yarı ostenitik ve ostenitik olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Yay malzemesi olarak kullanılan 17-4PH çeliği martenzitik çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik grubunda yer alır. Bu çelik, grupta en eski ve yaygın kullanılanlarından birisidir (Perry ve Jasper, 1977).

Bölüm 2'de verilen kuvvet dönüştürücü yay elemanı malzemesi seçimi için genel kriterlerin değerlendirildiği Tablo 2.2'ye göre 17-4PH çelik malzemesi yüksek elastikiyet modüllü malzemeler grubunda yaygın kullanılan çelik malzemelerdendir. 17-4PH çelik yay malzemelerinden beklenen önemli özelliklerden olan histerisiz, doğrusallık ve sürünme kriterlerinden yüksek bir puan olan 7 notuna; maliyet kriterine göre ise çeliklere göre fiyatının yüksek olması nedeniyle, AISI 4140 ve AISI 4340 az alaşımlı çelikleri 9 ve 8 notlarına sahipken 17-4PH malzemesi 6 notu ile değerlendirilmiştir. Talaşlı işlenebilirliği ve kaynak ve lehimlemeye uygunluğu az alaşımlı çeliklere göre daha iyi olup 6 ve 7 notu ile gösterilmiştir. 17-4PH çeliğinin korozyon direnci ve sertleştirme işlemi sonrası çarpılma değerlendirmelerinde az alaşımlı çeliklere göre belirgin üstünlüğü yay malzemesi olarak yaygın kullanılmasının nedenlerindedir. Sertleştirme sonrasında çarpılma değerlendirmesinde 17-4PH çelik 8 notuna sahipken, az alaşımlı çelikler ancak, 3; korozyon direncinde ise 7'ye karşılık 1 notu almışlardır. Buna karşın, tüm çelik malzemelerin ortak sorunu olan, ısıtılma iletkenliklerinin düşük olması nedeniyle diğer çelikler gibi 2 notu ile değerlendirilmiştir. Tüm bu değerlendirmeler sonucunda 17-4PH çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzeme kuvvet dönüştürücülerde yay malzemesi olarak yaygın kullanılanlardan birisidir. Çeşitli firmalara ait 17-4PH paslanmaz çelik malzemedan üretilmiş birkaç farklı türdeki kuvvet dönüştürücülerin resimleri Şekil 6.9'da verilmiştir.



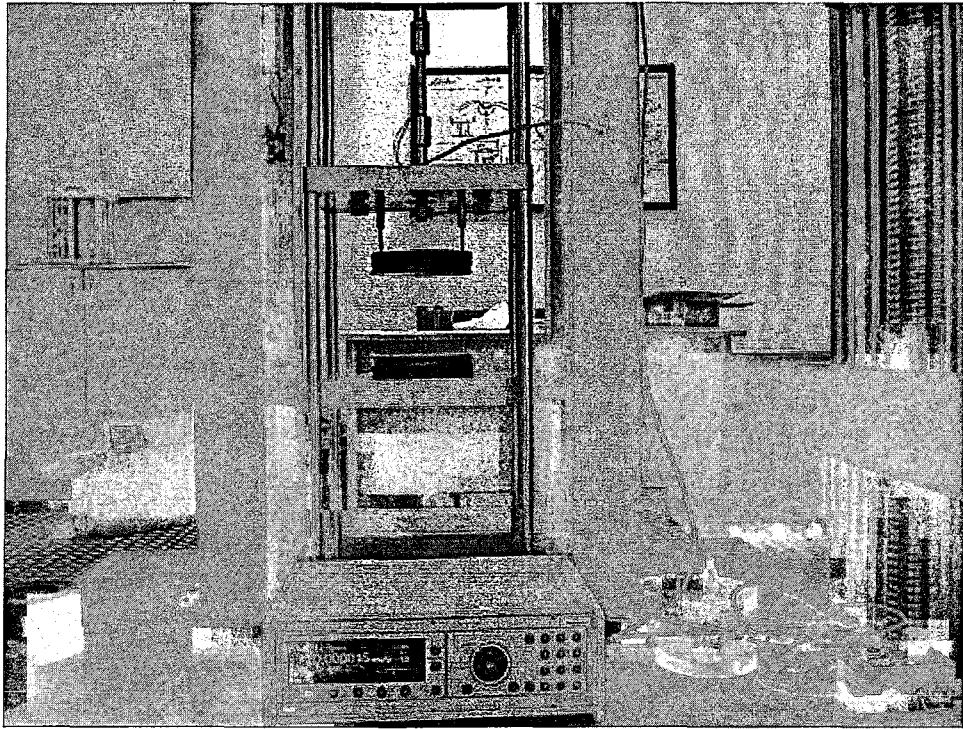
Şekil 6.9. Çeşitli firmaların paslanmaz çelik malzeme kullanılarak üretilmiş farklı türlerdeki kuvvet dönüştürücülerinin resimleri

6.1.2.1. Numunelerin üretimi

Tüm numuneler, ısıl işlem sonrası herhangi bir şekil değişimi olmaması için çözeltiye alma ısıl işleminden sonra talaşlı işlenerek arzu edilen boyuta getirilmişlerdir. Tüm numuneler Şekil 6.2’de verilen numune boyutlarında işlenmiştir. Numunelerin torna tezgahında orta çapları 20.3 mm’ye düşürülmüş, daha sonra tüm numunelerde eşit çap elde edebilmek için dirençli uzama ölçerlerin yapılandırılacağı 110mm’lik orta gövde çaptan 0.2mm’lik silindirik taşlama yapılmış ve Şekil.6.2.’deki gerçek boyutlarına getirilmiştir. Bu şekilde oluşabilecek artık gerilmelerin en alt düzeye indirilmesine çalışılmıştır.

6.1.3. Deney numunesi performanslarının ölçülmesi

Bölüm 2’de anlatılan kalibrasyon yöntemine göre, hazırlanan tüm numunelerin performansları ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasında aynı yükleme koşullarında, (yükleme hızı, yükleme zamanı, uygulanan kuvvet değerleri ve zamanı, kullanılan çekme aparatları vb.) otomatik sistem aracılığıyla belirlenmiştir. Deney numunelerinin kuvvet makinasına ve gösterge elemanına bağlantısı Şekil 6.10’da görüldüğü şekilde yapılmıştır.



Şekil 6.10. Numunelerin kuvvet makinasına ve gösterge elemanına bağlantısı

6.2. Deneysel Kuvvet Dönüştürücülere Uygulanan Isıl İşlemler ve İç Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi

6.2.1. Deney numunelerine uygulanan ısıl işlemler

Çalışmada, kimyasal bileşimi Tablo.6.1’de verilen 17-4PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik kullanılmıştır.

Tablo.6.1. 17-4 PH çeliğinin kimyasal bileşimi

17 – 4 PH	Standart Bileşim*	Deney Numunesi Bileşimi**
C	En çok 0.06	0.05
Cr	15.0 - 17.5	16.40
Ni	3.0 - 5.0	4.14
Mn	En çok 1.0	0.64
Si	En çok 1.0	0.50
P	En çok 0.04	0.02
S	En çok 0.03	0.02
Nb	0.15 - 0.45	0.40
Cu	3.0 - 5.0	3.34
Mo	En çok 0.50	0.23

* Metals Handbook (1998)’tan alınan bileşim
 ** Spektrometre ile saptanan bileşim

Bu tür çelikte, çökeltme sertleşmesi mekanizması genel olarak bilinen alüminyum alaşımlarındaki sisteme benzerdir. Malzeme veya yapı tek fazlı bölgeye kadar ısıtılır ve içindeki çökeltme parçacıkları ergiyik durumuna gelinceye kadar beklenir, sonra iki fazlı bölgeye hızla soğutulur. Hızlı soğuma denge halinde görülen faz ayrışmasını önler ve böylece aşırı doymuş katı ergiyik elde edilir ve bu işleme çözeltiye alma ısıl işlemi de denir. Bu işlem 17-4PH malzemesi için genellikle 1040 - 1080°C'de malzemenin boyutuna bağlı olan bir zaman süresi ile yapılır ve bu işlemden sonra havada 32°C'nin altına soğutma ile martenzit oluşumu gerçekleşir (AMS 5643P, 1999). Sonuçta, martenzitik bir yapı içerisinde C, Cu ve Nb aşırı doymuş katı çözelti durumuna geçer. Malzeme oldukça gevrek ve sertliği yaklaşık 35 HRC civarındadır (Allgeier, 1994). Çözeltiye alma işlemi takiben havada soğutma işlemi uygulanmış çeliğe Durum A (condition A) adı verilir. 17-4 PH çelikler, genellikle fabrika üretiminden sonra piyasada bu durumda elde edilirler.

Tablo 6.2. 17-4PH Martenzitik tip çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklere uygulanan çökeltme sertleştirmesi ısıl işlemleri (Perry ve Jasper, 1977 - Chandler, 1998 - Kattus, 1978).

Koşul Adı	Uygulanan Sıcaklık		Bekleme Zamanı (saat)	Soğutma Şekli
	°F	°C		
H 900	900	480	1	Havada
H 925	925	495	4	Havada
<i>H 950</i>	<i>950</i>	<i>510</i>	<i>4</i>	<i>Havada</i>
<i>H 1000</i>	<i>1000</i>	<i>540</i>	<i>4</i>	<i>Havada</i>
H 1025	1025	550	4	Havada
<i>H 1050</i>	<i>1050</i>	<i>565</i>	<i>4</i>	<i>Havada</i>
H 1075	1075	580	4	Havada
H 1100	1100	595	4	Havada
H 1150	1150	620	4	Havada
<i>H 1150M</i>	<i>1400</i>	<i>760</i>	<i>2</i>	<i>Havada</i>

Bu işlemi takiben yaklaşık 480° - 620°C sıcaklıkları arasında yaşlandırma ısıl işlemi uygulanır. Bu ısıl işlem ile paslanmaz çelikte martenzitik malzeme yapısının içerisinde Cu çökelti tanecikleri oluşur ve malzemenin mukavemetinde (çökeltme sertleşmesi sonucunda) artışa neden olur (Hsiao, 2002; Allgeier ve Evans, 1995; Murayama vd., 1998; Habibi-Bajguirani, 2002; Habibi-Bajguirani ve Jenkins, 1996;

Nakagawa vd., 2000) . Malzemeye uygulanan sıcaklık değerine göre bu işleme Tablo 6.2’de gösterildiği gibi bir durum adı (H900, H925, vb.) verilir (Perry ve Jasper, 1977 - Chandler, 1998 - Kattus, 1978). Tablo 6.2’de italik karakterlerle yazılmış olan H950, H1000, H1050 ve H1150M isimli ısıtım işlemleri literatürde yer almasına karşın nadiren kullanım alanına sahiptirler. Bu ısıtım işlemlerinden en yaygın tercih edilenlerinden H900 ısıtım işlemi sonrasında 17-4 PH çökelme sertleştirilmeli paslanmaz çelik çubuk malzeme ile AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri Tablo 6.3’te verilmiştir. (Metals Handbook, 1998).

Tablo 6.3. AISI 304 (18Cr-8Ni) paslanmaz çelik ile 17-4 PH çökelme sertleştirilmeli paslanmaz çeliğinin H900 ısıtım işlemi sonrası malzemenin mekanik özellikleri (Metals Handbook, 1998).

Malzeme / Durum Adı	17-4 PH / H900	304 / Isıtım İşlemsiz
% 0.2 Akma Mukavemeti (Mpa)	1262	241
Çekme Mukavemeti (MPa)	1365	586
Uzama (%) 2 inch’te	15	60
Kesit Daralması (%)	52	70
Vickers Sertliği (HV)	434	153

6.2.1.1. Uygulanan ısıtım işlemleri

Kuvvet dönüştürücülerin doğruluğunu belirleyen ve performans özelliklerinden olan histerisiz ve sürünme hataları doğrudan kullanılan yay elemanının özelliklerine bağlıdır (Bray, vd., 1990 - Measurements Group Yayını, 1988). Yay elemanına uygulanan ısıtım işlemleri ise kuvvet dönüştürücünün histerisiz, sürünme ve istenmeyen diğer etkilerini en alt düzeye indirmek açısından çok önemlidir. Aynı yay elemanı malzemesinden üretilmiş ancak farklı ısıtım işlemleri uygulanmış kuvvet dönüştürücülerin farklı performans özellikleri sergiledikleri bilinmektedir (Bergqvist, 1986 - Spoor, 1986 – Allgeier, 1994, 1995, 1997 – Fank, 2002). Bu nedenle, 17-4 PH çökelme sertleştirilmeli paslanmaz çelik malzeme üzerinde farklı ısıtım işlemleri uygulanarak iç yapı değiştirilmiş ve bunların kuvvet dönüştürücünün performansı üzerindeki etkileri incelenmeye çalışılmıştır.

17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin ısı işlem prosedürleri incelendiğinde, bu çeliklerde mukavemet artışının iki mekanizma ile sağlandığı; birincisinin martenzit oluşumu, ikincisinin ise yaşlandırma işlemi olduğu belirtilmektedir (Perry ve Jasper, 1977, Irvine, vd., 1959, Cohen, M., 1963). Bu etkilere göre deneysel çalışmada uygulanacak ısı işlemler aşağıdaki şekilde planlanmıştır.

Çözeltiye alma işlemi olarak tanımlanan yapıda martenzit oluşumunu gerçekleştirmek için malzeme genellikle 1040 ila 1080°C'ye kadar ısıtılır ve içindeki çökelme parçacıkları ergiyik durumuna gelinceye kadar beklenir, sonra 32°C'nin altına soğutma hızla soğutulur. Hızlı soğuma denge halinde görülen faz ayrışmasını önler ve böylece aşırı doymuş katı ergiyik elde edilir. Allgeier (1994) tarafından yapılan çalışmada, 17-4PH malzemedeki çözeltiye alma sıcaklığı olarak 1040°C ve 1000°C'lerde yapılan incelemelerde her hangi bir farkın olmadığını belirtmiştir. Bunun yanı sıra bu malzeme üzerine yapılan pek çok yayında (Viswanathan, vd., 1988; Chandler, 1998; Metals Handbook, 1998; Hsiao, 2002) 1040°C'de 30 dakika bekletme süresi ile çalışılması nedeniyle bu çalışmada çözeltiye alma sıcaklığı olarak 1040°C ve bekleme süresi olarak 30 dakika belirlenmiştir. Metals Handbook (1998)'ta çözeltiye almada işleminde soğutma ortamı olarak hava veya yağ ortamı verilmektedir. Martenzitik dönüşüm gösteren çelikler jominy deneyi ile belirlenen soğuma hızının değişiminin malzemenin sertliği üzerinde önemli bir etkisi vardır (Lakhtin, 1994; Onaran ve Erman, 1988). Bu yüzden daha önceden 17-4PH malzeme üzerine literatürde bir çalışmanın olmaması sebebiyle deneysel çalışmada farklı soğuma ortamlarında numuneler hazırlanması planlanmıştır. Ayrıca martenzit dönüşümü sonrası malzemenin eksi (-) sıcaklıkta (subzero) bekletilmesinin yapıdaki kalıntı ostenit miktarını önemli ölçüde azalttığı bilinmektedir (Krauss, 1980). Bu amaçla, deneysel çalışmada numunelerin sıvı azot (-196°C) içerisinde 1 saat bekletilmesi ile yapıdaki kalıntı ostenit miktarı azaltılarak oluşturabileceği sertlik düşümü önlenmiş olacaktır.

Mukavemet artırıcı ikinci etki olan yaşlandırma ısı işlemi incelendiğinde, öncelikle numunelere Metals Handbook (1998) ve Chandler (1998) de verilen 17-4 PH malzemeye uygulanabilecek standart ısı işlemlerden en sert (H900) ve en yumuşak (H1150) yapının elde edildiği ısı işlemlerin uygulanması kararlaştırılmıştır.

Bunlara ek olarak, ara sertlik değerleri elde edilebilecek ve ısıl işlemler arasındaki farkın gözlenebileceği 2 ısıl işlem (H925 ve H1025) belirlenmiştir. Kuvvet dönüştürücülerde en iyi performans özelliklerinin elde edildiği belirtilen 45 HRC sertlik değerine ulaşabilmek amacıyla en uygun yaşlandırma sıcaklık ve süresinin belirlenmesi üzerine çalışmalar araştırılmıştır (Measurement Group Yayını, 1988; Fank 2002). Bu sertlik değerinin H900 (482°C de 1 saat) ısıl işlemi sonrası sağlanabileceği yayınlarda belirtilmiştir (Chandler, 1998; Metals Handbook, 1998; Hsiao, 2002; Rack ve Kalish, 1974). Allgeier (1994), yaptığı çalışmada ise 482°C sıcaklıkta 1 saat bekletme ile 450°C sıcaklıkta 2 saat bekleterek uygulanan yaşlandırma işlemleri arasında bir fark olmadığını belirtmiştir. Ayrıca, kuvvet dönüştürücü imalatı açısından ikinci işlemin tercih edilmesinin daha doğru olacağını belirtmiştir. Bu bilgiler ışığı altında numunelere 450°C sıcaklıkta 2 saat bekletme zamanı ile yaşlandırma ısıl işleminin uygulanması planlanmıştır. Sonuç olarak deney numunelerine Tablo 6.4'te belirtilen ısıl işlemler uygulanmıştır.

Öncelikle tüm numunelere 1040°C' de çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır ve bu ısıl işlem uygulanmış numune literatürde Durum A ile ifade edilmiştir. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra literatürde belirtilen ve Tablo 6.2 de gösterilmiş olan H900, H925, H1025 ve H1150 ısıl işlem prosedürleri numunelere uygulanmıştır. Bu ısıl işlemlerden H900 (900°F)'e karşılık gelen 482°C'ye numune 10 °C/dak hız ile çıkartılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra fırından alınarak havada soğutulmuştur. H925, H1025 ve H1150 yaşlandırma ısıl işlem prosedürleri de aynı koşullarda gerçekleştirilmiş olup uygulanan sıcaklıklar sırasıyla 495°, 550°, 620°C olmuş ve bekletme süresi de 4 saat olarak uygulanmıştır. H450, G450, Y450 olarak tanımlanan ısıl işlem prosedürleri ise literatürde yer almayan fakat özel bir ısıl işlem prosedürü olarak numunelere uygulanmıştır. H450'de 1040°C' de çözeltiye alma işleminden sonra numuneler havada; G450'de gaz ortamında; Y450'de yağ ortamında; S450 de ise su ortamında soğutulmuştur. Bu işlemi takiben H450, G450, Y450 ve S450 ısıl işlem prosedürlerinde diğer prosedürlere ek olarak ara bir ısıl işlem kademesi uygulanmıştır. Numuneler, 1 saat süre ile sıvı azot ortamında bekletilmişler ve bundan sonra numune sıvı azotun içerisinden alınıp zaman kaybetmeden fırına yerleştirilmiş ve 10°C/dak hız ile 450°C'ye ısıtılıp bu sıcaklıkta 2 saat (yalnızca G450 numunesi 3 saat) süre ile bekletildikten sonra havada soğumaya

bırakılmıştır. Isıl işlemler uygulanırken aynı ısıl işlem özelliklerine sahip tüm numuneler birlikte aynı koşullara maruz bırakılmıştır.

Tablo 6.4. Deney numunelerine uygulanan ısıl işlemler

Durum Adı	Çözeltiliye Alma Isıl İşlemi			Ara İşlem	Yaşlandırma (Çökeltme) Isıl İşlemi		
	Uygulanan Sıcaklık (°C)	Bekleme Zamanı (saat)	Soğutma Şekli		Uygulanan Sıcaklık (°C)	Bekleme Zamanı (saat)	Soğutma Şekli
A	1040	½	Havada	-	-	-	-
H - 900	1040	½	Havada	-	482	1	Havada
H - 925	1040	½	Havada	-	496	4	Havada
H - 1025	1040	½	Havada	-	552	4	Havada
H - 1150	1040	½	Havada	-	620	4	Havada
H - 450*	1040	½	Havada	1 saat sıvı azotta bekletme	450	2	Havada
Y - 450*	1040	½	Yağ ortamında	1 saat sıvı azotta bekletme	450	2	Havada
S - 450*	1040	½	Su ortamında	1 saat sıvı azotta bekletme	450	2	Havada
G - 450*	1040	½	Gaz ortamında	1 saat sıvı azotta bekletme	450	3	Havada

*literatürde yer almayan özel ısıl işlemdir.

6.2.2. Deney numunelerinin sertliklerinin belirlenmesi

Her ısıl işlem grubunda seçilen numunelerin Tübitak – UME Sertlik laboratuvarı bünyesinde bulunun Zwick marka Z 2.5 modeli Rockwell sertlik ölçüm cihazı kullanılarak sertlik değerleri ölçülmüştür. Numuneler, ısıl işlem prosedürleri uygulanıp kuvvet dönüştürücü biçiminde hazırlandıktan sonra numune üzerinde en az 5 adet ölçüm alınarak bu değerinin ortalaması malzemenin sertlik değeri olarak verilmiştir.

6.2.3. Optik mikroskop incelemesi

Çalışmanın bu aşamasında, kuvvet dönüştürücü malzemesi olarak kullanılan 17-4PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliğine uygulanan çeşitli ısı işlemler sonucu mikroyapısında ne tür değişiklikler oluştuğunu anlamak üzere çökelme kümeciklerinin boyutları, yapıdaki dağılımları ve taneler arasındaki konumları farklı yöntemler yardımıyla incelenmeye çalışılmıştır. Bunların amacı, kuvvet dönüştürücü performansında etkili olan ısı işlemler sonucu oluşan iç yapı özelliklerini gözleyebilmektir.

Numunelerin metalografik fotoğrafları TÜBİTAK Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü (MKTAE), Metalografi Laboratuvarı'nda çekirilmiştir. Tüm numunelerde dağlayıcı olarak "fry's reagent" (5g CuCl_2 , 40ml HCl, 30ml H_2O ve 25ml etil alkol karışımı) kullanılmıştır. Bu dağlayıcı, Metals Handbook (1981)'ta çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik yapıları için önerilen bir karışımdır.

6.2.4. Tarama elektron mikroskobu (SEM - Scanning Elektron Microscope) incelemesi

Optik mikroskoba göre tarama elektron mikroskobunda daha yüksek büyütme değerleri ile inceleme yapmak mümkündür. Bu sayede, 17-4PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliğine uygulanan ısı işlemler sonucu oluşan mikroyapılarda ne tür değişikliklerin oluştuğu, çökelme kümeciklerinin boyutları, yapıdaki dağılımları ve taneler arasındaki konumları hakkında bilgi edinmek amacıyla tarama elektron mikroskobu incelemesi yapılmıştır. Numunelerin SEM fotoğrafları TÜBİTAK Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü (MKTAE), SEM Laboratuvarında "JEOL 6335 F Field Emission Gun Elektron Microscope" markalı cihaz ile çekilmiştir.

6.2.5. X ışını difraktometre incelemesi

Temel yapısı martenzitik olan 17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliğin yapısındaki kalıntı ostenit miktarını belirleyebilmek amacıyla X ışını difraktometre analizi yaptırılmıştır. Numunelerin X Ray Difraktometre ölçümleri TÜBİTAK Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü (MKTAE), X ışınları laboratuvarında Shimadzu XRD-6000 modeli cihazı ile Cu X-ışını tüpü

($\lambda=1.5405$ Angstrom) kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde 10° ila 120° açıları arası, 1° de 2 dakika ilerleme hızı ile tarama işlemi gerçekleştirilmiştir.

6.2.6. Geçirimli (transmission) elektron mikroskobu (TEM) incelemesi

Optik mikroskop, X-ışınları ve tarama elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ile belirlenemeyen çökelti parçacıklarının dağılımı ve bazı kafes kusurları, süreksizlikler transmisyon elektron mikroskobu ile belirlenebilmektedir. Özellikle dislokasyon şeklindeki çizgisel kusurlar ile bunların yapıdaki dağılımları TEM'den yararlanılarak gözlenebilmektedir (Smallman ve Ashbee, 1966, Nutting, 1963). TEM bir geçirim cihazı olduğu için metaller ancak birkaç bin Å seviyelerindeki kalınlıklara kadar inceltildiklerinde elektron geçişine izin vermektedir. Elektronların yeterli bir görüntü verebilmesi için inceltilecek örnek kalınlığının 50-100 Å olması gerekmektedir (Smallman ve Ashbee, 1966). Tüm metalurjik incelemelerde kullanılacak filmin ana numunenin yapı ve davranışını tam olarak temsil etmesi gerekmektedir. Bu nedenle TEM için en güvenilir olarak çoğunlukla ana malzemeden ince folyo kesilip bunun kontrollü delinerek parlatma tekniğinin kullanılması yoluna gidilmektedir (Smallman ve Ashbee, 1966).

6.2.6.1. TEM numunelerinin hazırlanması

Deneysel çalışma için üretilmiş ve kuvvet dönüştürücü olarak performansları belirlenmiş numunelerin uç kısımlarından alınan parçaların, orta kısımlarına yakın bölgelerinden elektro-erozyon tezgahında 3 mm çaplı diskler çıkarılmıştır. Bu disklerden özel kesme cihazı yardımı ile yüksek debili bor yağı akışı altında 300 - 350 μm kalınlığında ince dilimler şeklinde numuneler kesilmiştir. Literatürde kesilen dilimlere ait kalınlığın malzemeden malzemeye değişmesine karşın 100 μm 'den az olmaması önerilmektedir. Demir esaslı malzemeler için yapılan kesim sırasında kesilen dilimin yüzeyden itibaren 2-10 μm civarında bir derinlikte malzeme yapısında, kesmeden kaynaklanan bir hasarın belirlendiği ifade edilmektedir (Goodhaw, 1973). Bu diskler, 1200 mesh numaralı su zımparası kullanılarak yaklaşık 100 μm kalınlığa kadar inceltiştir. Uygulanan bu yöntemle, numune üzerinde kesme işleminden dolayı azda olsa deformasyona ve sürtünme ısısına maruz kalan bölge yapıdan uzaklaştırılmış olur. Daha sonra bu diskler LECTROPOL örnek hazırlama cihazında % 10 Perklorik asit (HClO_4), ve % 90 Metanol (CH_3OH)

çözültüsü içinde 120 mAmper ve 12.5 Volt'luk bir gerilim uygulanarak elektrolitik parlatma yapılmıştır. İkiz Jet (Twin Jet) olarak bilinen bu cihazda 3 mm çapındaki inceltmiş numunelerin elektrolitik parlatma işlemi, numunelerin ortasında çok küçük bir delik açılıncaya kadar sürdürülmüştür. Elde edilen numuneler elektron mikroskobuna yerleştirilip delik etrafında incelenmiş bölgede incelemeler yapılmıştır.

6.2.6.2. TEM fotoğraflarının çekimi

Numunelerin TEM fotoğraflarının çekimleri TÜBİTAK Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü (MKTAE) de bulunan JEOL JM 100-C markalı transmisyon elektron mikroskobunda yapılmıştır. Cihaz 100 kV kapasiteli olup çözme gücü 4 Å mertebesindedir.



7. DENEY SONUÇLARI

7.1. Deney Numunelerinin Sertlik Ölçüm Sonuçları

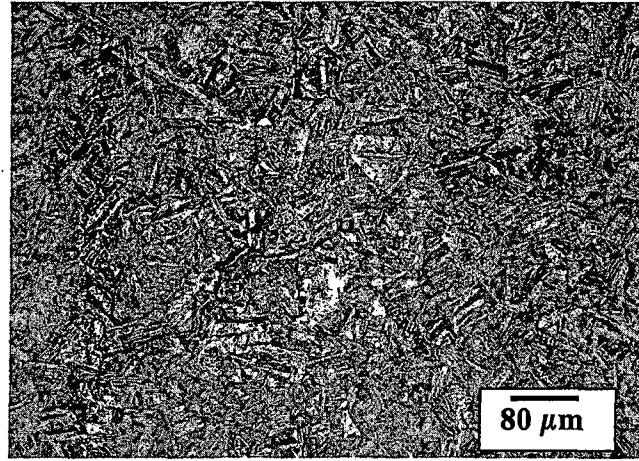
Deney numunelerinin Rockwell C skalası türünde sertlik değerleri Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1. Deney numunelerinin ölçülen sertlik değerleri

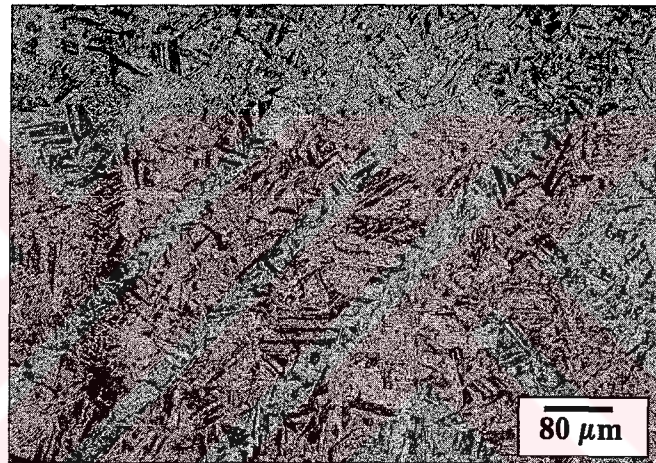
Koşul Adı	Sertlik Değeri
	HRC
H 900	44.90
H 925	41.35
H 1025	37.34
H 1150	32.57
H 450	46.32
Y 450	45.61
S 450	45.29
G 450	43.62

7.2. Optik Mikroskop İncelemesi Sonuçları

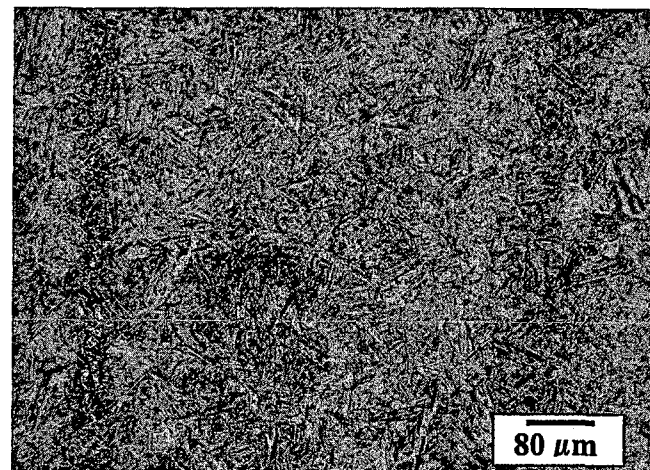
Optik mikroskopta elde edilen Şekil 7.1 – 7.8'deki fotoğraflar incelendiğinde temel olarak ana yapının martenzitik yapı olduğu görülmektedir. Genel olarak, 17-4PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemede martenzit yapı içerisinde bir miktar ferrit dizisi olduğu görülmektedir (Kaluç, 1996). Tüm fotoğraflarda mikroyapıda ferrit dizileri belirgin bölgeler oluşturmuşlardır. Çökelme tanecikleri yada kalıntı ostenit yapısı hakkında optik mikroskop yardımı ile ilgili olarak herhangi bir yorum yapılamamıştır.



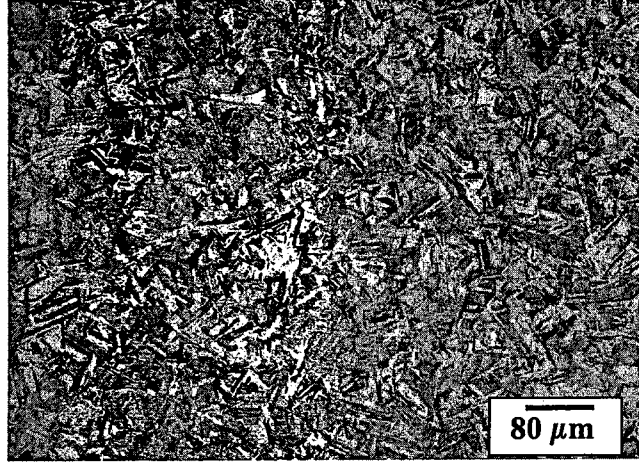
Şekil 7.1. H900 ısıt işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapı (x 120)



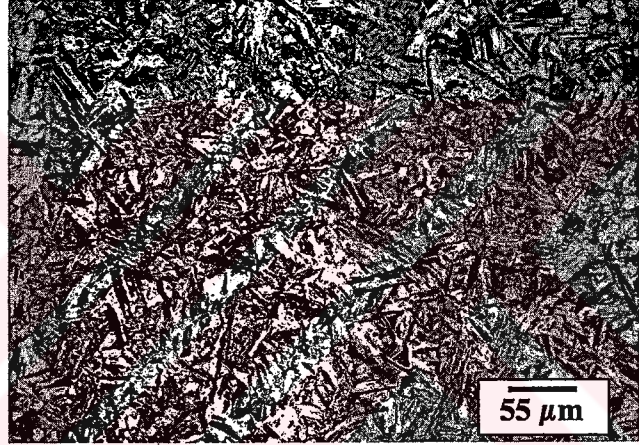
Şekil 7.2. H925 ısıt işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapı (x 120)



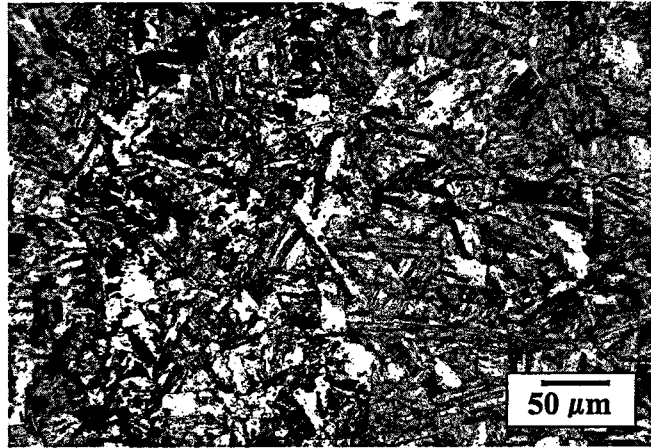
Şekil 7.3. H1025 ısıt işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapı (x 120)



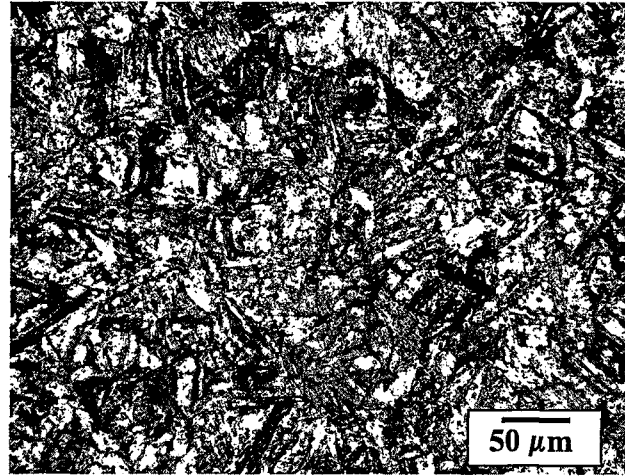
Şekil 7.4. H1150 ısııl işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapı (x 120)



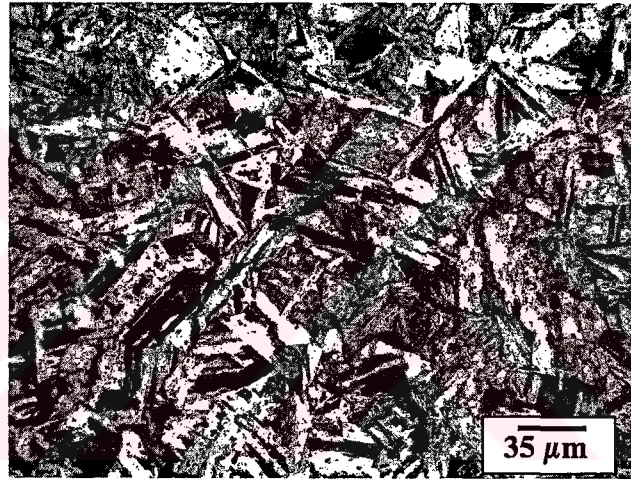
Şekil 7.5. H450 ısııl işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapı (x 180)



Şekil 7.6. Y450 ısııl işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapı (x 200)



Şekil 7.7. G450 ısııl işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı (x 200)



Şekil 7.8. S450 ısııl işlemi sonrası elde edilen martenzitik iç yapı (x 290)

7.3. Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemesi Sonuçları

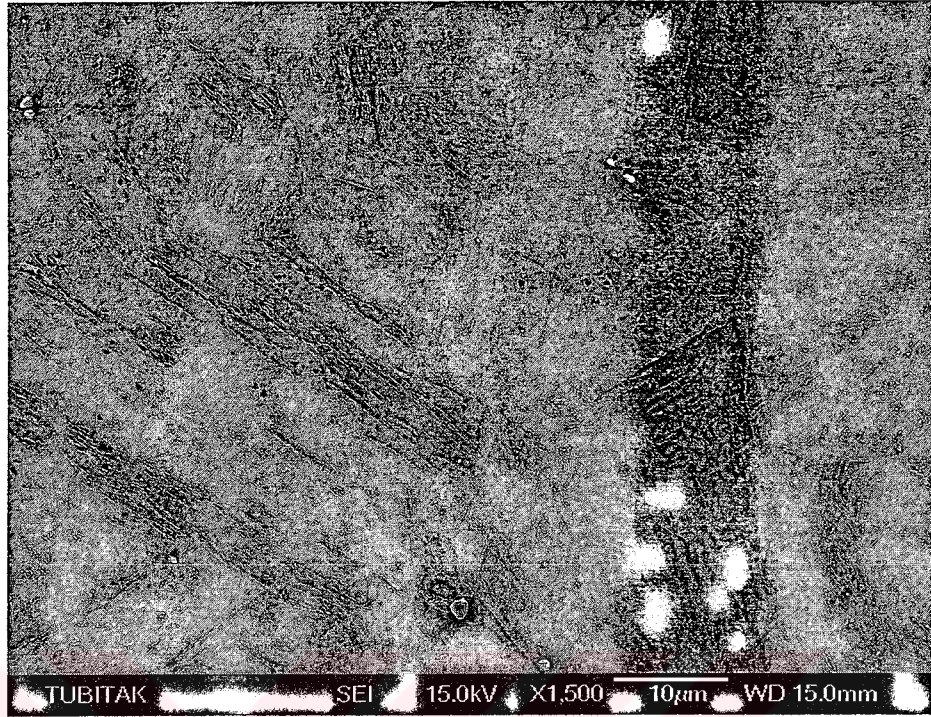
Tarama elektron mikroskobunda (SEM) çekilen aşağıdaki fotoğraflar incelendiğinde (Şekil 7.9 – 7.16), 17-4PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliğin temel mikroyapısının plakalı martenzitik yapı olduğu açıkça görülmektedir. Ancak elde edilen fotoğraflardan plaka genişlikleri ve sıklıkları hakkında bir yorum yapılamamaktadır. Resimlerde çökelme tanecikleri, yapısı ve kalıntı ostenit hakkında bir bilgi elde edilememiştir.



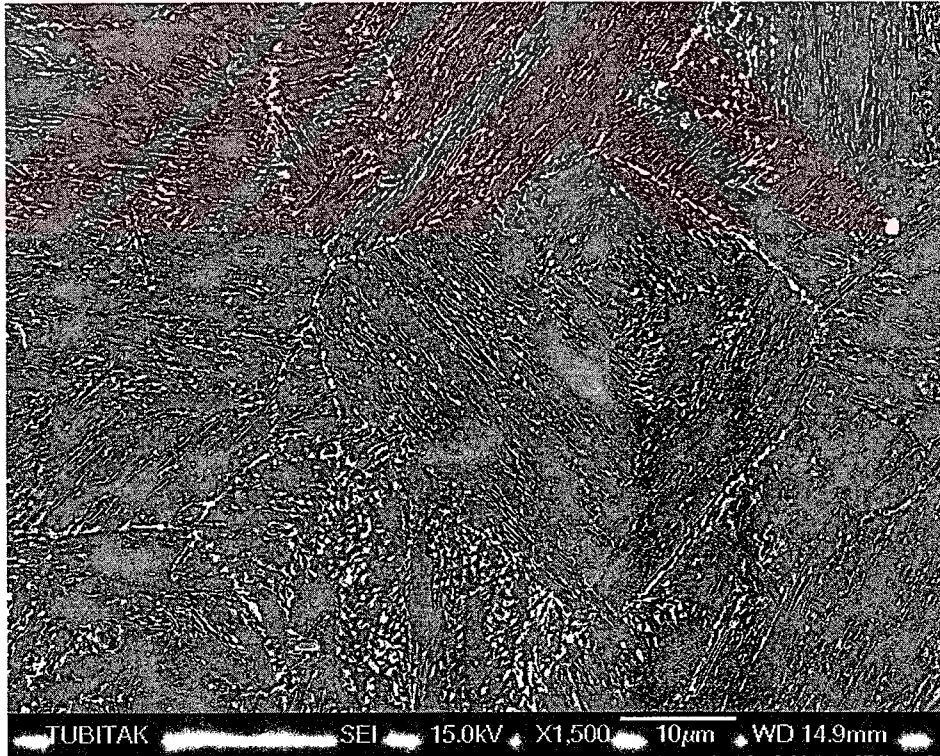
Şekil 7.9. H900 ısıt işlemleri sonrası elde edilen martenzitik iç yapının SEM fotoğrafı



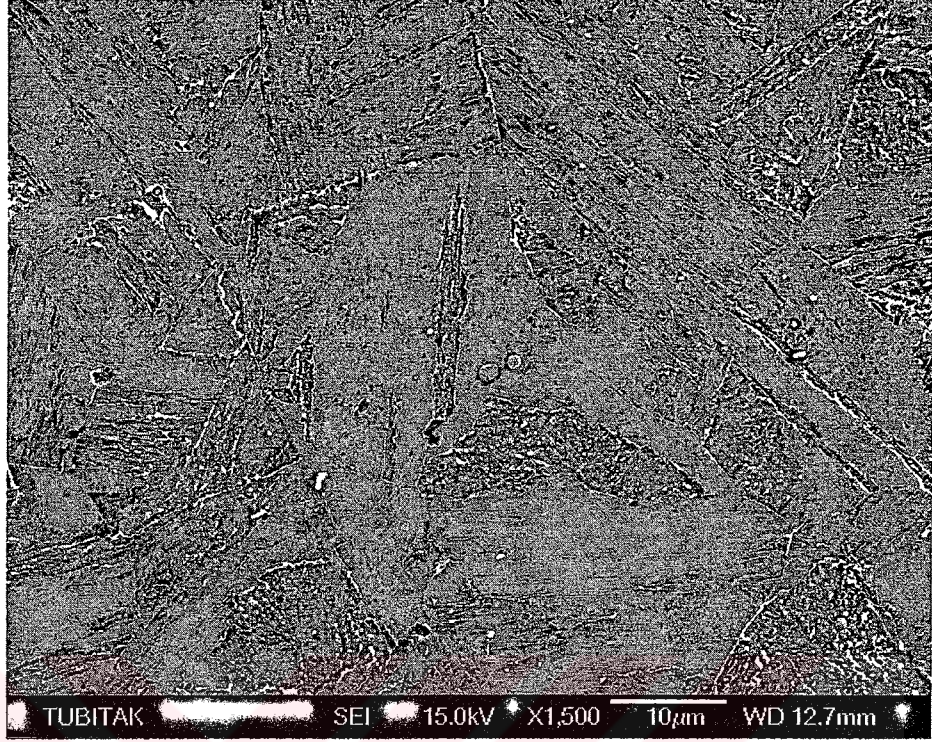
Şekil 7.10. H925 ısıt işlemleri sonrası elde edilen martenzitik iç yapının SEM fotoğrafı



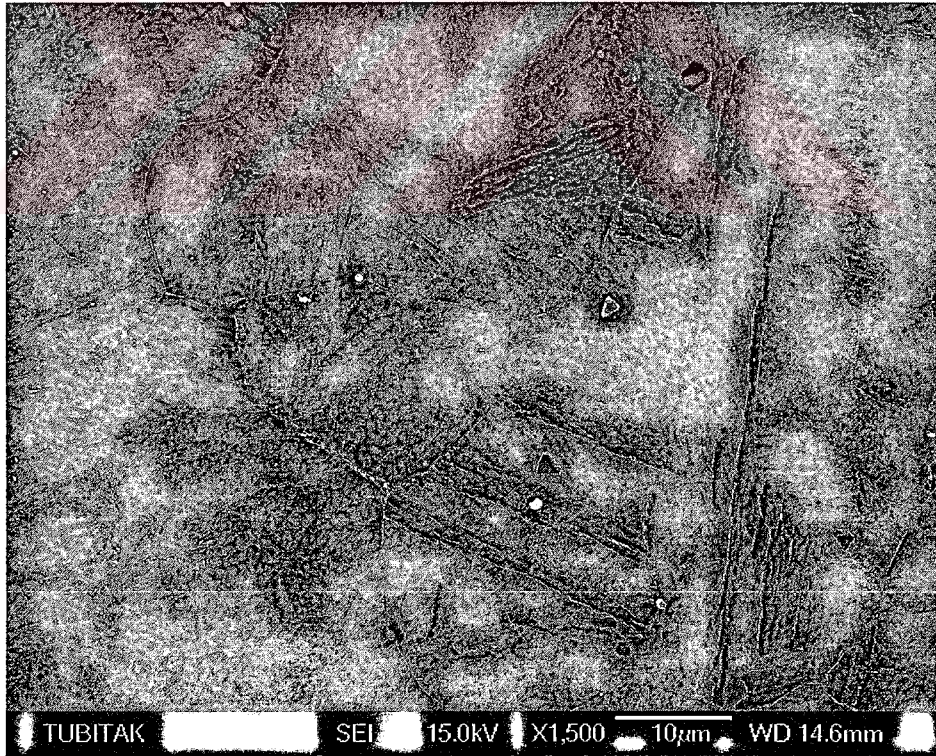
Şekil 7.11. H1025 ısıt işlemleri sonrası elde edilen martenzitik iç yapının SEM fotoğrafı



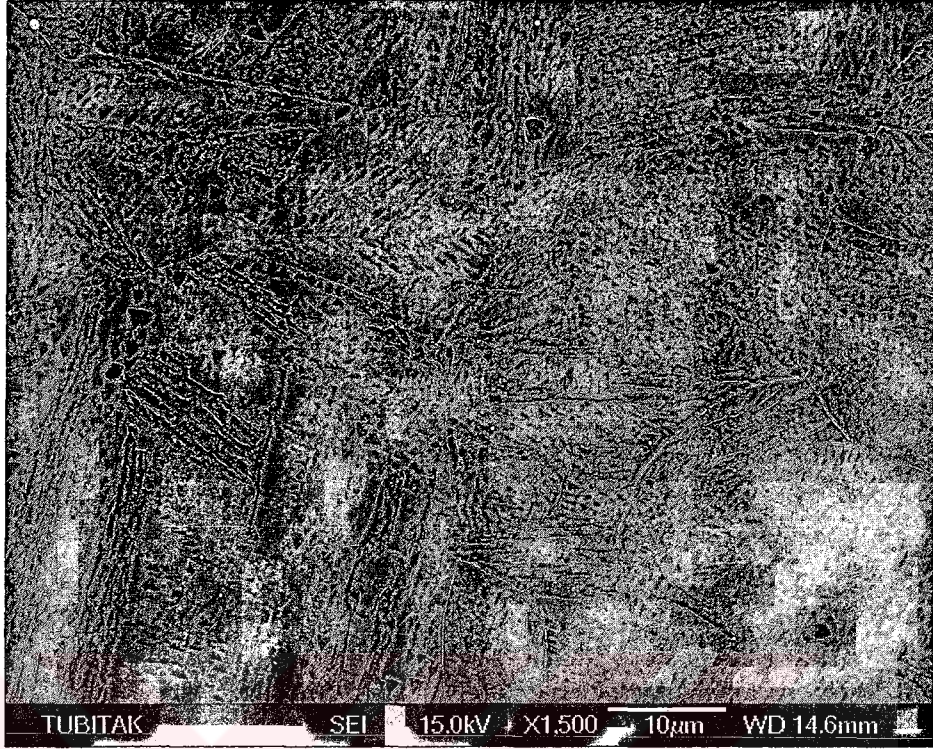
Şekil 7.12. H1150 ısıt işlemleri sonrası elde edilen martenzitik iç yapının SEM fotoğrafı



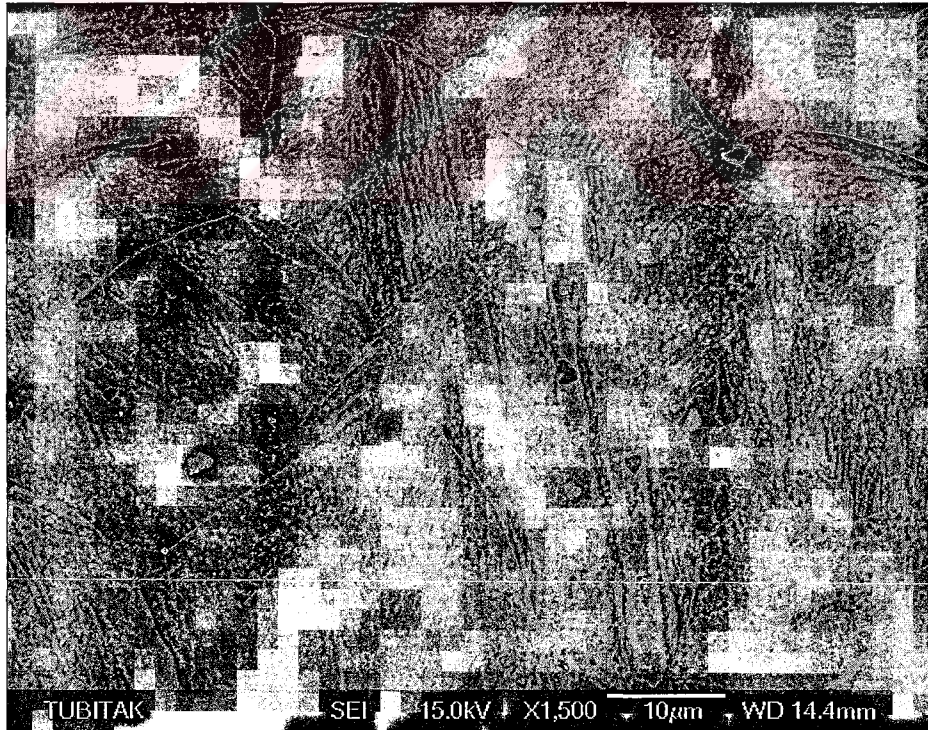
Şekil 7.13. H450 ısıt işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapının SEM fotoğrafı



Şekil 7.14. Y450 ısıt işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapının SEM fotoğrafı

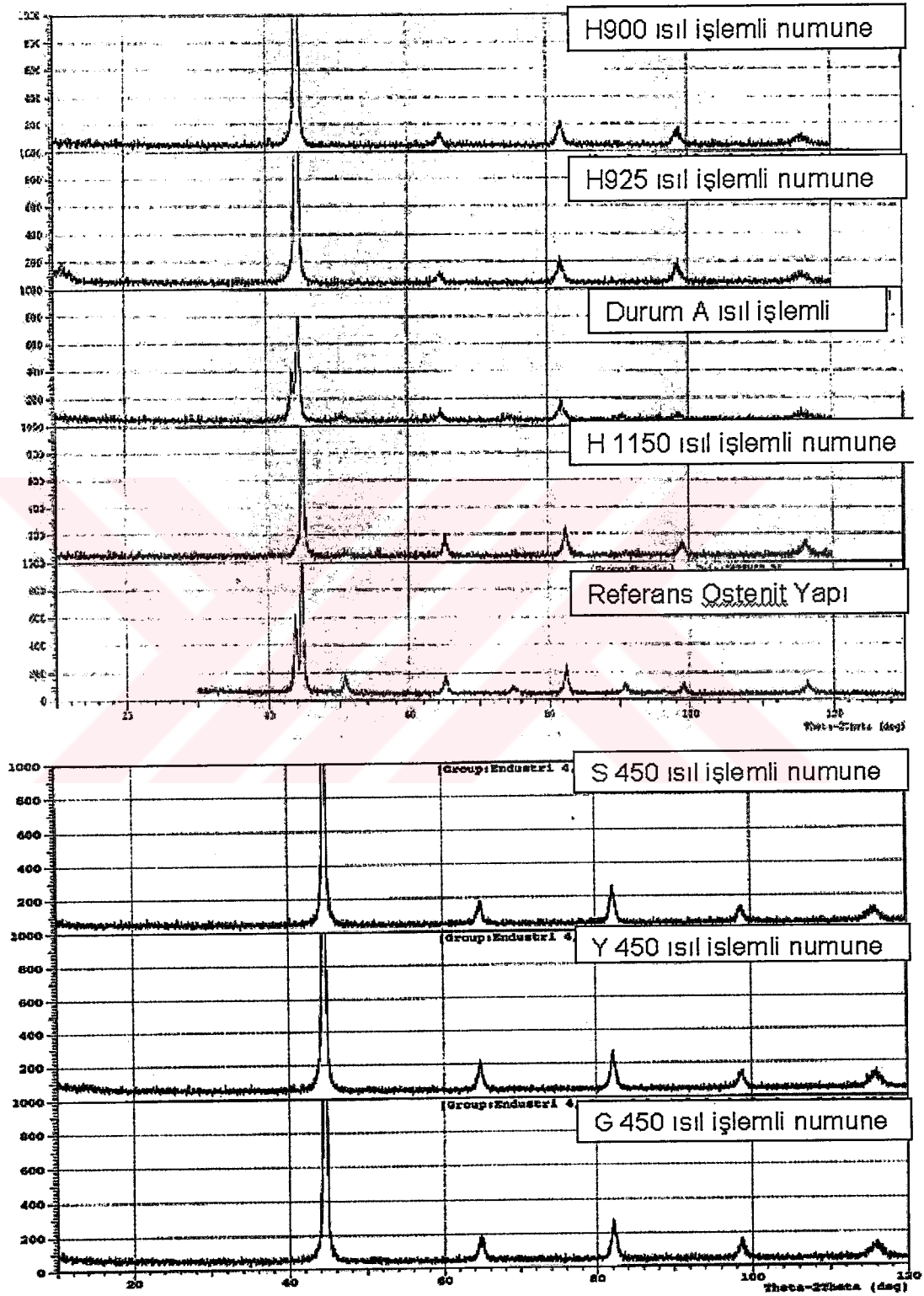


Şekil 7.15. G450 ısııl işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapının SEM fotoğrafı



Şekil 7.16. S450 ısııl işleme sonrası elde edilen martenzitik iç yapının SEM fotoğrafı

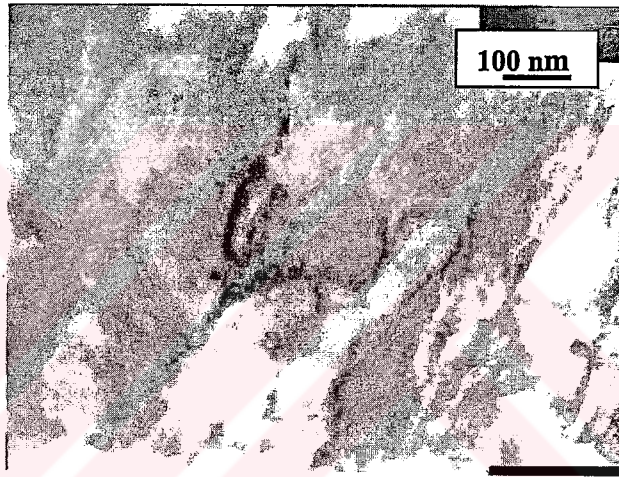
7.4. X Işını Difraktometre İncelemesi Sonuçları



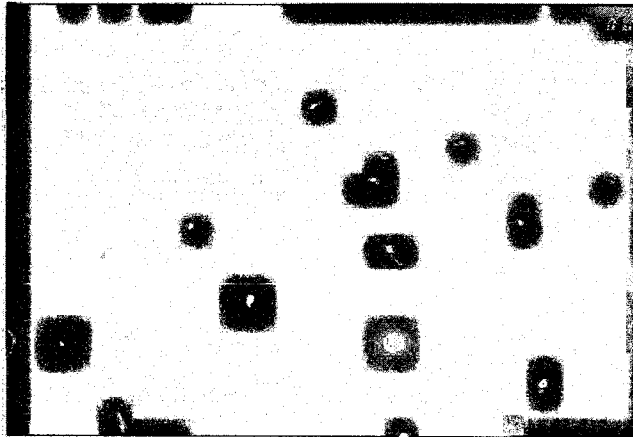
Şekil 7.17. 17-4PH malzemenen farklı ısıtılmış numunelerin X ışını difraktometre ölçüm sonuçları

Elde edilen x ışını tarama sonuçları Şekil 7.17’de verilmiştir. Analiz sonucunda tüm numuneler sadece α – Fe (PDF No: 6-696) bulunmuştur. Buna ilave olarak, sadece Durum A ısıl işlemlili numunede ostenite (Fe,C) (PDF No: 31-619) ve H1150 ısıl işlemlili numunede ise az miktarda ostenite (Fe,C) (PDF No: 31-619) rastlandığı raporda belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlarının daha iyi karşılaştırılabilmesi için referans ostenit (Fe,C) (PDF No: 31-619) yapısının analizi de verilmiştir.

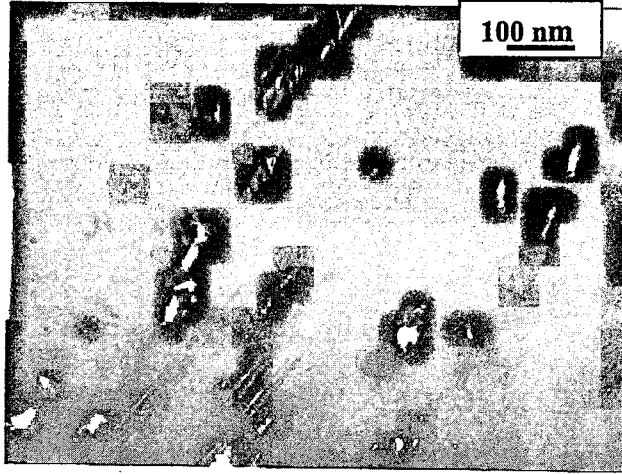
7.5. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) İncelemesi Sonuçları



Şekil 7.18. 17-4PH malzemenin H900 ısıl işlemlili sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafı



Şekil 7.19. 17-4PH malzemenin H900 ısıl işlemlili sonrası elde edilen difraksiyon patterni fotoğrafı (L=76cm)

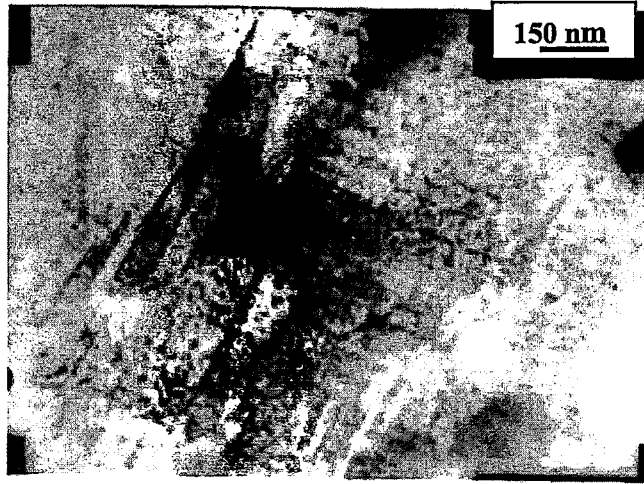


Şekil 7.20. 17-4PH malzemenin H900 ısıl işleminin sonrası elde edilen kalıntı ostenit yapısının TEM fotoğrafı

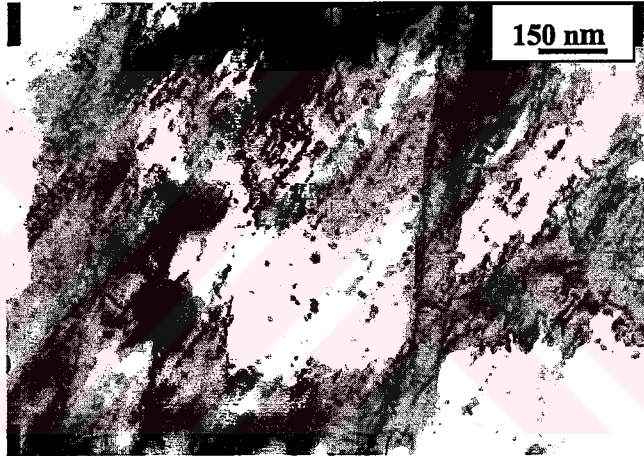
Bu çalışmada cihazın maksimum kapasitesi olan 100 kV'da incelemeler yapılmıştır. Nanometre boyutundaki çökelti taneciklerinin ve yoğun dislokasyon yapılarının incelemelerde çok güçlü elektron mikroskoplarının kullanıldığı göz önüne alındığında mevcut imkanlarla bu incelemelerin güçlüğü ortaya çıkmakta ve buna manyetik bir malzeme ile çalışmanın verdiği sıkıntı da eklenmektedir. Buna rağmen numune hazırlamada gösterilen özenle çökelti taneciklerinin belirlenmesi ve dislokasyon alt yapılarının tespit edilmesinde başarılı sonuçlar alınmıştır.

Şekil 7.18'de H900 ısıl işlemlenmiş numunenin aydınlık alan fotoğrafında genel plaka martenzitin varlığı ve yoğun dislokasyon yapısı olduğu görülmektedir. Ancak yapıda çökelti taneciklerine rastlanmamıştır. Şekil 7.18'deki bölgenin çekilen difraksiyon patterni fotoğrafında da Cu çökelti tanecikleri görüntülenememiştir. Aynı numunedan alınan ve Şekil 7.20'da görülen fotoğrafta ise martenzit plakaları arasına sıkışmış, bazıları ince lameller şeklinde bazıları ise daha kalın ve uzun yapıda şekillenmiş kalıntı ostenitler görülmektedir.

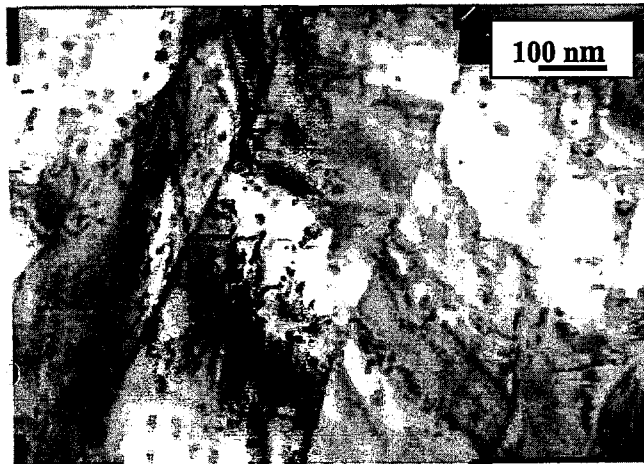
H925 ısıl işlemlenmiş numunedan çekilen aydınlık alan fotoğrafında plaka martenzit ve yoğun dislokasyon yapısı görülmektedir. H925 ısıl işlemde yaşlandırma sıcaklığının ve süresinin H900 ısıl işlemine göre artırılmış olması, yapıdaki Cu çökelti taneciklerini görünür boyutlara gelmesine neden olmuştur. Cu çökeltilerinin boyutları hakkında genel bir bilgi vermek oldukça güçtür.



Şekil 7.21. 17-4PH malzemenin H925 ısıt işlemlı numunedeki Cu çökeltılerının TEM fotoğrafi



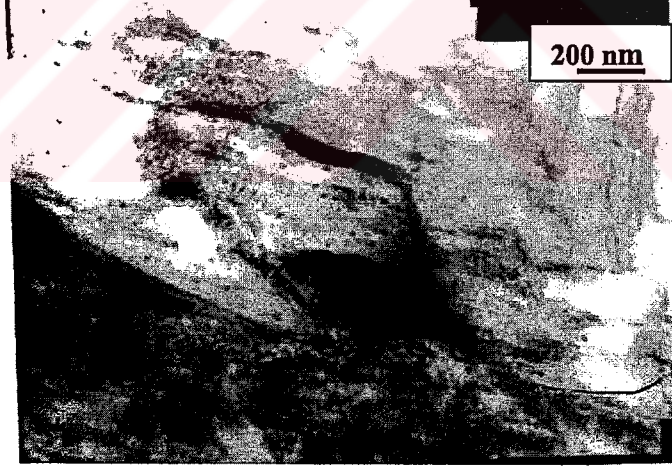
Şekil 7.22. 17-4PH malzemenin H1025 ısıt işlemlı numunedeki Cu çökeltılerının TEM fotoğrafi



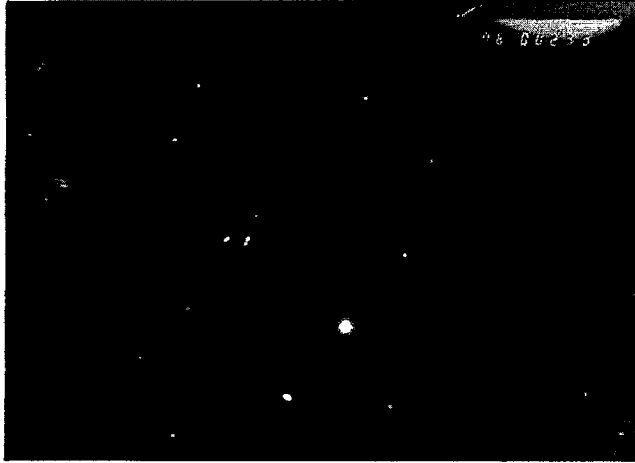
Şekil 7.23. 17-4PH malzemenin H1025 ısıt işlemlı numunedeki martenzit plakalarının ve Cu çökeltılerının TEM fotoğrafi

H1025 ısıtılmış numunenin Şekil 7.22’de verilen fotoğrafında plakalı martenzit yapı içerisinde dairesel şekilli Nb karbür partikülleri gözlenmiştir. Nb karbürlerin ortalama 105nm ila 120nm çaplarında oldukları belirlenmiştir. Nb karbür taneciklerinin yapının mukavemetini artırıcı yönde dislokasyon hareketlerine engel oluşturmaları nedeniyle az da olsa bir katkısı beklenir ancak taneciklerin dağılım sıklığı yapının mukavemet ve sertliğini önemli derecede etkileyebilecek seviyede olmadığını göstermektedir. Ayrıca yapıda ince noktacıklar şeklinde farklı bölgelere dağılmış Cu çökelti tanecikleri görülmektedir. Cu tanecikleri H900 ve H925 ısıtılmış işlemlerine göre artan yaşlandırma sıcaklığı nedeniyle aşırı yaşlanma göstermekte ve boyutları giderek büyümektedir. Cu tanecikleri belirgin bir dağılımda olmayıp belirlenebilen ortalama boyutları 5nm ila 15nm arasındadır.

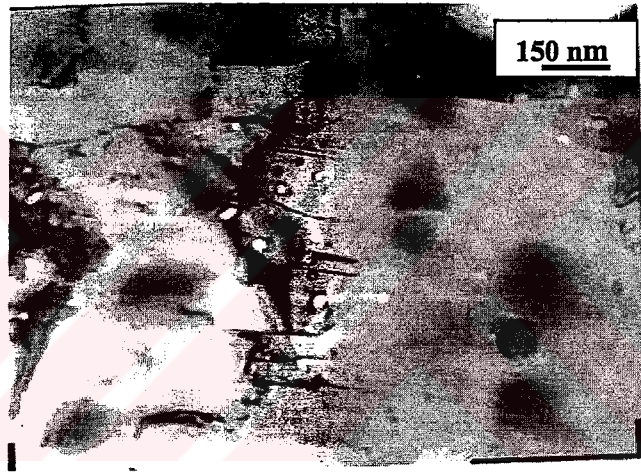
Şekil 7.23’te verilen yine H1025 ısıtılmış numuneye ait fotoğrafta yapıdaki martenzit plakaları açıkça görülmektedir. Martenzit plaka genişliği ortalama $0.25\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Yapıda yoğun dislokasyon yapısı ve farklı boyut ve dağılımda Cu çökelti tanecikleri görülmektedir.



Şekil 7.24. 17-4PH malzemenin H1150 ısıtılmış numunedeki Cu çökeltilerinin TEM fotoğrafı



Şekil 7.25. 17-4PH malzemenin H1150 ısıtılması sonrası elde edilen difraksiyon patterni fotoğrafı (L=76cm)



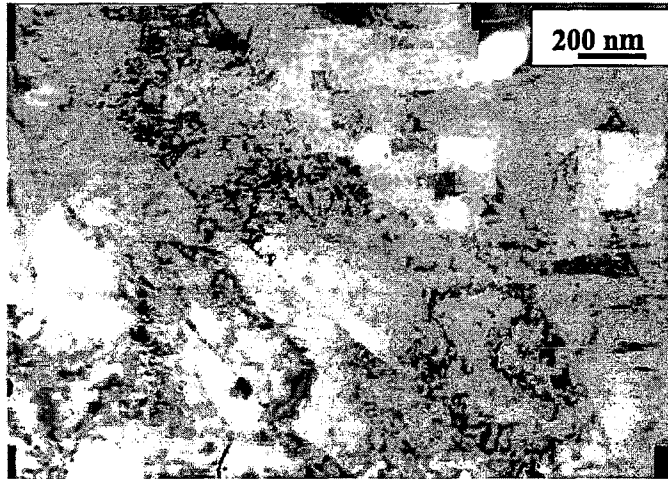
Şekil 7.26. 17-4PH malzemenin H1150 ısıtılması numunedeki Cu çökeltilerinin TEM fotoğrafı



Şekil 7.27. 17-4PH malzemenin H1150 ısıtılması numunedeki Cu çökeltilerinin TEM fotoğrafı

Şekil 7.24'te H1150 ısıtılmış numunenin fotoğrafında martenzitik ana yapı içerisinde Cu çökelti taneciklerinin aşırı yaşlanma sonucunda boyutlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu taneciklerdeki irileşme, yapının mukavemeti ve sertliği, kullanılan 17-4PH malzemesine uygulanabilen diğer tüm ısıtılımlara göre önemli derecede azalmıştır. Aynı bölgeden alınan difraksiyon patterni fotoğrafında da çökelti Cu taneciklerinden gelen yansımalar görülmektedir (Şekil 7.25). Cu çökelti tanecikleri çok küçük olduğu için, büyük bir alan seçici apertürle çalışıldığında bile yeterince difraksiyon alınamamaktadır. Bu durumda Cu çökelti taneciklerinin Bragg konumuna getirilerek simetrik bir pattern çıkarılamamaktadır. Dolayısıyla Cu çökeltilerini yüksek simetrik bir difraksiyon patternin de inceleme olanağı olamamıştır. Kullanılan mikroskop ile bu Cu çökeltilerinden mikro difraksiyon almak olanaklı değildir (Kaya, 2003).

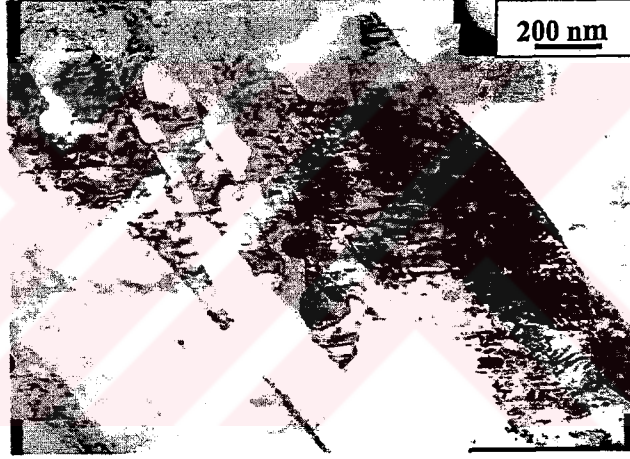
Şekil 7.26 ve Şekil 7.27'de yine aynı numunedan alınan diğer fotoğraflar olup, yapıda küçük beyaz noktacıklar halinde görülen ve ortalama çap değerleri 50nm ile 320nm arasında değişen şekillerin numune hazırlanması sırasında dökülen Cu taneciklerinin yerleri olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, H1150 ısıtılımlı sonrasında Cu çökelti taneciklerinin ortalama çaplarının <50nm ile <320nm olduğu söylenebilir. Dökülen Cu taneciklerinin yanında dökülmeden kalmış Cu çökelti tanecikleri de fotoğrafta görülmektedir (Kaya, 2003).



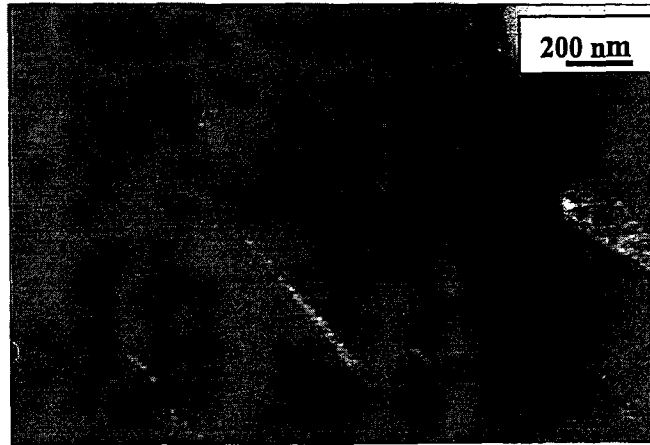
Şekil 7.28. 17-4PH malzemenin H450 ısıtılımlı sonrasında elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafı



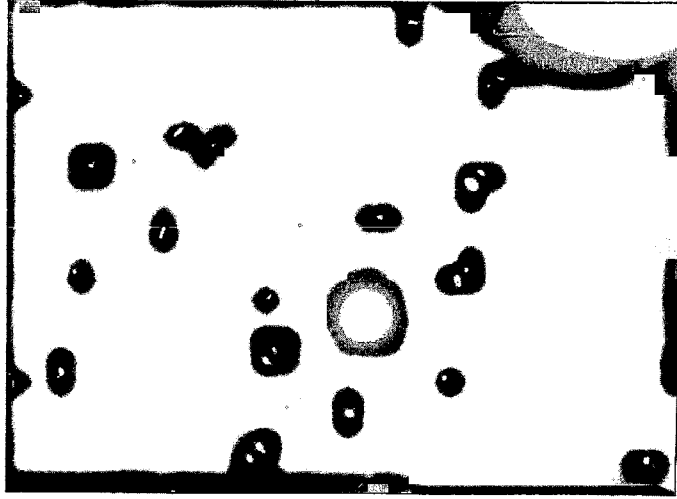
Şekil 7.29. 17-4PH malzemenin H450 ısıl işlemi sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafı



Şekil 7.30. 17-4PH malzemenin H450 ısıl işlemi sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafı



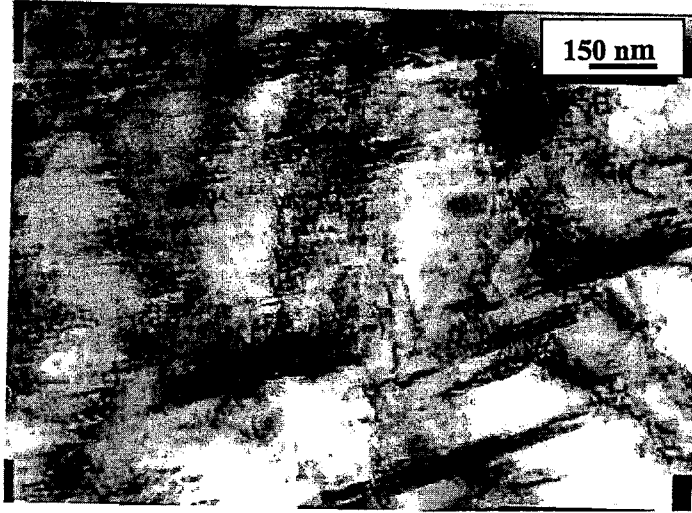
Şekil 7.31. 17-4PH malzemenin H450 ısıl işlemi sonrası elde edilen kalıntı ostenit karanlık alanda çekilmiş TEM fotoğrafı



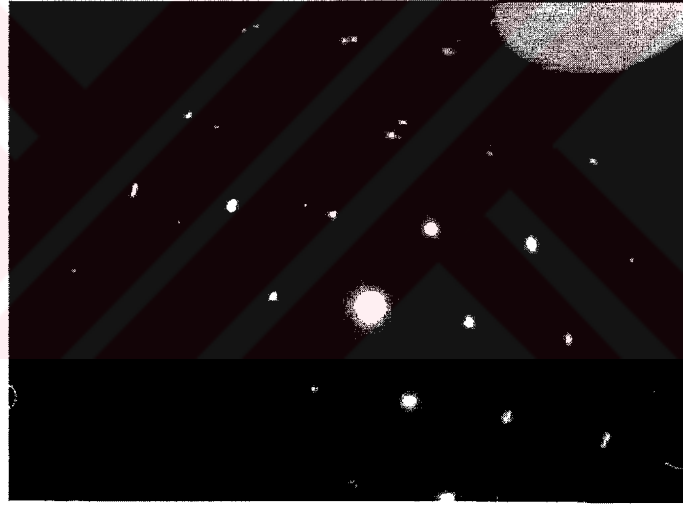
Şekil 7.32. 17-4PH malzemenin H450 ısıtılması sonrası elde edilen difraksiyon patterni fotoğrafı (L=76cm)

H 450 ısıtılmasında H900, H925, H1050 ve H1150 ısıtılmasından farklı olarak çözeltiye alma işlemi sonrası numune sıvı azotta bekletilmiştir. Bu işlem ile martenzit dönüşümü sıcaklığı daha da aşağıya çekilerek martenzit oluşumu teşvik edilmekte ve bu sayede çökeltme taneciklerinin oluşumu kolaylaştırılmış sonuçta da yapıda mukavemet ve sertlik artışı sağlanmaktadır.

H450 ısıtılmış numunedan alınan TEM fotoğrafları incelendiğinde yapıda plakalı martenzit ve yoğun dislokasyon yapısı gözlemlenmektedir. Şekil 7.28'deki martenzit plakalarının kalınlığı $0,26\mu\text{m}$ ile $0,34\mu\text{m}$ arasında değiştiği belirlenmiştir. Şekil 7.29'da da benzer bir yapı gözlemlenmektedir. Yine aynı numuneye ait diğer bir aydınlık alan fotoğrafı olan Şekil 7.30'da plaka martenzit yapısı ve dislokasyon yoğunluğu görülmekte, aynı bölgenin Şekil 7.31'deki karanlık alan fotoğrafında ise martenzit plakaları arasında sıkışmış kalıntı ostenit yapısı ortaya çıkmaktadır. Aynı numunenin Şekil 7.32'de gösterilen difraksiyon pattern fotoğrafında ise yapıda Cu çökelti taneciklerinden gelen herhangi bir yansımanın olmadığı belirlenmiştir. Bu numunede Cu çökelti tanecikleri görülememiştir.

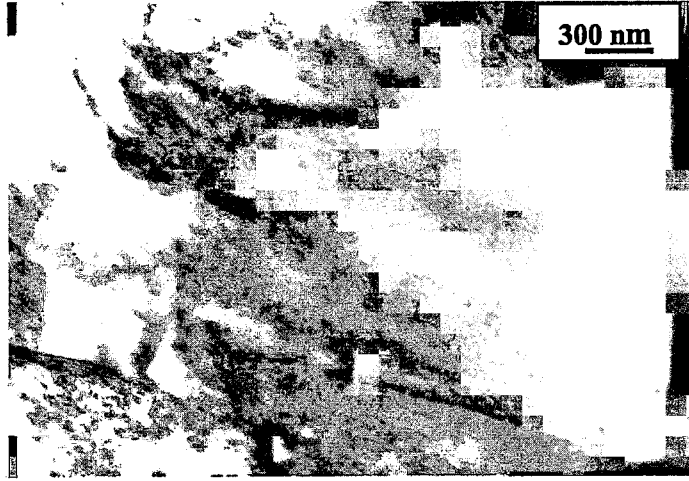


Şekil 7.33. 17-4PH malzemenin G450 ısı işlemi sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafı

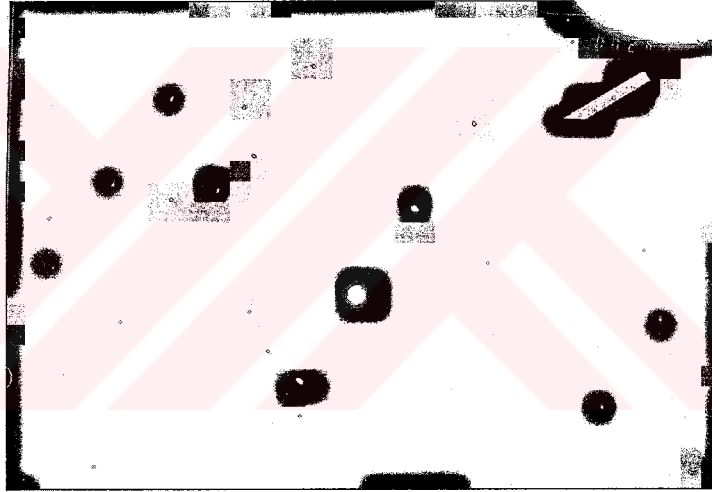


Şekil 7.34. 17-4PH malzemenin G450 ısı işlemi sonrası elde edilen difraksiyon patterni fotoğrafı (L=76cm)

Gaz ortamında soğutulduktan sonra sıvı azot içerisinde bekletilen G450 ısı işlemli numunede plakalı martenzit yapısı içerisinde yoğun bir dislokasyon yapısı görülmektedir. Martenzit yapısı içerisinde Cu çökelti taneciklerinden gelen herhangi bir yansımanın olmadığı Şekil 7.34'te verilen difraksiyon patterninde görülmektedir. Yapı içerisinde Cu çökelti taneciklerine rastlanılmamıştır.

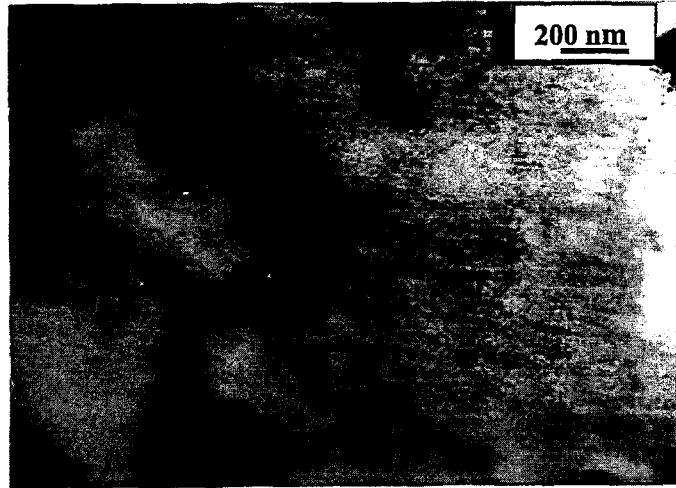


Şekil 7.35. 17-4PH malzemenin Y450 ısıl işleminin sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısını TEM fotoğrafı



Şekil 7.36. 17-4PH malzemenin Y450 ısıl işleminin sonrası elde edilen difraksiyon paterni fotoğrafı (L=76cm)

Y450 ısıl işlemlenmiş numunedeki Şekil 7.35'te verilen fotoğrafta plakalı martenzit yapısının içerisinde yoğun dislokasyon yapısının olduğu ve Cu çökelti taneciklerine rastlanmadığı görülmektedir. Şekil 7.36'da Cu çökelti taneciklerinin görüntülenemediğine dair bir fotoğraf olarak verilmiştir.



Şekil 7.37. 17-4PH malzemenin S450 ısıtılması sonrası elde edilen genel plaka martenzit ve dislokasyon yapısı TEM fotoğrafı

Şekil 7.37’de verilen ve S450 ısıtılmış numunede ise yoğun bir dislokasyon yapısı ilk olarak göze çarpmaktadır. Su ortamında hızlı soğutma ile martenzit dönüşümünün çok hızlı gerçekleşmesinden dolayı bu durumun oluştuğu söylenebilir. Plakalı martenzit yapısı fotoğraftan seçilebilmesine karşın Cu çökelti tanecikleri hakkında bir şey söylemek oldukça güçtür.

7.6. Kuvvet Dönüştürücülerin Performans Sonuçları

Bu kısımda, ölçümleri 110 kN kapasiteli ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasında gerçekleştirilmiş olan 17-4 PH çökeltme sertleştirilmeli paslanmaz çelik malzemeden hazırlanmış deney numunelerinden, performans kriterleri olarak adlandırılan bağıl doğrusalılık, bağıl tekrarlanabilirlik, bağıl histerisiz ve bağıl sürünme hatalarının ölçüm sonuçları tablolar ve grafikler halinde verilmiştir. Bu kriterlerdeki değişimlerin, yay malzemesine uygulanan farklı ısıtma işlemler sonucunda elde edilen malzemedeki sertlik ve iç yapısal özelliklerin değişimleri ile olan ilişkisi ortaya çıkarılmıştır.

Tüm numuneler numune kodları ile tanımlanarak Tablo 7.1 de verilmektedir. Numunelerden alınan veriler hatalara göre grafikler halinde verilmiş olup, grafiklerde yer alan ve yatay eksene paralel uzanan kesikli çizgiler hesaplanan hataların EN 10002-3

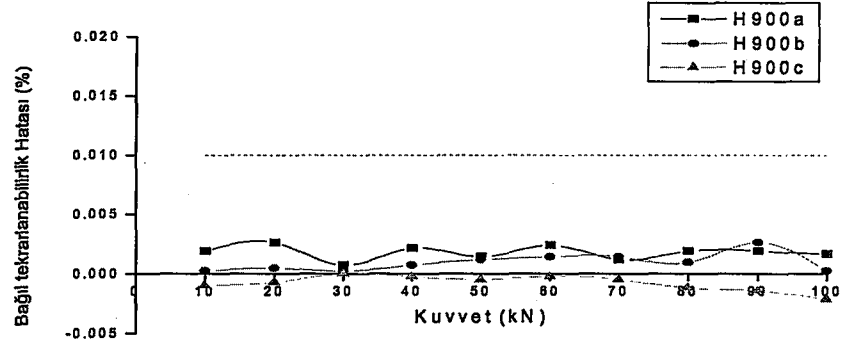
standardında belirtilen en düşük kabul edilen sınır değerini sıfır "00" sınıfı (en yüksek doğruluk sınıfı olan) göstermektedir.

Tablo 7.2. Performansları ölçülen deney numunelerinin kodları

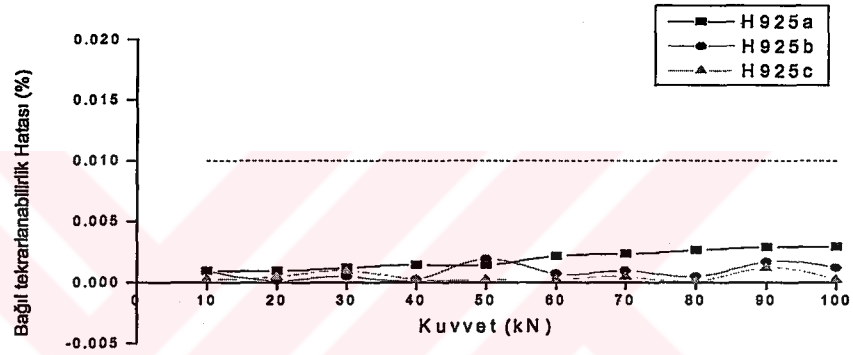
Durum Adı (Numune Kodu)	1.numune	2.numune	3.numune
H900	H900a	H900 b	H900c
H925	H925a	H925b	H925c
H1025	H1025a	H1025b	H1025c
H1150	H1150a	H1150b	-
H450	H450a	H450b	H450c
Y450	Y450a	Y450b	-
G450	G450a	G450b	-
S450	S450a	S450b	-

7.6.1. Bağıl tekrarlanabilirlik hatası

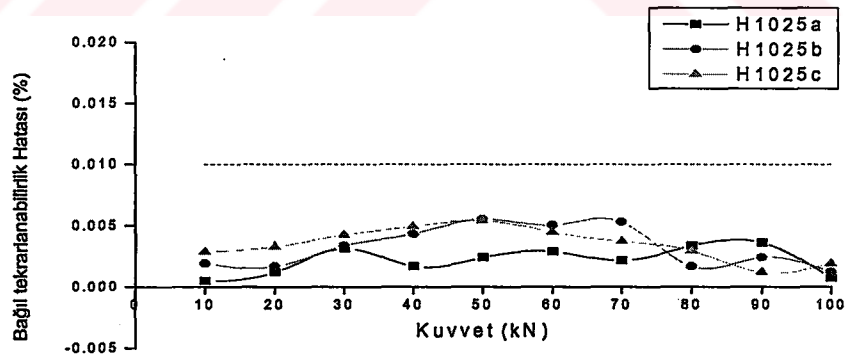
Bu hata, aynı yükleme koşullarında kuvvet dönüştürücüsünden alınan ölçüm sonuçları arasındaki fark olarak nitelendirilmektedir. Elde edilen fark değerinin tam yükteki çıkış değerine bölünmesi ile bağıl tekrarlanabilirlik hatası elde edilmektedir. Kuvvet dönüştürücülerin yapılan ölçümlerin güvenilirliği açısından, elde edilen değerlerin tekrarlanabilir olması ve bağıl tekrarlanabilirlik hatasının olabildiğince düşük olması istenmektedir. Bu hatanın yay malzemesine ve uygulanan ısı işleme bağlı olmadığı, dirençli uzama ölçerinin yapıştırılmasına bağlı olduğu Allgeier (1994), Fank (2002) ve Technical Note (1978) belirtilmiş olup, bu hatanın temel kaynağının dirençli tür uzama ölçerlerinin yapıştırılması sırasında gelebilecek farklılıklar olduğu iddia edilmektedir. EN 10002-3 standardına göre kalibrasyonları gerçekleştirilen kuvvet dönüştürücülerinin bağıl tekrarlanabilirlik hatasının en yüksek doğruluk sınıfına sahip (Sınıf 00) dönüştürücüler için % 0.01'e eşit veya daha küçük olması gerekmektedir.



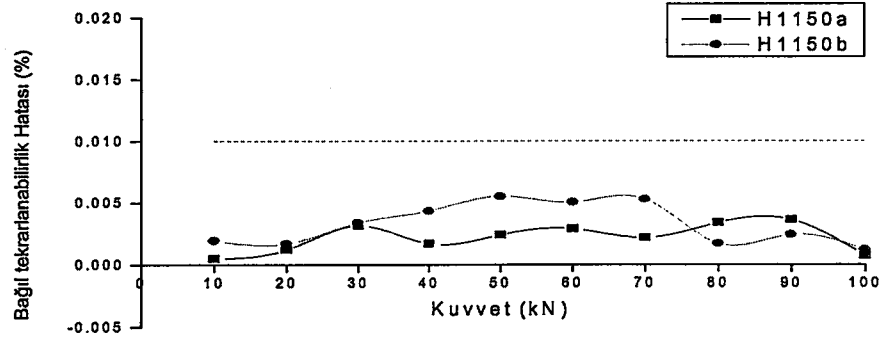
Şekil 7.38. H 900 ısı işlemlenmiş numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası



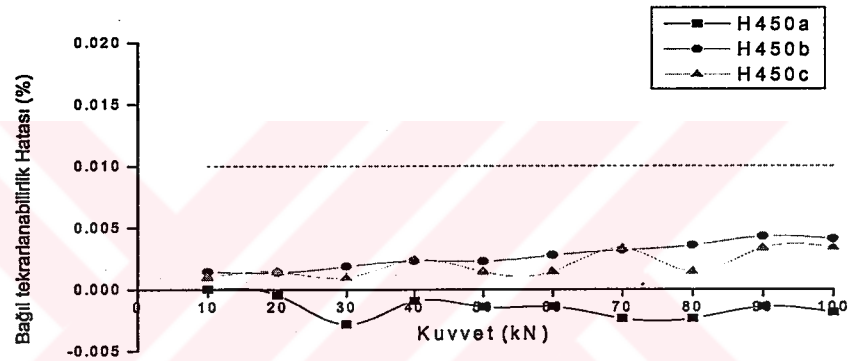
Şekil 7.39. H 925 ısı işlemlenmiş numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası



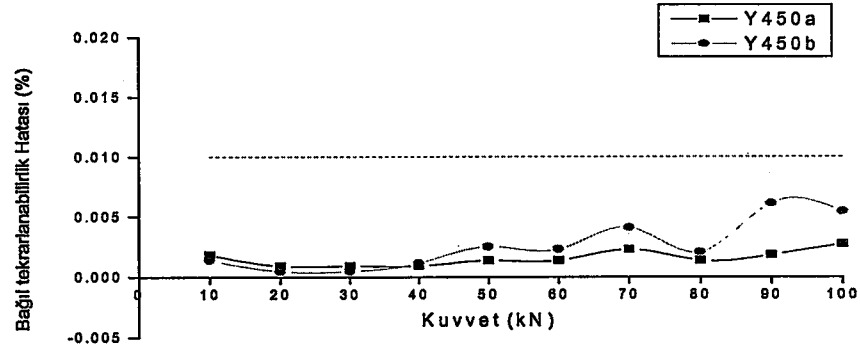
Şekil 7.40. H 1025 ısı işlemlenmiş numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası



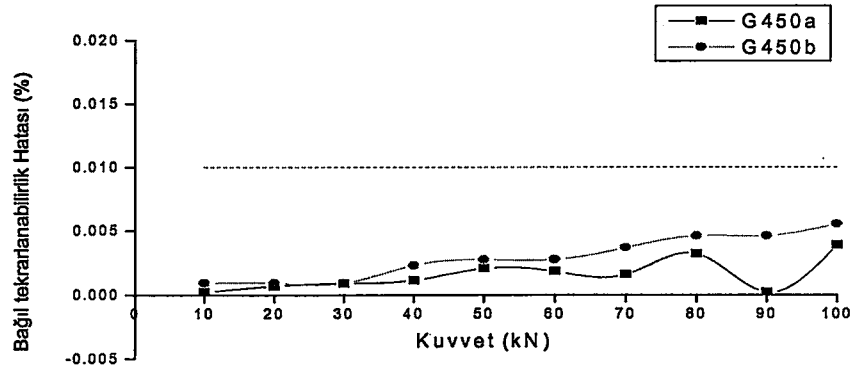
Şekil 7.41. H 1150 ısıtılmış numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası



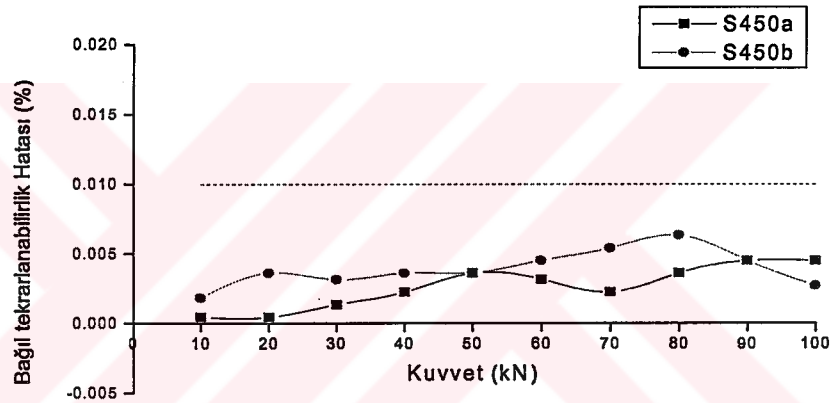
Şekil 7.42. H 450 ısıtılmış numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası



Şekil 7.43. Y 450 ısıtılmış numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası



Şekil 7.44. G 450 ısıtılmış numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası



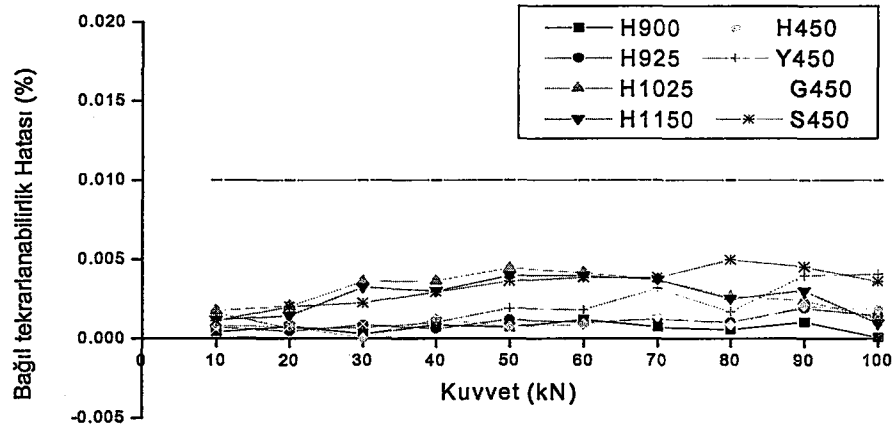
Şekil 7.45. S 450 ısıtılmış numunelerde bağıl tekrarlanabilirlik hatası

Şekil 7.38'de H 900 ısıtılmış numunelerin tekrarlanabilirlik hatası değerleri grafik olarak verilmiştir. Değerler, sınır değer olan % 0.01 çok altındadır ve hatta %0.005'ten daha küçüktürler. Şekil 7.39'da H 925 ısıtılmış numunelerin tekrarlanabilirlik hatalarına bakıldığında üç numunenin verilerinin sıfır çizgisine paralel olduğu ve maksimum değerlerin %0.005 değerinin de altında olduğu görülmektedir. H 1025 ve H 1150 ısıtılmış numunelerin tekrarlanabilirlik hatası değerleri ise Şekil 7.40 ve 7.41'de verilmiş olup iki grafikte birbirine çok benzerdir. Hata değerleri %0.005 civarında bir yoğunluk göstermiştir. Şekil 7.42 - 44'te H 450, Y 450, G450 ısıtılmış numunelerin tekrarlanabilirlik hatalarına bakıldığında numunelerin dataları sıfır çizgisine paralel olduğu ve üç grafiğinde %0.005 civarında bir bant genişliği içerisinde yer aldığı söylenebilmektedir. Şekil 7.45'de S450 ısıtılmış numunenin

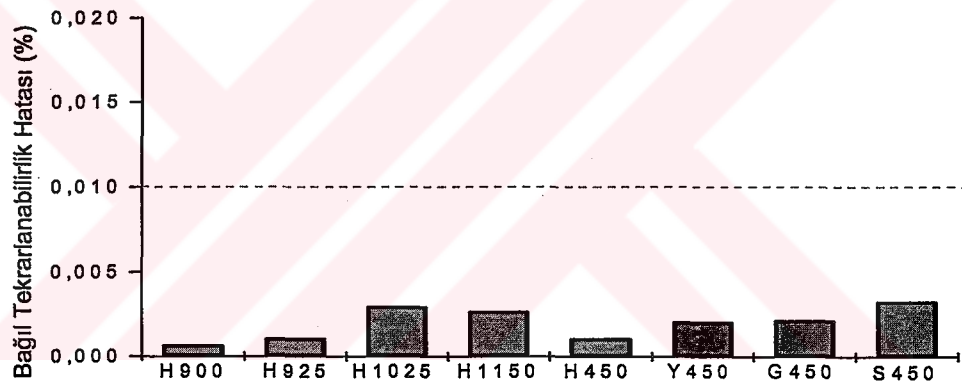
tekrarlanabilirlik hata değerleri sıfır çizgisi etrafında ± 0.005 bandı içerisinde dalgalandığı görülmektedir.

Bu grafiklerin tümü (Şekil 7.46) değerlendirildiğinde bazı numunelerin bağıl tekrarlanabilirlik hataları arasında az da olsa bazı farklar belirlenmesine karşın, numunelere uygulanmış olan ısıl işlemlerin kuvvet dönüştürücülerde tekrarlanabilirlik hatasını değiştirmedeği, değişimlerin normal dağılım içinde kaldığı veya bağıl tekrarlanabilirlik hatasının malzeme sertliğine ve iç yapısına bağlı olmadığı anlaşılmaktadır. Farklı ısıl işlemlerli numunelerin ortalama tekrarlanabilirlik hatalarının grafiği Şekil 7.47’de verilmiştir. Buradaki mevcut farklılıkların bazı makaleler de öne sürüldüğü gibi, yükleme koşullarından, dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılması sırasında oluşan farklılıklardan ve malzeme yüzeyindeki farklılıklardan kaynaklanabileceği tahmin edilmektedir (Allgeier, 1994 - Aerospace Structural Metals Handbook, 1983 - Kawai, 1984 – Fank, 2002). Bazı numunelerin bağıl tekrarlanabilirlik hataları arasındaki farkların, yapılan tüm karşılaştırmalara göre rastgele karakterde olduğu görüşüne varılmıştır. Zira, aynı ısıl işlem görmüş numuneler arasında dahi bu farklarla karşılaşılabilir. Dolayısıyla, bu durum bağıl tekrarlanabilirlik hatasının malzemeye ve uygulanan işlemlere bağlı olmadığına bağlanmıştır.

Bu numunelere ait sayısal karşılaştırma yapabilmek amacıyla % olarak bağıl tekrarlanabilirlik hata değerleri Tablo 7.3 verilmiştir. Tabloda “*ortalama*” olarak verilen değer aynı kodlu numunelerin farklı dirençli uzama ölçer devresinden elde edilen bağıl tekrarlanabilirlik hatalarının ortalama değerini, “*maksimum*” olarak verilen değer bunlar içindeki en büyük bağıl tekrarlanabilirlik hatasını ve “*minimum*” olarak verilen değer ise bunlar içindeki en küçük bağıl tekrarlanabilirlik hatasını göstermektedir.



Şekil 7.46. Tüm ısıtılmış numunelerin ortalama bağıl tekrarlanabilirlik hataları



Şekil 7.47. Tüm numunelerin ortalama bağıl tekrarlanabilirlik hatalarının sütun grafiği

Tablo.7.3. Numunelerin bağıl tekrarlanabilirlik hata değerleri

Numune Kodu	Bağıl Tekrarlanabilirlik Hatası		
	Minimum (%)	Maksimum (%)	Ortalama (%)
H900	-0.0021	0.0026	0.0007
H925	0.0001	0.0029	0.0011
H1025	0.0005	0.0055	0.0030
H1150	0.0005	0.0055	0.0027
H450	-0.0029	0.0043	0.0011
Y450	0.0005	0.0061	0.0021
G450	0.0002	0.0055	0.0022
S450	0.0005	0.0063	0.0033

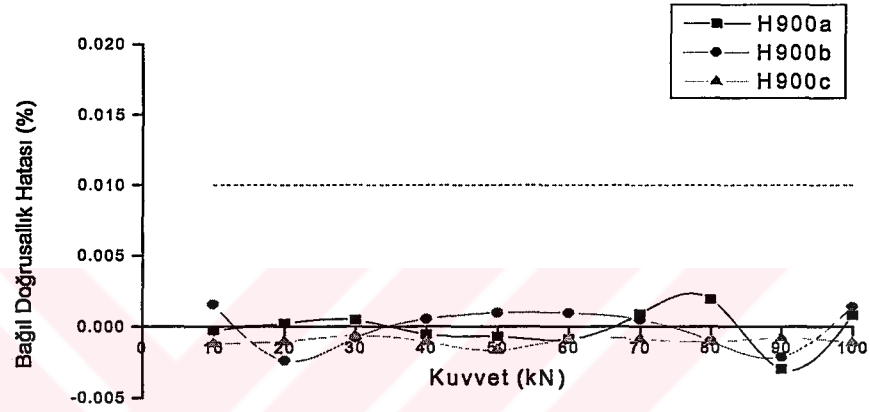
7.6.2. Bağıl doğrusallık hatası

Kuvvet dönüştürücülerde doğrusallık (non-linearity) hatası aynı zamanda lineerite veya interpolasyon hatası olarak da adlandırılmaktadır. Artan yüklenme yönünde alınan ölçüm verilerine göre elde edilen üçüncü dereceden bir polinom denklemi ile, ideal eğri denklemi belirlenmektedir. Gerçek kalibrasyon verilerinin bu eğri denkleminde olan sapması interpolasyon hatasını vermektedir. Birinci dereceden lineer bir denklemden olan sapma ise doğrusallık hatasını vermektedir. Elde edilen fark değerinin tam yükteki çıkış sinyaline bölünmesi ile bağıl doğrusallık hatası elde edilmektedir. Ölçümlerde üçüncü dereceden bir polinom denklemi kullanılarak hesaplar yapılmış olmasına karşın, çalışmada bağıl interpolasyon hatası yerine daha yaygın kullanılan bağıl doğrusallık hatası deyiminin kullanılması tercih edilmiştir. EN 10002-3 standardına göre kalibrasyonları gerçekleştirilen bağıl doğrusallık hatası değerinin en yüksek doğruluk sınıfına sahip (Sınıf 00) dönüştürücüler için yine $\pm \% 0.01$ 'e eşit veya daha küçük olması istenmektedir (EN-10002-3, 1994).

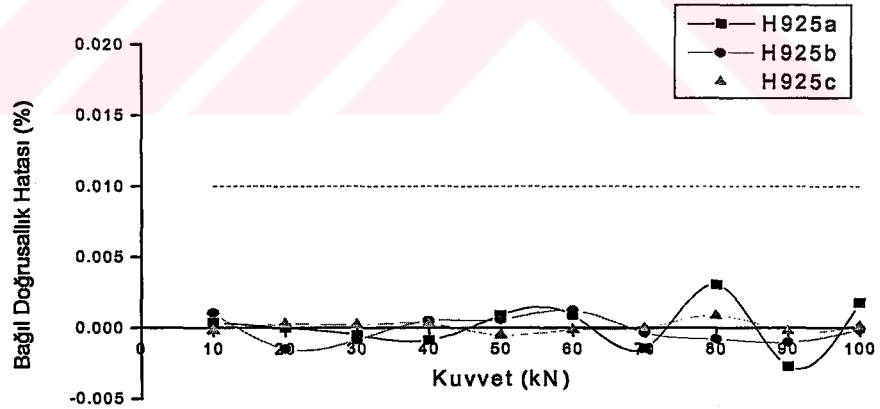
Şekil 7.48, 7.49, 7.50, 7.51, 7.52, 7.53, 7.54 ve 7.55'de üzerlerinde ısıl işlem durum adları verilmiş numunelerin bağıl doğrusallık hatası grafikleri verilmiştir. Tümünü incelendiğinde yaklaşık $\pm \% 0.003$ bandı arasında kalan değer görülmektedir. Şekil 7.56'da ise her ısıl işlem numunelerinin hata değerleri ortalamaları grafik halinde verilmiştir. Tüm numunelerin ortalama bağıl doğrusallık hataları Şekil 7.57'de görüldüğü gibidir.

Deney numunelerine ait grafikler incelendiğinde numunelere uygulanmış olan ısıl işlemlerin kuvvet dönüştürücülerde bağıl doğrusallık hatası üzerinde doğrudan bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ölçüm sonuçlarında görülen farklılıkların tekrarlanabilirlik hatasında olduğu gibi malzemenin sertliği ve/veya yapısına bağlı olmadığı ve rastgele hatalardan kaynaklanabileceği düşünülebilir. Bu konuda yapılan çalışmalarda bağıl doğrusallık hatasının normal şartlar altında sadece kuvvet dönüştürücü tasarımından, montajından ve yük uygulama detaylarından kaynaklandığını belirtilmektedir (Bray, 1990 - Allgeier, 1994 - Kawai, 1984 – Fank, 2002).

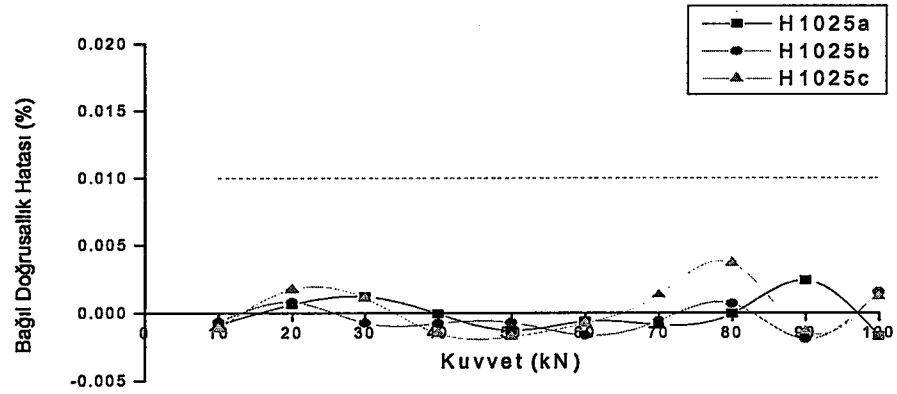
Numunelerin % olarak bağıl doğrusallık hatalarına ait karşılaştırma tablosu Tablo 7.4'te verilmektedir. Bu tabloda da “ortalama” olarak verilen değer aynı kodlu numunelerin farklı dirençli uzama ölçer devresinden elde edilen bağıl doğrusallık hatalarının ortalama değerini, “maksimum” olarak verilen değer bunlar içindeki en büyük doğrusallık hatasını, “minimum” olarak verilen değer ise bunlar içindeki en küçük doğrusallık hatasını göstermektedir.



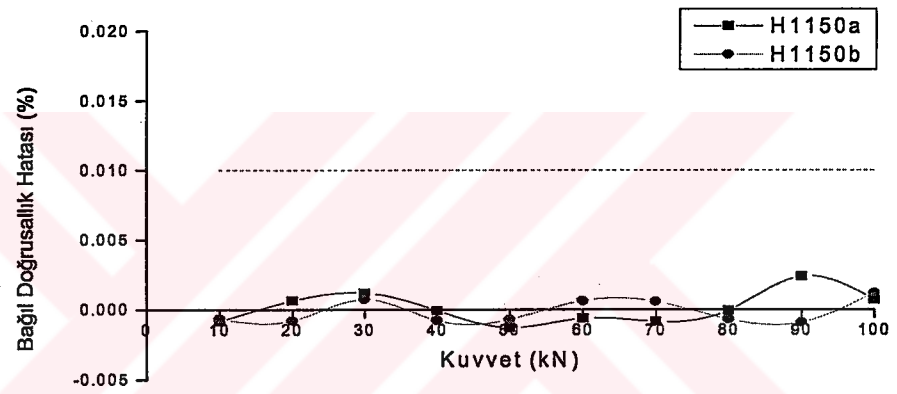
Şekil 7.48. H 900 ısıtılmış numunelerde bağıl doğrusallık hatası



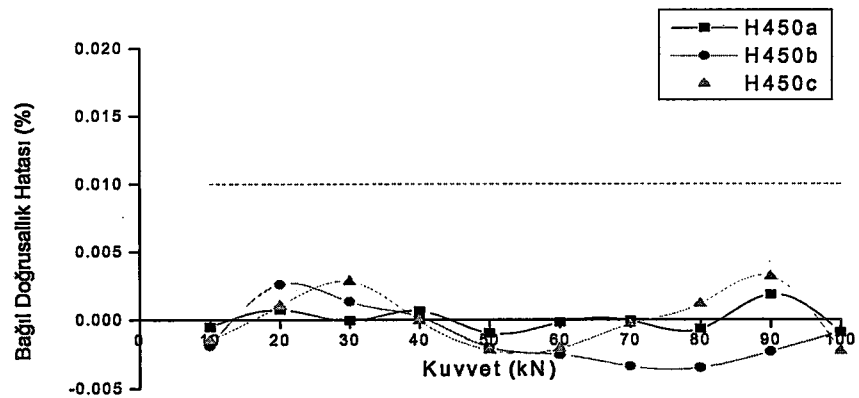
Şekil 7.49. H 925 ısıtılmış numunelerde bağıl doğrusallık hatası



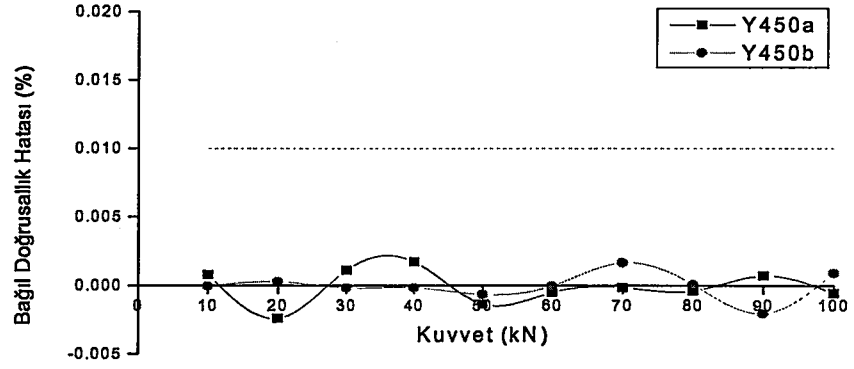
Şekil 7.50. H 1025 ısıtılmış numunelerde bağıl doğrusallık hatası



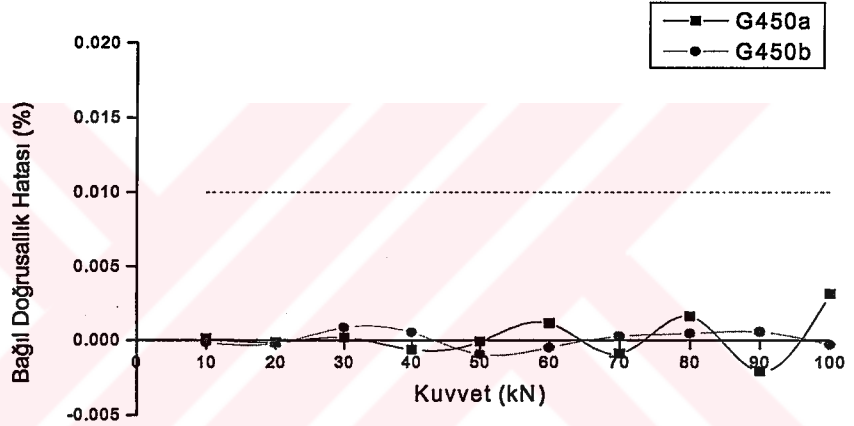
Şekil 7.51. H 1150 ısıtılmış numunelerde bağıl doğrusallık hatası



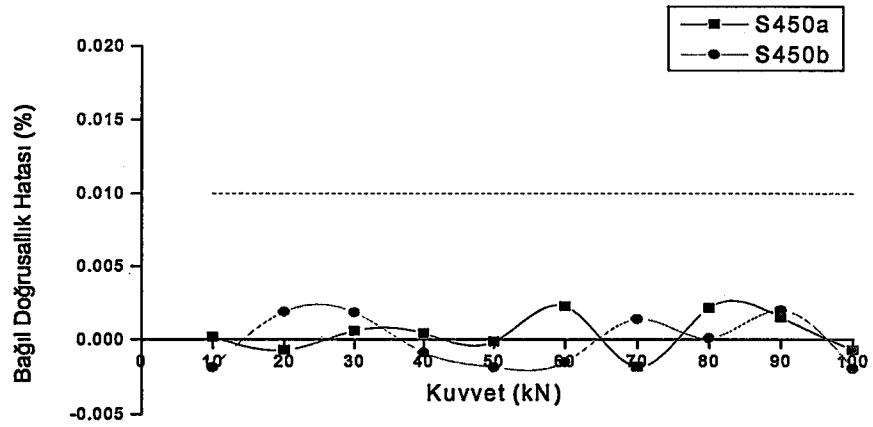
Şekil 7.52. H 450 ısıtılmış numunelerde bağıl doğrusallık hatası



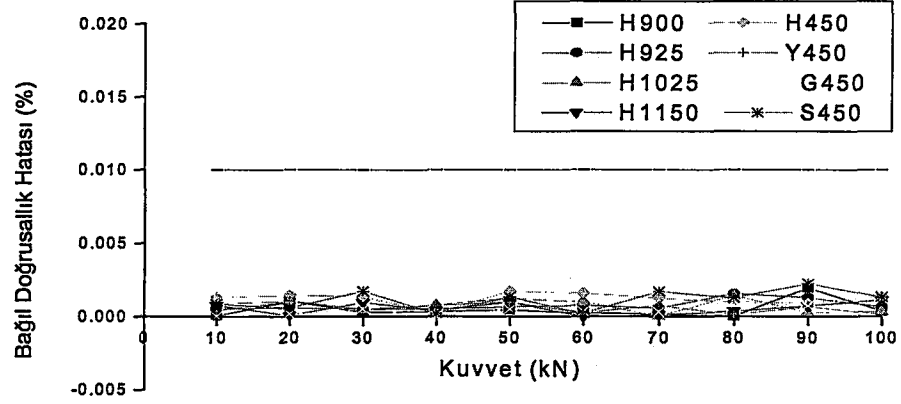
Şekil 7.53. Y 450 ısıtılmış numunelerde bağıl doğrusallık hatası



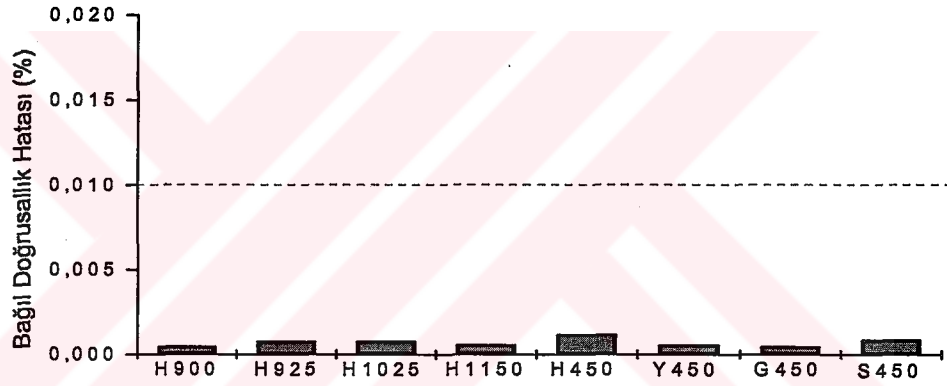
Şekil 7.54. G 450 ısıtılmış numunelerde bağıl doğrusallık hatası



Şekil 7.55. S 450 ısıtılmış numunelerde bağıl doğrusallık hatası



Şekil 7.56. Tüm numunelerin bağıl doğrusallık hatası grafikleri



Şekil 7.57. Tüm numunelerin ortalama bağıl doğrusallık hatalarının sütun grafiği

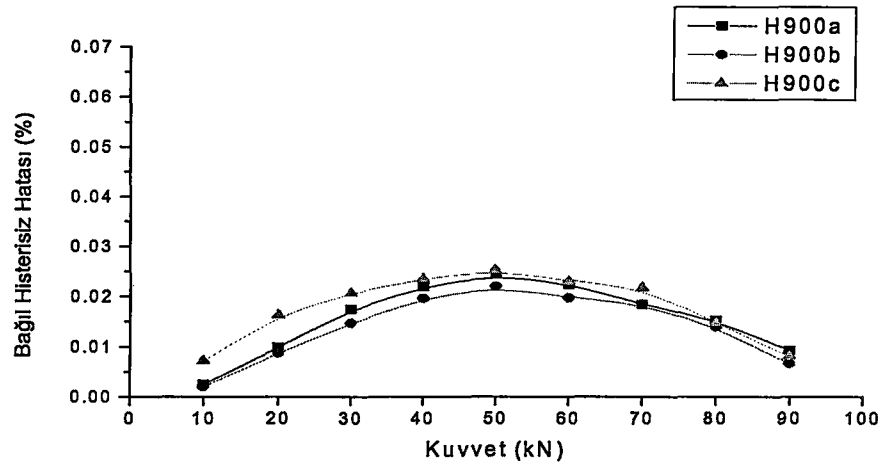
Tablo.7.4. Numunelerin bağıl doğrusallık hata değerleri

Numune Kodu	Bağıl Doğrusallık Hatası		
	Minimum (%)	Maksimum (%)	Ortalama (%)
H900	-0.0030	0.0002	0.0005
H925	-0.0027	0.0031	0.0008
H1025	-0.0019	0.0037	0.0008
H1150	-0.0017	0.0024	0.0006
H450	-0.0035	0.0032	0.0012
Y450	-0.0024	0.0017	0.0006
G450	-0.0021	0.0031	0.0005
S450	-0.0019	0.0023	0.0009

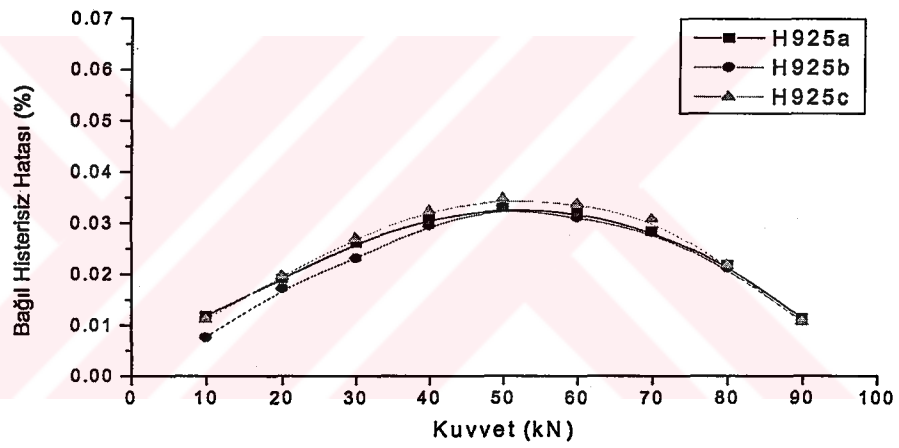
7.6.3. Bağıl histerisiz hatası

Histerisiz hatası, kuvvet dönüştürücüsünde aynı yük değeri için artan ve azalan yükleme yönünde okunan değerler arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Elde edilen farkın tam yükteki çıkış değerine bölünmesi ile bağıl histerisiz hatası elde edilmektedir. EN 10002-3 standardına göre kalibrasyonları gerçekleştirilen dönüştürücülerin bağıl histerisiz hatası değerinin, yüksek doğruluk sınıflarından olan Sınıf 00 için % 0.015'e Sınıf 0.5 için ise % 0.03'e eşit veya daha küçük olması istenmektedir (EN-10002-3, 1994).

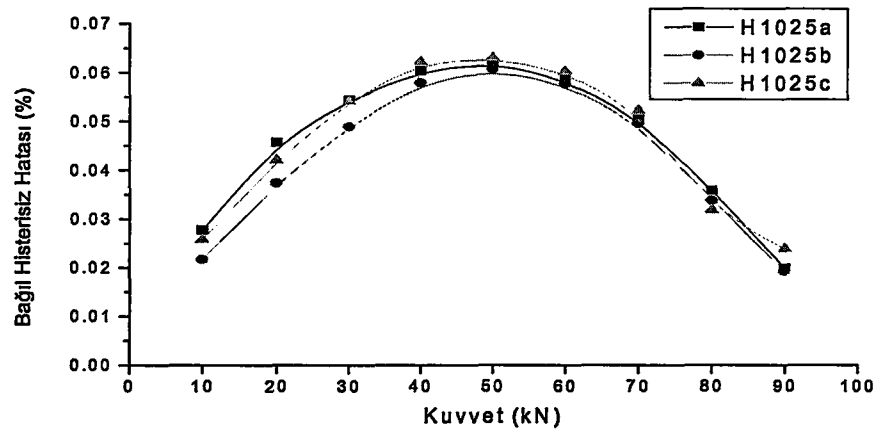
Şekil 7.58'de H 900 ısıtma işlemi sonrası numunelerin histerisiz hata grafikleri verilmiştir. Üç numunenin grafikleri birbirine çok benzer olup ortalama değer olarak 0.024 değerine sahiptir. Benzer şekilde şekil 7.59, 7.60, 7.61, 7.62, 7.63, 7.64 ve 7.65'de sırasıyla H 925, H 1025, H 1150, H 450, Y 450, G 450, S450 ısıtma işlemli numunelerin histerisiz hata grafikleri verilmiştir. Şekil 7.66'da ise tüm ısıtma işlemli numunelerinin hata değerleri ortalamaları tek grafik halinde verilmiştir. Bu numunelere ait karşılaştırma tablosu ise Tablo 7.5'de verilmektedir. Bu tabloda % olarak verilen histerisiz hataları arasında karşılaştırma yapılmıştır. Bu tabloda "ortalama" olarak verilen değer aynı kodlu numunelerin farklı dirençli uzama ölçer devresinden elde edilen ve hepsinde en büyük histerisiz hatasının görüldüğü 50 kN 'daki kuvvet değerine sahip histerisiz hatalarının ortalama değerini, "maksimum" olarak verilen değer bunlar içinde en büyük histerisiz hatasını, "minimum" olarak verilen değer ise bunlar içinde en küçük histerisiz hatasını göstermektedir.



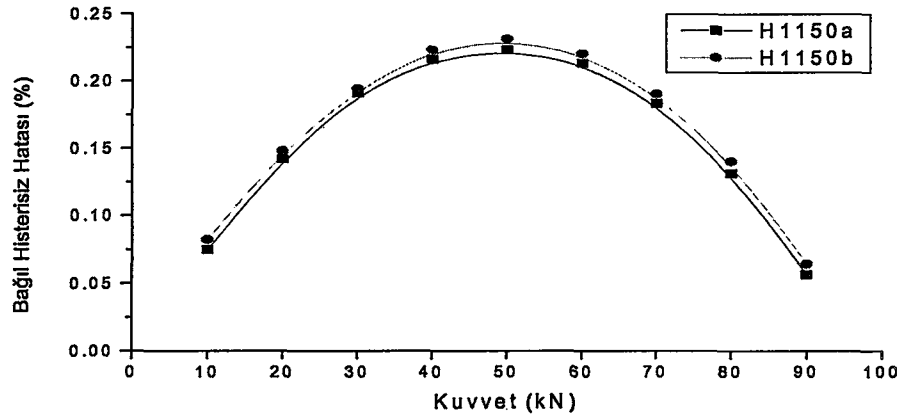
Şekil 7.58. H 900 ısıtılmış numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği



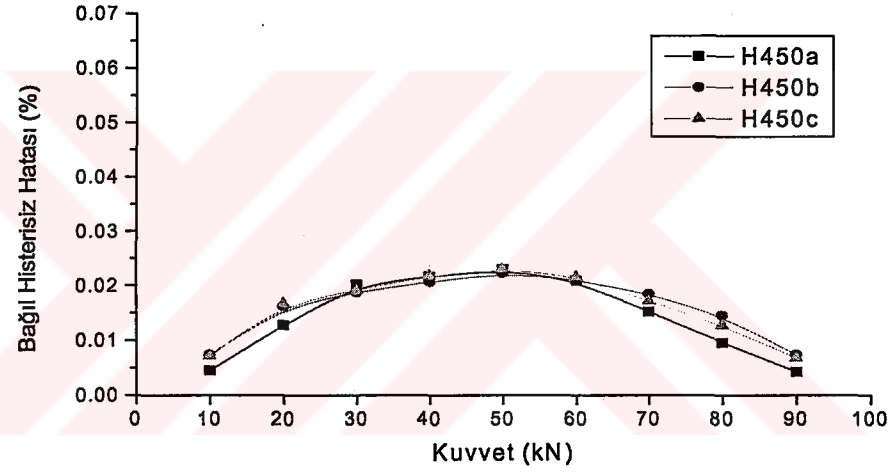
Şekil 7.59. H 925 ısıtılmış numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği



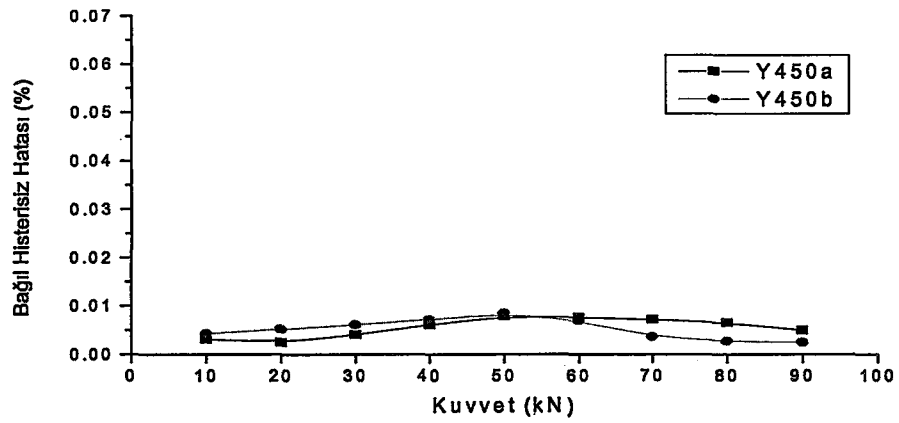
Şekil 7.60. H 1025 ısıtılmış numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği



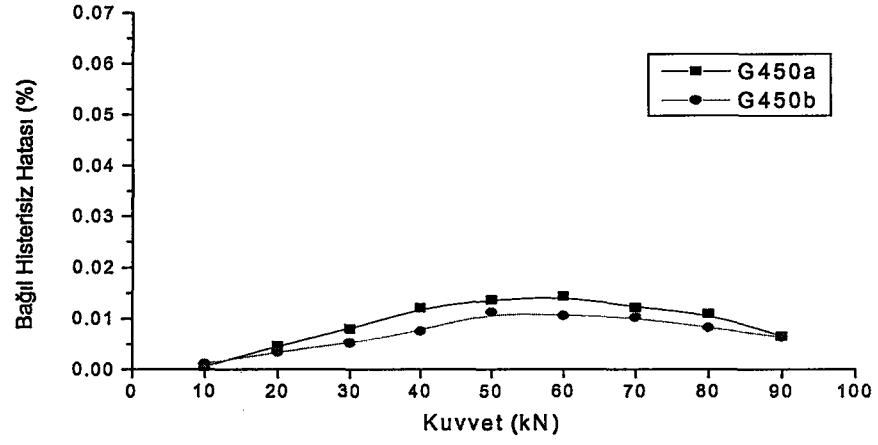
Şekil 7.61. H 1150 ısıt işlemlili numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiğı



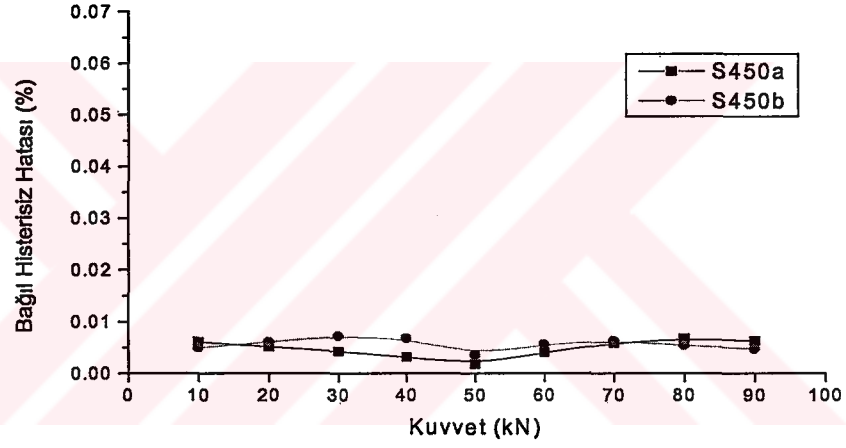
Şekil 7.62. H 450 ısıt işlemlili numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiğı



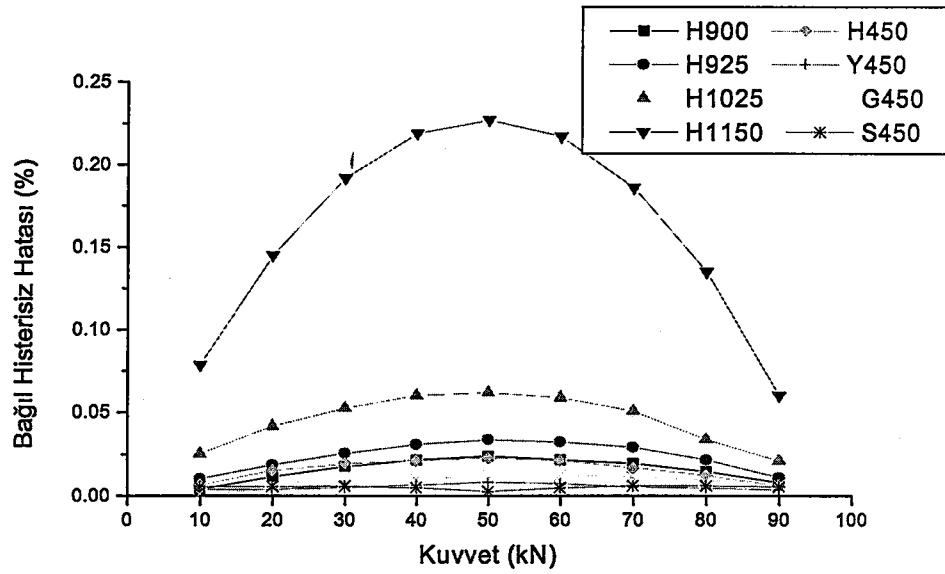
Şekil 7.63. Y 450 ısıt işlemlili numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiğı



Şekil 7.64. G 450 ısıtılmış numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği



Şekil 7.65. S 450 ısıtılmış numunelerde bağıl histerisiz hatası grafiği



Şekil 7.66. Tüm ısıtılmış numunelerin bağıl histerisiz hatası grafiği

Tablo.7.5. Numunelerin bağıl histerisiz hata verileri

Numune Kodları	Bağıl Histerisiz Hatası		
	Minimum (%)	Maksimum (%)	Ortalama (%)
H900	0.0220	0.0253	0.0239
H925	0.0330	0.0348	0.0337
H1025	0.0607	0.0630	0.0620
H1150	0.2230	0.2310	0.2270
H450	0.0223	0.0231	0.0228
Y450	0.0079	0.0085	0.0082
G450	0.0113	0.0137	0.0125
S450	0.0018	0.0036	0.0027

Numunelerin histerisiz hatalarına ait grafikler ve Tablo 7.4'te verilen değerler incelendiğinde, numunelere uygulanmış olan ısıtılmış işlemlerin kuvvet dönüştürücülerde histerisiz hatasını doğrudan değiştirdiği görülmektedir. Genel olarak incelendiğinde, malzemeye uygulanan yaşlandırma ısıtılmış işlem sıcaklığının artmasıyla ve buna bağlı olarak sertliğin azalmasıyla histerisiz hatasında da belirgin bir kötüleşme görülmektedir.

7.6.4. Bağıl sürünme hatası

Kuvvet dönüştürücünün maksimum çalışma kapasitesi kadar yük ile ani olarak yüklenmesi ve bu sabit yükte belirli bir süre beklenmesi veya yüklenmiş dönüştürücünün ani olarak boşaltılması sonucu, kuvvet dönüştürücünün çıkış sinyalindeki değişim veya kayma sürünme hatası olarak tanımlanmaktadır. Numunelerin ilk sıfır değerleri alındıktan sonra tam yükün yüklenmesi ile (100 kN) bir dakikada bir veri alınarak toplam 20 dakika (1200 sn) süre için yapılmış olan ölçümler sonucunda sürünme davranışlarında farklı ısıl işlemlerden dolayı oluşan farklar belirlenmiştir.

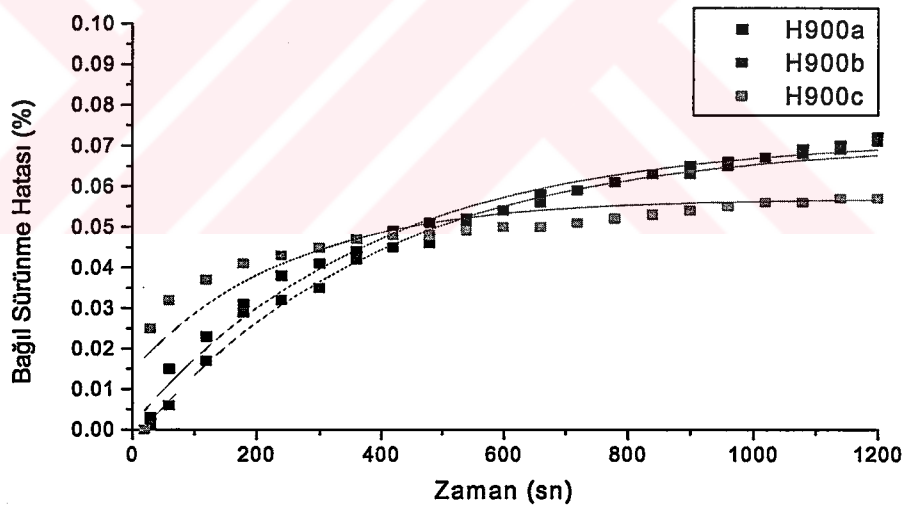
Bilinen klasik sürünme deneyleri çok uzun süreleri kapsamakta ve sürünme deneylerinde kullanılan cihazlar kullanılan kuvvet dönüştürücülerde meydana gelen sürünme değerlerini ölçebilecek hassasiyeti taşımamaktadır. Kuvvet dönüştürücülerde oluşan sürünme miktarı ilk 10 dakikalık süre içinde oldukça yüksek olmakta daha sonra ise giderek azalarak yaklaşık sabit kalma eğilimi göstermektedir. Ayrıca, seviyesi mühendislik tasarımları için dikkate alınacak büyüklükte de olmamaktadır (Spor, 1986). Örneğin, toplam yük karşısındaki kuvvet dönüştürücü yay elemanında oluşan birim şekil değişimi değeri $1500 \mu\text{m}/\text{m}$ olduğuna ve kuvvet dönüştürücülerinin sürünme değeri de % 0.03 seviyesinde olduğuna göre bu yaklaşık $0.5 \mu\text{m}/\text{m}$ 'lik bir birim şekil değişimine neden olmaktadır (Measurements Group katalog). Buradan anlaşılacağı üzere, bu uzama değeri mühendislik tasarımları için çok küçüktür. Ayrıca mühendislik tasarımları için oda sıcaklığında elastik sınır içinde kalan sürünme değeri de çok küçük olduğu için dikkate alınmamakta ve sürünme deneyleri genellikle yüksek sıcaklık bölgelerinde gerçekleştirilmektedir. Yalnız, kuvvet dönüştürücüsü sürünme performansı için, oda sıcaklığında uygulanan yük süresine bağlı olarak sürünme hatasında artma meydana geleceği ve diğer performans özelliklerini de etkileyebileceği için ölçülmesi ve belirlenmesi gereklidir (Bergqvist, 1986 - Spor, 1986).

Kuvvet dönüştürücüleri için kullanımda farklı zamanlarda alınacak ölçüm verilerinin olabildiğince düşük sürünme hatasını göstermesi çok önemlidir. Kuvvet dönüştürücünün sürünme davranışı zaman bağımlı olup grafiklerden de görüldüğü gibi artan zamanla ölçülen değerde daha yavaş bir artma görülmektedir. Kullanım sırasında farklı sürelerde ölçüm alındığı zaman sürünmeden dolayı farklı değerler okunacağı için

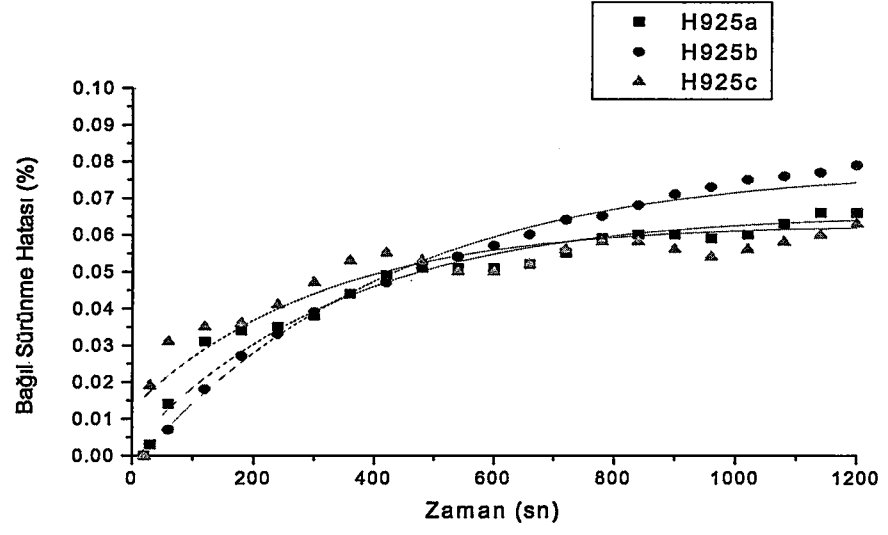
ve bu da bir tekrarlanabilirlik hatası getirecektir. Kuvvet dönüştürücü kullanıcısının süreyi ayarlaması ve hep aynı sürelerde ölçüm almaya çalışması çok zor olacağından dolayı; düşük sürünme, çok istenen gerekli bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır.

Şekil 7.67, 7.68, 7.69, 7.70, 7.71, 7.72, 7.73 ve 7.74'te üzerlerinde ısı işlem durumu adları verilmiş numunelerin sürünme hatası grafikleri gösterilmiştir. Şekil 7.75'de ise, tüm ısı işlem numunelerinin sürünme hatası değer ortalamaları grafikler halinde toplu olarak verilmiştir.

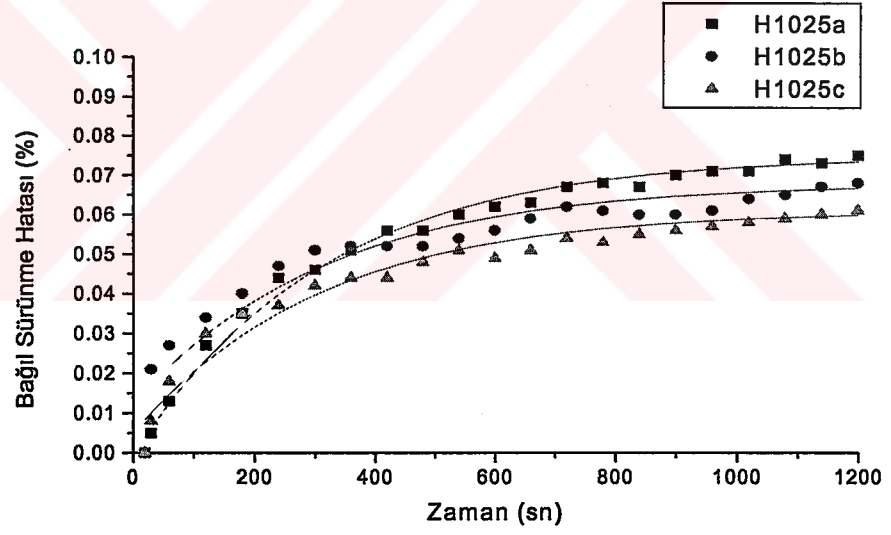
Tablo 7.6'da deney süreleri olan 60, 120, 600 ve 1200'üncü saniyelerdeki sürünme hataları bir arada verilmiştir. Bu tabloda da diğerlerine benzer şekilde "ort" olarak verilen değer aynı kodlu numunelerin farklı dirençli uzama ölçer devresinden elde edilen sürünme hatalarının ortalama değerini, "mak" olarak verilen değer bunlar içinde en büyük sürünme hatasına sahip olan numuneyi, "min" olarak verilen değer ise bunlar içinde en küçük sürünme hatasına sahip olan numuneyi göstermektedir.



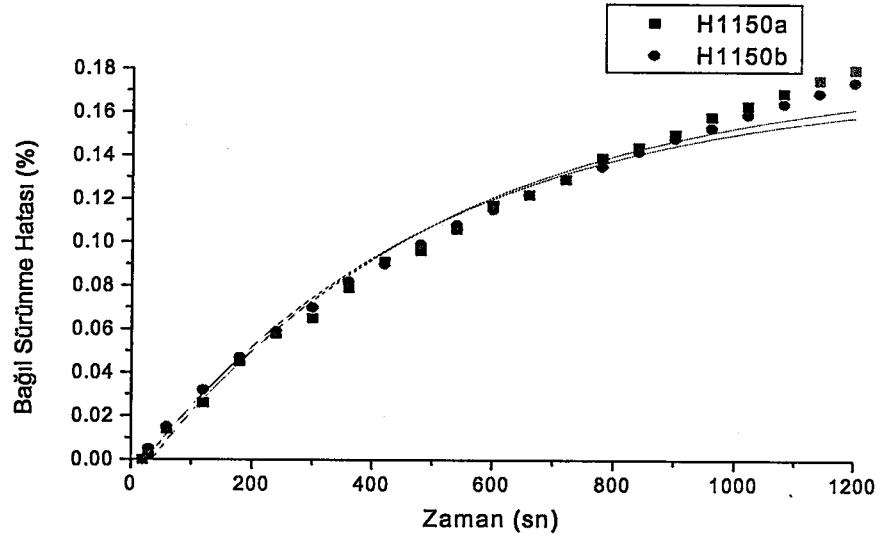
Şekil 7.67. H 900 ısı işlemli numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği



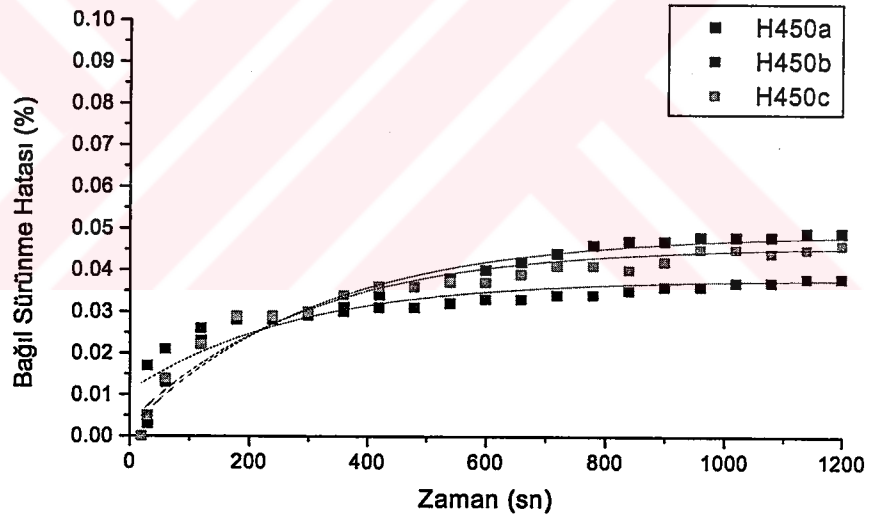
Şekil 7.68. H 925 ısıtılmış numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği



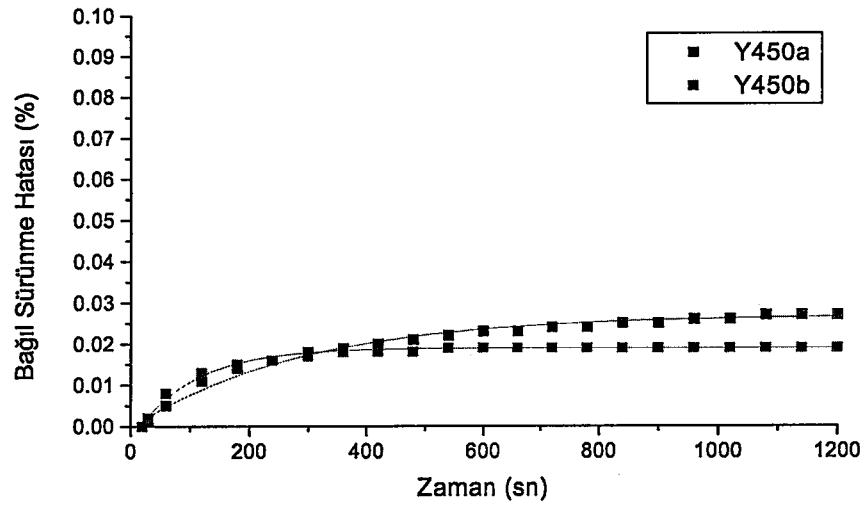
Şekil 7.69. H 1025 ısıtılmış numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği



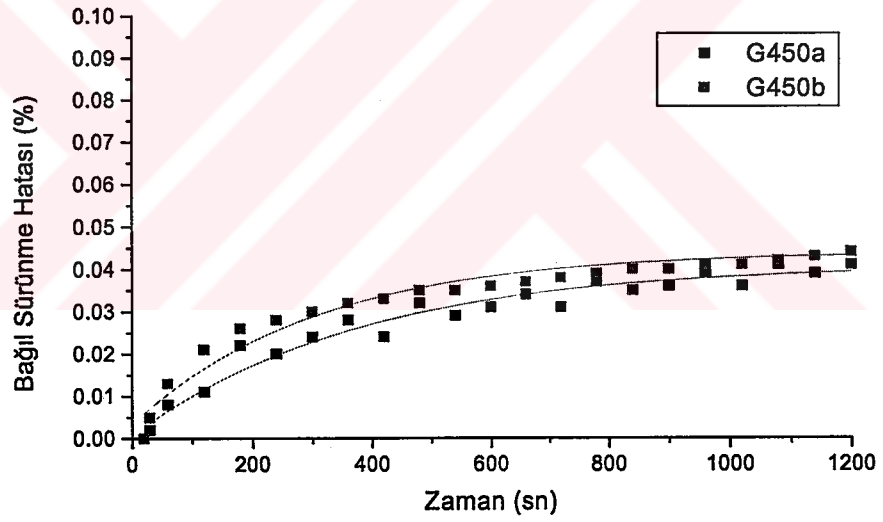
Şekil 7.70. H 1150 ısıtılmış numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği



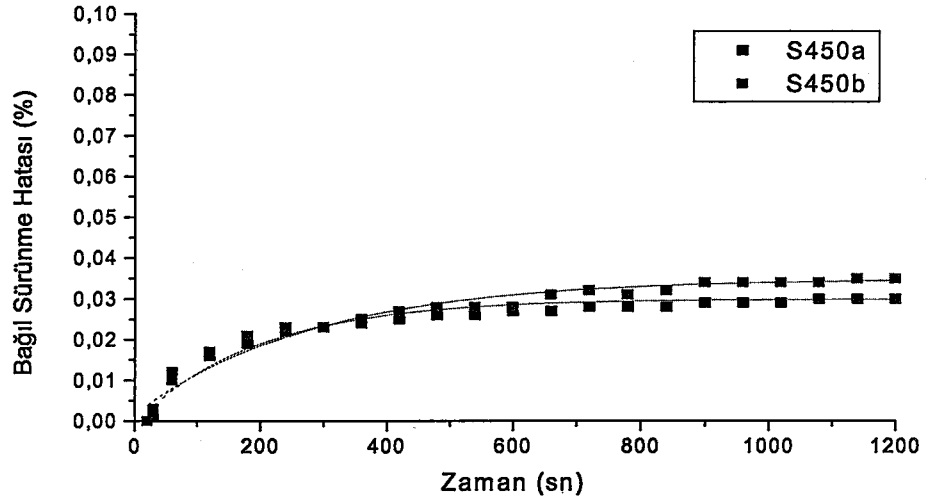
Şekil 7.71. H 450 ısıtılmış numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği



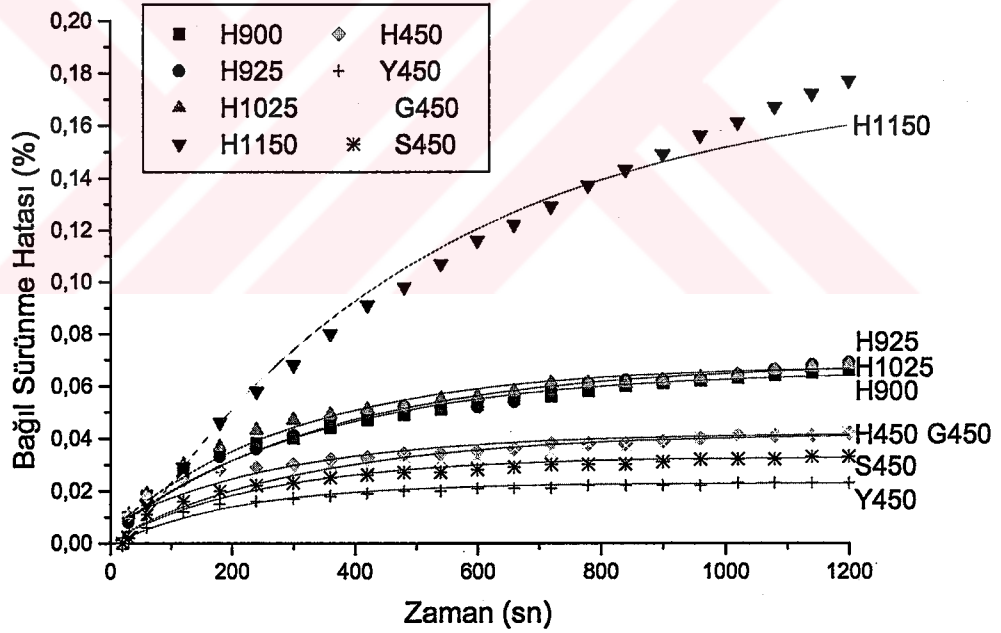
Şekil 7.72. Y 450 ısıtılmış numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği



Şekil 7.73. G 450 ısıtılmış numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği



Şekil 7.74. S 450 ısıtılmış numunelerde bağıl sürünme hatası grafiği



Şekil 7.75. Tüm ısıtılmış numunelerin ortalama bağıl sürünme hatası grafiği

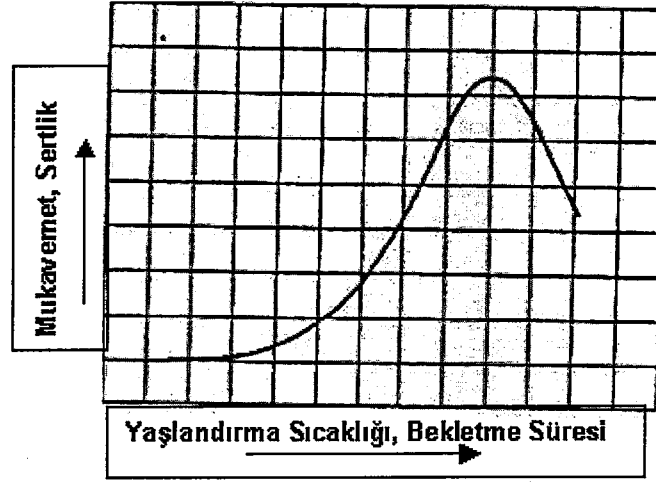
Tablo 7.6. Belirli zaman dilimlerindeki bağıl sürünme hataları

Numune Kodları	Bağıl Sürünme Hatası, (%)											
	60 s			120 s			600 s			1200 s		
	Min	Mak	Ort	Min	Mak	Ort	Min	Mak	Ort	Min	Mak	Ort
H900	0.006	0.032	0.018	0.017	0.037	0.026	0.050	0.054	0.053	0.057	0.072	0.066
H925	0.007	0.031	0.017	0.018	0.035	0.028	0.050	0.057	0.052	0.063	0.079	0.069
H1025	0.013	0.027	0.019	0.027	0.034	0.030	0.049	0.062	0.056	0.061	0.075	0.068
H1150	0.014	0.015	0.015	0.026	0.032	0.029	0.115	0.117	0.116	0.174	0.180	0.177
H450	0.013	0.021	0.018	0.022	0.026	0.024	0.033	0.040	0.035	0.038	0.049	0.042
Y450	0.005	0.008	0.006	0.011	0.013	0.012	0.019	0.023	0.021	0.019	0.027	0.023
G450	0.008	0.013	0.010	0.011	0.021	0.016	0.031	0.036	0.033	0.041	0.044	0.042
S450	0.010	0.012	0.011	0.016	0.017	0.016	0.027	0.028	0.028	0.030	0.035	0.033

8. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Bu çalışma kapsamında, 17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelikten farklı ısıtma işlemleri sonrasında üretilen kuvvet dönüştürücülerin performans özelliklerinin değerlendirilmesinde bağıl tekrarlanabilirlik, bağıl doğruluk, bağıl histerisiz ve bağıl sürünme hataları saptanmıştır.

Öncelikle numunelerde uygulanan ısıtma işlemleri sonucunda ortaya çıkan iç yapılarının belirlenebilmesi amacıyla optik mikroskop, tarama elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ve X ışını tarama incelemeleri ve sertlik değerlerinin ölçümü yapılmıştır. Optik mikroskop ve SEM incelemeleri sonucunda 17-4PH çeliğin temel mikroyapısının plakalı martenzitik bir yapıda olduğu belirlenmiştir. X ışını difraktometre ölçümlerinde ise yalnızca Durum A numunesinde az miktarda ostenit belirlenmiş olup diğer numunelerde farklı bir yapı elde edilememiştir. En son olarak yapılan TEM incelemesinde ise, tüm numunelerde plakalı martenzit yapısı görülebilmektedir. H900, H925, H1025 ve H1150 ısıtma işlemleri sonucunda Cu çökelti taneciklerinin artan yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile aşırı yaşlanmaya doğru gidişte boyutlarının giderek büyüdüğü saptanmıştır. 17-4PH paslanmaz çelik malzemede ana martenzit yapısının sertliğini daha fazla arttırabilmek amacıyla, yaşlandırma ile yapıda çökelti oluşturulur ve bu sayede yapıda ek sertlik artışı elde edilir. Ancak, çökelti taneciklerinin yapı en sert konumda iken optimum boyutta oldukları kabul edilir ve bu durum diğer değerlere göre düşük sıcaklık ve daha az bekletme süresinde sağlanır. Bundan sonra çökelti taneciklerinde irileşme başlar ve yapının sertliğinde giderek azalma meydana gelir. Şekil 8.1'de yaşlandırma sıcaklığı ve bekletme süresi ile sertlik arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bu çalışmada belirtilen değişim süreci TEM incelemesi ve sertlik ölçümü ile belirlenmiştir. Ayrıca, aşırı yaşlanmış numune olan H1150 ısıtma işlemli numunenin fotoğraflarında Cu çökelti taneciklerinin TEM numunesi hazırlanması sırasında yapıdan koparak döküldükleri saptanmıştır.



Şekil 8.1. Yaşlandırma sıcaklığı ve bekleme süresinin mukavemet, sertlik üzerindeki etkileri

Çözeltiye alma işlemi sonrasında sıvı azot içerisinde bekletilen tüm numunelerde martenzit dönüşümü sıcaklığı daha da aşağıya çekilerek martenzit oluşumu teşvik edilmiş ve bu sayede çökeltme taneciklerin oluşumu kolaylaştırılmıştır. Bilindiği gibi çökelti dislokasyon, ikizlenme, istif hataları ve tane sınırları gibi yüksek enerjili bölgelerde oluşurlar. Sonuç olarakta, artan çökelti oluşumu ile yapıda mukavemet ve sertlik artışı sağlanmış olur.

Çekilen TEM fotoğraflarında özellikle H900, H450, G450, Y450 ve S450 ısıl işlemlenmiş numunelerde Cu çökelti tanecikleri görülebilmiştir. Yaşlandırma sonucunda daha kabalaşmış yapıya sahip olan H925, H1025 ve H1150 ısıl işlemlenmiş numunelerde çökelti Cu tanecikleri görüntülenebilmiştir. Bu durum, fotoğrafların çekiminde kullanılan 100kV kapasiteli TEM cihazının bu çökelti taneciklerini yakalayabilmek için kapasitesinin yeterli olmadığını göstermektedir. Daha gelişmiş cihazlara ihtiyaç duyulduğu ve ileri bir incelemenin gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu incelemeler sonrasında, 17-4PH çelik yay malzemeli kuvvet dönüştürücülerde malzemeye uygulanan ısıl işlemin dönüştürücü performansları üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Genel olarak kuvvet dönüştürücülerde hatalar Bölüm 2’de bahsedildiği gibi bir çok etkenden oluşabilir. Bu çalışmada, sadece yay malzemesinden kaynaklanabilecek etkenler incelenmiş olup; diğer etkenleri ortadan kaldırmak için gerekli özen ve gerekli koşullar yerine getirilmiştir. Tüm numunelere aynı kod numaralı ve aynı özelliklere sahip dirençli uzama ölçerler yapılandırılmıştır. Bu işlemde aynı tür yapıştırıcı kullanılmış,

yapıştırma aynı şekilde uygulanmış, tüm numuneler tek bir basınç aparatı (pense) kullanılarak hazırlanmış ve yapıştırma sıcaklığı otomatik kontrollü fırında aynı değerler girilerek otomatik olarak sağlanmış olup, bu sayede olumsuzluk etkenleri en aza indirebilecek şekilde hep aynı malzeme, koşullar ve sistemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra lehimleme işlemi büyük özen ile gerçekleştirilip elektriksel bağlantılar yapılmıştır. Tüm kuvvet dönüştürücüler kalibreli aynı gösterge cihazına bağlanarak verileri alınmıştır. Ayrıca numunelerin performans ölçümleri, aynı kuvvet standardı makinasında, aynı yükleme hız ve bekleme zamanlarında, aynı bağlantı aparatı ile bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle sürünme hatası zamana bağımlı olduğu için yükleme zamanı ve hızında olabilecek farklılıklar tekrarlanabilirlik, doğrusalılık ve histerisiz hatalarını da etkileyebileceğinden, ölçümler sırasında yükleme hızı ve bekleme süreleri tüm deneylerde aynı olacak şekilde uygulanmıştır (Spor, 1986). Tüm numuneler “çekme” türünde imal edilmiş olup bu numunelerin kuvvet makinasına bağlantısı EN 10002-3 standardında belirtilen standard küresel başa sahip kendiliğinden merkezleme sağlayan parçalarla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler yükleme eksenini kendiliğinden ayarlayan aparat ile gerçekleştirildiğinden montaj ve yükleme karakteristikleri hepsi için aynıdır. Bundan dolayı, tüm numuneler birbirleriyle karşılaştırıldıklarında, genellikle basma kuvveti uygulamalarında rastlanan eksen kaçıklığı problemi (Gizmajer, 1994), yükleme ve aparattan gelebilecek etki hepsine yansdığından sonuçlar açısından malzeme dışında bir etkinin olması beklenmemektedir. Bu nedenle, çalışma kapsamında sadece ısıl işlem farklılıklarını verebilecek çeşitli deney numuneleri arasında bir karşılaştırma yapıldığı için literatürde rastlanan montaj ve yüklemenin neden olduğu hata kaynakları dikkate alınmamaktadır (Allgeier, 1994).

Tüm numuneler torna tezgahında hazırlandıktan sonra dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılacağı bölgelere belirli toleransla silindirik taşlama işlemi yapılması ve bunu takiben aynı bölgeye yapılan belirli kalınlıktaki (320 mesh numaralı) zımparalarla yüzeyin hazırlanması işlemi histerisiz hata değerlerinde oluşabilecek farklılıkları en aza indirmek için gerçekleştirilmiştir. Numunelere gösterilen özene karşın, aynı malzeme özelliklerine sahip numune grubu için, histerisiz hata değerlerinde genellikle %0.01'lik bir bant aralığı içinde kalan farklar oluşturmaktadır. Bunun nedeni, yapıştırma

koşullarından (yapıştırıcı kalınlığı, sıkma basıncı, basıncın tam tekrarlanabilir ve homojen uygulanmaması gibi) oluşabilecek farklılıklar ile açıklanmaktadır (Technical Note,1978). Bu farklılıkların sayısal seviyesi ile ilgili olarak Fank (2002)'ın doktora tezinde, bu konu ile ilgili olarak yurtdışındaki uzman araştırmacılarla yapılan yazılı iletişimde, bu seviyenin genel olarak % 0.01 bant aralığı içinde kalabileceği şeklinde bir görüş belirtilmektedir.

Tüm numuneleri ne kadar eşit koşullarda yapılmaya çalışılırsa da her işlemin (özellikle yapıştırma) çok ufak bir ayrıntısı veya gözden kaçan bir nedeninden dolayı, deney sonuçlarında küçük farklılıkların görülmesi olasıdır. Özellikle, uzama ölçerlerin yapıştırılıp, gerekli bağlantıları yapıldığında, her numune için sıfır yükte farklı başlangıç değerlerinin okunduğu gözlenmiştir. Bilindiği gibi, her numunenin ait olduğu devreye eklenecek dirençlerle bu değerin sıfırlanması sağlanabilmektedir. Bu durum kullanım sırasında kullanıcıya kolaylık sağlaması için yapılan bir işlem olup performansı etkilememektedir. Bu nedenle, çalışmada bu tip bir uygulamaya gidilmemiş, başlangıçtaki sıfır değeri tüm ölçüm verilerinden çıkarılarak verilerin sıfırlanması sağlanmış ve hesaplamalar bu değerler kullanılarak yapılmıştır.

Aynı şekilde, daha önceden belirtildiği gibi sıcaklık değişiminden kaynaklanabilecek etkiler için de herhangi bir kompanzasyon işlemine gidilmemiştir. Bunun nedeni, UME Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarında sıcaklık değişiminin bir ölçüm sırasında ± 0.2 °C aralığında kalabilecek şekilde sıcaklık kontrolünün hassas olarak sağlanmış olmasıdır. Bunun yanısıra, dirençli uzama ölçerlerin kendiliğinden sıcaklık kompanzasyonuna sahip olmaları "self compensating gage" nedeniyle sıcaklıktan etkilenmeleri oldukça azaltılmış olup, bu seviyedeki bir sıcaklık değişiminin ölçüm sonuçlarına etkisi ihmal edilebilecek kadar küçüktür (Measurements Group katalog, Technical Note, 1992).

Bu çalışmaya yönelik olarak başlangıçta yapılan literatür araştırmalarında kuvvet dönüştürücü performansını belirleyen hatalar üzerine az sayıda bilimsel yayın bulunmaktaydı. Bu yayınlarda, hatalardan özellikle tekrarlanabilirlik ve doğrusallık hatalarının kuvvet dönüştürücü malzemesine ve uygulanan ısı işlemlere bağlı olmadığı, histerisiz ve sürünme hatalarının ise malzeme ve ısı işleme bağlı olduğu genel olarak

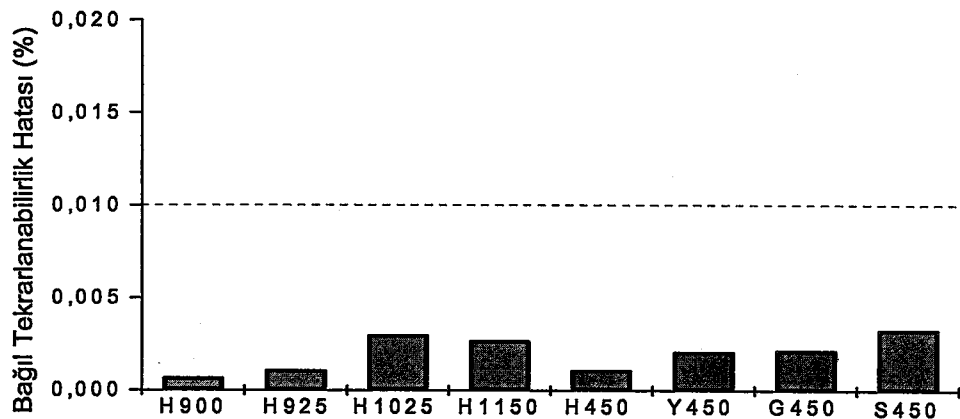
ifade edilmekteydi. Ancak, hangi malzeme yapılarının ve sertliğin bu hataları ne oranda etkilediği ve hangi işlemler uygulanırsa ne kadar etkilediği üzerinde kesin bilgi mevcut değildi. Bu durum, genelde bu bilgilerin kuvvet dönüştürücü üreticileri arasında yaşanan rekabetten dolayı açıklanmamasından dolayı kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada, hata değerlerinin tümü tam yükteki değere bölünerek hesaplandığından “bağlı” olarak ifade edilmişlerdir. Bu bölümde, bağlı ifadesi bazı tanımlarda verilmemesine karşın verilen tüm değerlerde ve tablolarının oluşturulmasında esas olarak bağlı değerlerden yararlanılmıştır.

8.1. Tekrarlanabilirlik Hatası

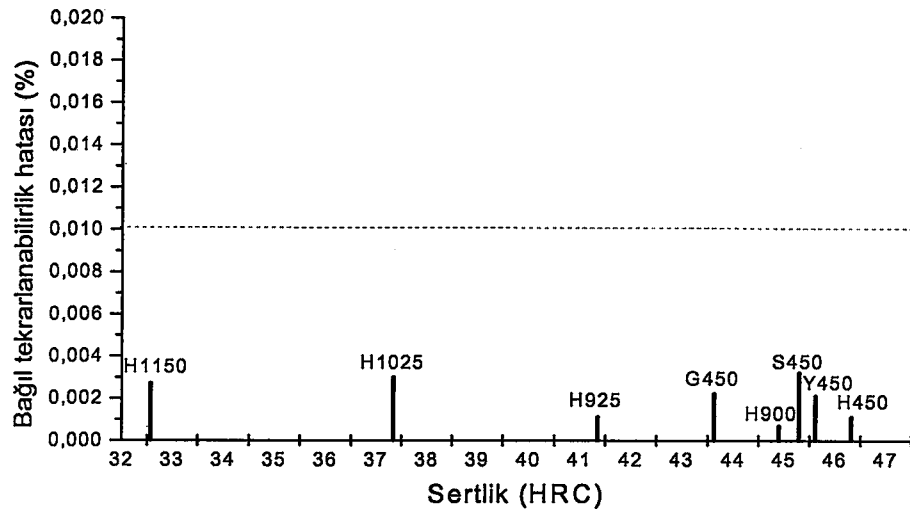
Tekrarlanabilirlik hatası, kuvvet standardı makinasının aynı yükleme koşulları altındaki kuvvet dönüştürücüden aynı kuvvet değerinde alınan ölçüm sonuçları arasındaki fark olarak ifade edilmektedir.

Deneysel çalışma sonrası numunelerin elde edilen ortalama tekrarlanabilirlik hataları ile ilgili Bölüm 7’de verilen tüm grafikler ve tüm numunelerin ortalama hata değerlerine göre oluşturulan grafik (Şekil 8.2) incelendiğinde, tekrarlanabilirlik hataları arasındaki fark malzeme yapısı ne olursa olsun ortalama değer olarak en fazla % 0.003 seviyesinde elde edilmiş olup bu değer, en iyi sınıflı kuvvet dönüştürücüler için bile kabul edilebilir sınırın ancak üçte biri kadardır (Şekil 8.2).



Şekil 8.2. Tüm numunelerin ortalama tekrarlanabilirlik hatalarının grafiği

Kuvvet dönüştürücülerin yapılan ölçümlerin güvenilirliği açısından, elde edilen değerlerin tekrarlanabilir olması ve bağıl tekrarlanabilirlik hatasının olabildiğince düşük olması istenmektedir. Bunun için de tekrarlanabilirlik hatasının belirlenmesi sırasında uygulanan kuvvetlerin doğruluğu ve aynı doğrulukla tekrar uygulanabilirliği oldukça önemlidir. Çünkü tekrarlı kuvvetlerin kuvvet dönüştürücüye uygulanmasında oluşabilecek farklılıkların uygulanan kuvvetlerden mi yoksa kuvvet dönüştürücünün tekrarlanabilirlik hatasından mı kaynaklandığını belirlemek olanağı yoktur. Bu çalışmada, uygulanan kuvvetler ölü ağırlıklı kuvvet makinası ile en doğru ve tekrarlanabilir olarak gerçekleştirildiği için böyle bir durum oluşmamıştır. Ölü ağırlıklı kuvvet makinalarında aynı kuvvetlerin uygulanabilmesinden dolayı, ideal durumda kuvvet dönüştürücülerden aynı çıkış verilerinin alınması gerekir (Allgeier, vd., 1998). Ancak, özellikle dirençli uzama ölçerlerin üretim farklılıkları, yapıştırma işlemleri, yapıştırma yüzeyleri arasındaki imalat, taşlama ve zımparalamadan kaynaklanan yüzey pürüzlülük farkları, yapıştırma basıncına bağlı olarak yapıştırıcı kalınlık farkı, yapıştırma sıcaklığı, malzeme ısı işlem farklılıkları, malzeme yapısındaki homojensizlikler gibi farklılıklar kuvvet dönüştürücü performansını yani tekrarlanabilirlik hatasını etkileyebilmektedir. Ek olarak, kuvvet dönüştürücülerin yükleme koşullarının ve yükleme aparatlarının da tekrarlanabilirliği etkilediği bilinmektedir (Allgeier, 1994 - Technical Note, 1978 - Kawai, 1984 - Fank, 2002). Örneğin, yük uygulama eksenini ve yükleme noktasının tekrarlı yükleme sırasında eşit olmamasının ve bundan dolayı kütlelerin salınımının tekrarlanabilirlik hatası üzerine etkisi büyüktür. Açıklanan bu farklılıkların sonucu olarak, her bir dönüştürücüde farklı tekrarlanabilirlik hatalarının elde edilmesi açıklanabilmektedir. Fakat bu farklılığın kuvvet dönüştürücü doğruluk sınıfını değiştirmeyecek mertebede kalması önemlidir. En iyi doğruluk sınıfına sahip dönüştürücülerin tekrarlanabilirlik hata sınırının % 0.01 olduğuna göre, bu sınırlar içinde kalabilecek farklılıkların kabul edilebilir olduğu anlaşılmaktadır.



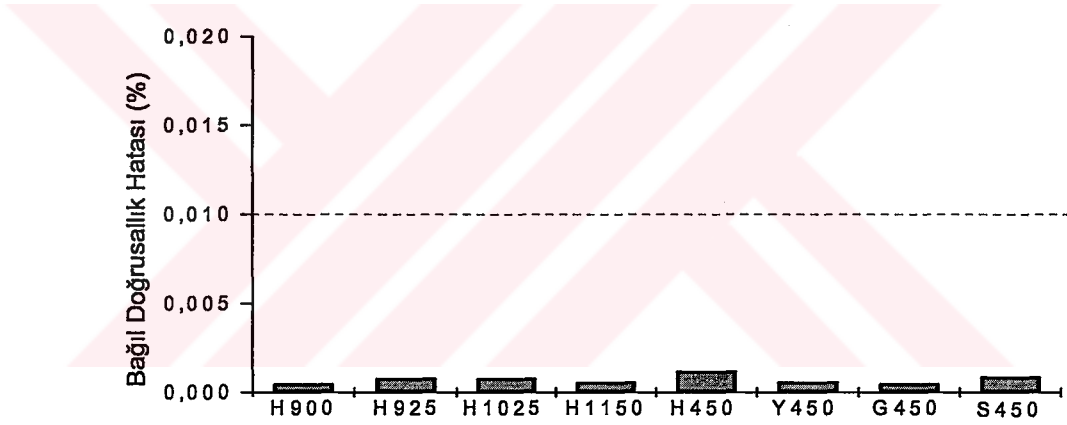
Şekil 8.3. Numunelerin ortalama tekrarlanabilirlik hatasının sertlik ile değişimi grafiği

Numunelerin ortalama tekrarlanabilirlik hataları ile sertliklerindeki değişim grafiği ise Şekil 8.3'te verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi tekrarlanabilirlik hata değerleri ile sertlikle arasında bir uyum yoktur. HRC 41 ile 46 arasında kalan H 900, H 925 ve H 450 ısıtılmış numuneler daha düşük hata değerleri gösterirken, aynı bölgedeki G450, S450 ve Y450 ısıtılmış numuneler onlara göre yüksek değerlere sahiptirler. H1025 ve H1150 ısıtılmış numunelerin hata değerleri ise G450 ve Y450 ısıtılmış numunelerden daha yüksektir. Ancak, unutulmamalıdır ki hata değerleri oldukça küçük rakamlar olması nedeniyle grafikte değişim gözlemlense bile kuvvet dönüştürücülerin performansının değerlendirilmesinde bu rakamlar ihmal edilebilecek düzeydedir. Ayrıca, aynı ısıtılmış numunelerdeki tekrarlanabilirlik hatasının saçılması da yaklaşık benzer farklılıklar göstermesi nedeniyle tekrarlanabilirlik hatası ile malzeme yapısı arasında doğrudan bir ilişki kurulamadığı söylenebilir. Bu nedenle, mevcut farklılıkların dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılması sırasında oluşabilecek farklılıklardan ve yükleme koşullarından kaynaklanabileceği yorumu yapılmıştır.

8.2. Doğrusallık Hatası

Doğrusallık hatası, ölçüm verilerinin artan yükleme yönündeki ölçüm verilerine uydurularak elde edilen ideal eğriden elde edilen verilerden olan sapması olarak tanımlanmaktadır.

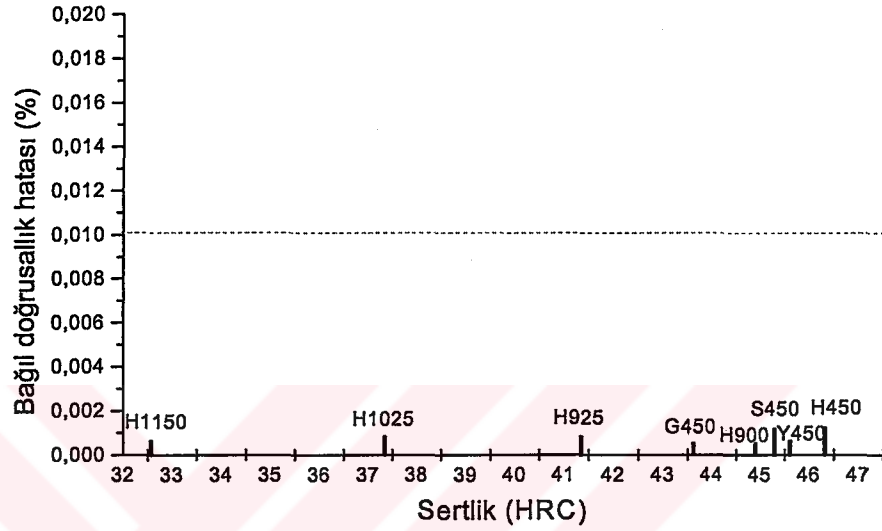
Bölüm 7’da verilen doğrusallık hata grafikleri ve Tablo 7.4’deki değerler incelendiğinde, doğrusallık hatası olarak numuneler arasında önemli bir fark görülmemektedir. Doğrusallık hataları arasındaki fark malzeme yapısı ne olursa olsun ortalama değer en fazla % 0.012 mertebesinde çıkmaktadır (Şekil 8.4) ve bu değer, en iyi sınıflı kuvvet dönüştürücüler için sınıf 00 için hata sınırı olan % 0.01’in ancak sekizde biri oranında kalmaktadır ve bu nedenle aradaki farklılıkların dikkate alınmayacak derecede küçük olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 8.4. Tüm numunelerin ortalama doğrusallık hatalarının grafiği

Bu konu ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda bağıl doğrusallık hatasının normal koşullar altında sadece kuvvet dönüştürücü tasarımından, montajından, bağlantı aparatlarından ve yük uygulama detaylarından kaynaklandığını belirtilmektedir (Bray, 1990 - Allgeier, 1994 - Kawai, 1984 – Fank, 2002). Bu çalışmada, kullanılan kuvvet dönüştürücü yay elemanı numunelerinin aynı tasarıma sahip olmaları nedeniyle buradan herhangi bir etki gelmesi beklenmemektedir. Kuvvet dönüştürücülerin kuvvet standardı makinasına montajı hep aynı kendi kendine merkezleme özelliğine sahip küresel başlı aparatlarla yapılmıştır. Ayrıca, aynı yükleme hızı ve zamanın kullanılması nedeniyle de yükleme ve montaj koşullarının doğrusallık hatası üzerinde herhangi bir etkisinin

olmayacağı düşünülmektedir. Ancak, dönüştürücü performansını etkileyen hataların tümü üzerinde etkisi olan özellikle dirençli uzama ölçerlerin üretim farklılıkları, yapıştırma işlemleri, yapıştırma basıncına bağlı olarak yapıştırıcı kalınlık farkı vb. etkenlerin de etki yapabileceği düşünülmektedir.



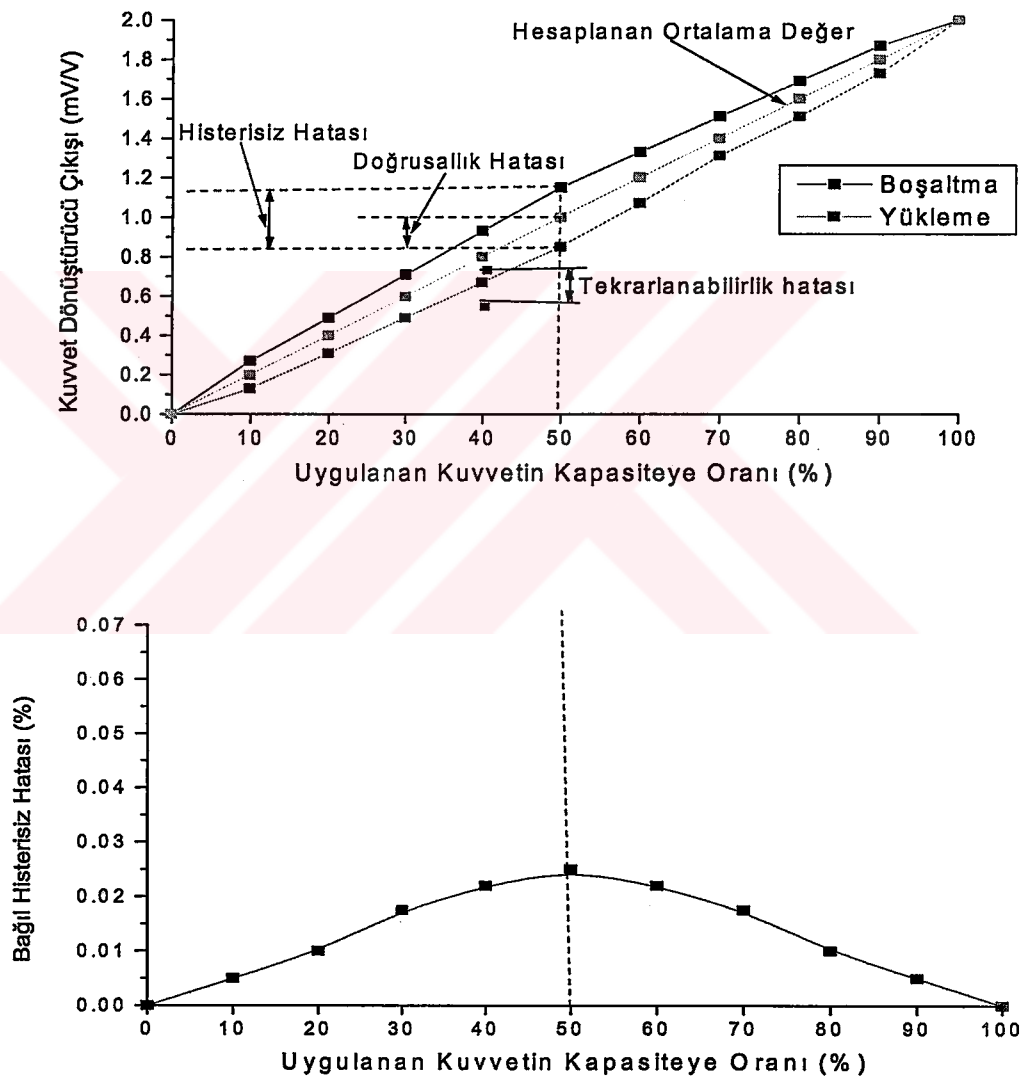
Şekil 8.5. Numunelerin ortalama doğrusalık hatasının sertlik ile değişimi grafiği

Şekil 8.5'te numunelerin tekrarlanabilirlik hatası ile sertlik değişimi grafiği verilmiştir. Grafikte doğrusalık hatasının rakam değerlerin çok küçük olmasından dolayı aradaki ısıtma farkları bile yakalanamamaktadır. Hata değerleri arasında değişim gözlemlense bile kuvvet dönüştürücülerin performansının değerlendirilmesinde bu rakamlar ihmal edilebilecek düzeydedir. Ayrıca diğer tüm hatalarda olduğu gibi aynı ısıtma işlemli numunelerdeki doğrusalık hatalarının da benzer farklılıklar göstermesi tekrarlanabilirlik hatası gibi doğrusalık hatasının da malzeme yapısı ve sertliği gibi kriterlerle arasında doğrudan bir ilişki kurulamadığı söylenebilir.

Tekrarlanabilirlik hatasında olduğu gibi doğrusalık hatasının da malzemeye uygulanan ısıtma işlemle değişen malzemenin mikro yapısına ve sertliğine bağlı olarak meydana gelen değişimlerin olmadığı; aynı ısıtma işlemli numunelerdeki salınımlar kadar ortalama değerlerde de salınımlar görülmüştür. Bu durumda yukarıda anlatıldığı gibi dirençli uzama ölçer yapıştırılmasından vb. etkenlerden kaynaklanabileceği söylenebilir.

8.3. Histerisiz Hatası

Kuvvet dönüştürücüden artan yükleme yönünde alınan çıkış sinyali ile aynı yük değeri için azalan yükleme yönündeki çıkış sinyali arasındaki fark "histerisiz hatası" olarak tanımlanmaktadır. Normal olarak bu hata % 50 yük altında en büyük değerine ulaşmakta ve bu durum Şekil 8.6'da şematik olarak gösterilmektedir (Allgeier ve Evans, 1995, Allgeier,1994).



Şekil 8.6. Histerisiz hatasının şematik gösterimi

Histerisiz hatası, EN 10002-3 standardında belirtilen ve deney sonuçları bölümünde de verilen kuvvet dönüştürücünün doğruluk sınıfı sınır değerleri arasında

diğer hatalara göre 3-6 katına varan seviyelerden daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu da kuvvet dönüştürücü performansını, doğruluğunu ve güvenilirliğini etkileyen en önemli parametre olduğunu başlangıçta bize göstermektedir. Bu nedenle, kuvvet dönüştürücü veya yük hücresi imalatçıları için histerisiz hatasının düşük olması büyük öneme sahiptir.

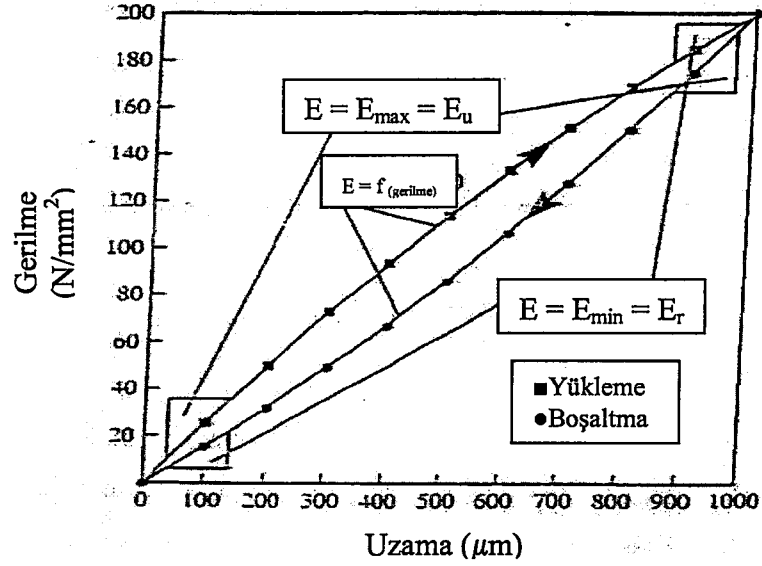
Histerisiz hatası üzerinde etkili olabilecek koşullar olarak, yay malzeme tasarımı, yük uygulama şekli, dirençli uzama ölçer ve yapıştırma özellikleri, yay malzemesi ve ısıtma işlemi düşünülmüştür. Bu çalışmada, Bölüm 6'da da bahsedildiği gibi kolon türü çekme zorlanmalı kuvvet dönüştürücü türü tercih edilmiştir. Oldukça basit yapıda oluşu ve tüm kuvvet dönüştürücülerin aynı türde üretilmeleri nedeniyle yay malzemesi tasarımının histerisiz hatası üzerine etkisinin olmayacağı düşünülmektedir. Aynı şekilde, yükleme şekli ile ilgili olarak, belirlenen ve yük uygulanması ile küresel yuva sayesinde kendi kendine merkezleme yapabilen hep aynı aparatlar kullanılmıştır. Ayrıca, aynı yükleme hızı ve zamanın kullanılması nedeniyle de yükleme ve montaj koşullarının histerisiz hatası üzerinde herhangi bir etkisinin olmayacağı düşünülmüştür. Ancak, dönüştürücü performansını etkileyen hataların tümü üzerinde etkisi olan özellikle dirençli uzama ölçerlerin üretim farklılıkları, yapıştırma işlemleri, yapıştırma basıncına bağlı olarak yapıştırıcı kalınlık farkı vb. etkenlerin de etki yapabileceği çeşitli çalışmalarda incelenmiştir (Kawai, 1984 - Allgeier ve Evans, 1995 - Yamaguchi, vd., 1984 - Allgeier, vd., 1998 - Fank, 2002). Deneysel çalışmada yapıştırma işlemlerinin tüm numuneler için büyük bir özenle ve aynı koşullar altında gerçekleştirilmesinden dolayı histerisiz hatasına olan etkisi önemini yitirmektedir. Bu durumda, histerisiz hatasını etkileyen en büyük parametre olarak yay elemanı malzemesine ait özellikler ön plana çıkmaktadır (Bray, vd.,1990 - Kawai, 1984 - Allgeier, 1994 - Yorgiadis, 1985 - Sava, 1990 - Fank, 2002). Literatürde, farklı bir kaç yay malzemesi için histerisiz hatalarının incelemeleri ile karşılaşılmıştır (Allgeier ve Evans, 1995 - Allgeier, 1994). Allgeier ve Evans'ın 1995'te yaptığı çalışmada, çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin kuvvet dönüştürücülerde yay malzemesi olarak kullanıldıklarında alüminyum ve alaşımlı takım çeliklerine göre genel olarak daha yüksek histerisiz hataları gösterdikleri belirtilmiştir. Kuvvet dönüştürücülerde, dirençli uzama ölçerlerin yapıştırıldığı yay elemanı malzemesine uygulanan ısıtma işlemlerin, histerisiz hatasının büyüklüğü üzerinde etkili

olduğu çeşitli çalışmalarda yayımlanmıştır (Kawai, 1984 - Skundric ve Kovecevic, 1990 - Yorgiadis, 1985 – Allgeier ve Evans, 1995 – Fank, 2002).

Bu çalışmada uygulanan çeşitli ısıl işlemler karşısında sertliği, tane boyutu ve iç yapısı değiştirilen deney malzemesinin histerisiz hatasında belirgin farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Bu farklılıklar numunelere uygulanan ısıl işlemlerin, dislokasyon yapısında oluşturabileceği etkiler ve bu etkilerin histerisiz hatası üzerindeki rolü incelenmeye çalışılmıştır. Bu sayede, histerisiz hatası üzerinde etkili olabilecek mekanizmaların belirlenmesi ve histerisiz hatasını en aza indirecek işleminin saptanması üzerinde durulmuştur.

Allgeier ve Evans'ın, 1995 yılında yapmış oldukları çalışmada eğme tipi zorlanmalı kuvvet dönüştürücülerde 15-5 PH ve 17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin histerisiz davranışları incelenmiştir. Bu malzemelerin histerisiz hatalarının tüm kuvvet dönüştürücülerin de yakın sınırlar içinde kaldığı belirtilmektedir. Çalışmada, açıklanmamış ısıl işlem uygulanarak histerisiz hatası seviyesinde önemli bir düşüş sağlanmıştır. Histerisiz hatasının üzerinde anelastik davranışın etkisinin olduğu belirtilmiştir.

Başka makalelerde ise, özellikle malzeme yapısındaki dislokasyonların ve çökeltilerin ve bunların tip, büyüklük ve dağılımlarının histerisiz hatası ve anelastik davranış üzerinde etkisi olduğu belirtilmiştir. Dislokasyon yoğunluğunun artmasının ve mikroyapı içerisinde ince dağılmış çökelti taneciklerinin düşük histerisiz elde etmede etkili olduğu belirtilmektedir (Allgeier vd, 1997 – Allgeier, 1994). Özellikle, çökelti taneciklerinde ince dağılımın sağladığı iç yapılarda, zorlanma sırasında dislokasyonların esneyerek kavislenmesi ve hareketleri için yeterli mesafenin azalması sonucunda, çökelti tanecikleri dislokasyonları kilitleyebilmekte ve histerisiz hatasının azalmasına neden olabilmektedir (Fank, 2002). Bu durumda, dislokasyon hareketini engelleyen her etkinin (örneğin yoğun dislokasyonlar, artan tane sınırı alanı, çökelti gibi) histerisiz hatasını azaltıcı etki yaptığını söyleme olanağı vardır.



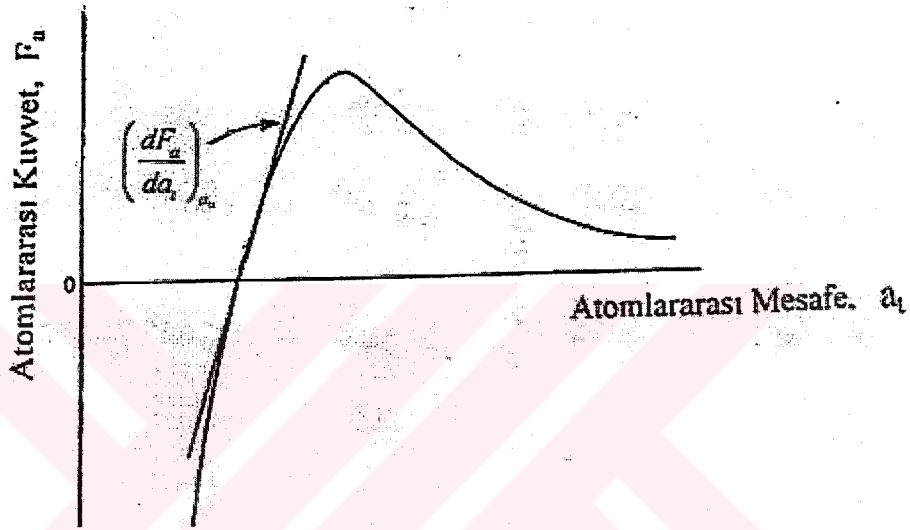
Şekil 8.7. Elastiklik modülünün değişiminin abartılarak çizilmiş şematik resmi

Malzemeler, gerilme-birim şekil değişimi (σ - ϵ) eğrilerinde, artan azalan yüklenme koşullarına bağlı olarak farklı gerilme-birim şekil değişimi özellikleri yani anelastik davranış ve de histerisiz hatası gösterebilirler. Gerilme-birim şekil değişimi eğrisindeki histerisiz davranışı üzerinde elastiklik modülündeki değişimin etkin olduğu şeklinde görüşler vardır (Allgeier ve Evans, 1995 – Allgeier, 1994). Şekil 8.7’de verildiği gibi elastiklik modülü (E) yüklenme başlangıcında en büyük değerinde olup zaman içinde artan yük ile birlikte azalmakta ve tam yükte en küçük değerine ulaşmaktadır. Tam yükten itibaren yükün azaltılması sırasında, E en büyük değerinden yük azaldıkça düşmekte ve en küçük yükte en düşük değerine ulaşmaktadır (Allgeier ve Evans, 1995). Bunu Hook kuralına göre sabit olduğu kabul edilen E ’nin atomlar arası çekme ve itme kuvvetlerine bağlı olarak değişmesine göre yorumlamak olasıdır (Callister, 2000 - Hayden, vd., 1984 - Erdoğan, 1998). Çok hassas ölçümler gerçekleştirildiğinde elastik alanda doğrusal olduğu bilinen σ - ϵ eğrisinin makro ölçekte gri dökme demir, beton ve birçok polimer malzemede olduğu gibi doğrusal olmayan bir davranış sergilediği bilinmektedir. σ - ϵ eğrisi doğrusal olmayan bir davranış sergilediğinde, eğrinin her bir bölgesinde farklı E değerleri elde edilmektedir.

Şekil 8.8’de görüldüğü gibi elastiklik modülü atomları, normal denge mesafelerinden hareket ettirmek için gerekli kuvvetle ilgilidir (Erdoğan, 1998). Atomlararası kuvvetin atomlararası mesafeyle değiştiği eğrinin başlangıçtaki yani denge

durumuna yakın konumdaki eğimi, malzemenin elastiklik modülünü belirleyici olmaktadır. Elastiklik modülü, Şekil 8.8’de verilen atomlar arası denge mesafesindeki kuvvet – mesafe eğrisinin eğimiyle orantılıdır ve elastiklik modülü atomlar arası kuvvetin ve mesafe ile değişiminin fonksiyonu olarak belirlenebilmektedir.

$$E = f\left(\frac{dF_a}{da_t}\right) \quad (8.1)$$



Şekil 8.8. Atomlararası kuvvet ile atomlararası mesafe arasındaki ilişki (Callister, 2000)

Buna göre elastiklik modülü eğrisinin eğimiyle orantılı olduğu için ve bu eğim uygulanan kuvvete göre değişebildiğine göre, artan kuvvet ile birlikte E’de değişim beklenmesi olasıdır. Zira, çekme yönünde uygulanan kuvvetin artırılmasıyla Şekil 8.8’de verilen grafikten de görüleceği gibi atomlararası mesafenin artışı ile birlikte eğiminde azalma görülmektedir. Bu eğimin azalması elastiklik modülünün azalmasına neden olabilmekte ve uygulanan kuvvetin en yüksek değerinde E, ulaşabileceği en düşük değeri almaktadır. Uygulanan kuvvetin kaldırılmasında ise bu olay tersine dönmekte ve bir histerisiz çevrimi görülebilmektedir (Fank, 2002).

Elastiklik modülündeki bu değişim son derece küçüktür. En yüksek E değeri 200.000 N/mm² olarak alınırsa, en düşük E değerinin 199.716 N/mm² olarak bulunduğu Allgeier ve Evans’ın 1995 yılındaki makalelerinde belirtilmiştir. Akma gerilmesinin altında oluşan E modülündeki bu değişim anelastiklik, mikro plastiklik veya gevşeme

olarak ta tanımlanmaktadır. Şekil 8.6'da görülen E_u gevşemeyen elastiklik modülü (unrelaxed modulus) olarak tanımlanıp en büyük değere sahiptir. Gerilmenin artırılmasıyla oluşan gevşeme nedeniyle belirli bir süre sonra elastiklik modülünde azalma oluşmakta, bu da E_r gevşeyen elastiklik modülü olarak tanımlanmaktadır. Yükün azalması sırasında bu olay tersine gelişerek histerisiz çevrimi oluşması tamamlanmaktadır. Sonuçta, malzemelerin elastiklik modüllerinin sabit olmaması "gevşeme mukavemeti" (relaxation strength) ΔE tanımını ortaya çıkartır (Allgeier ve Evans, 1995):

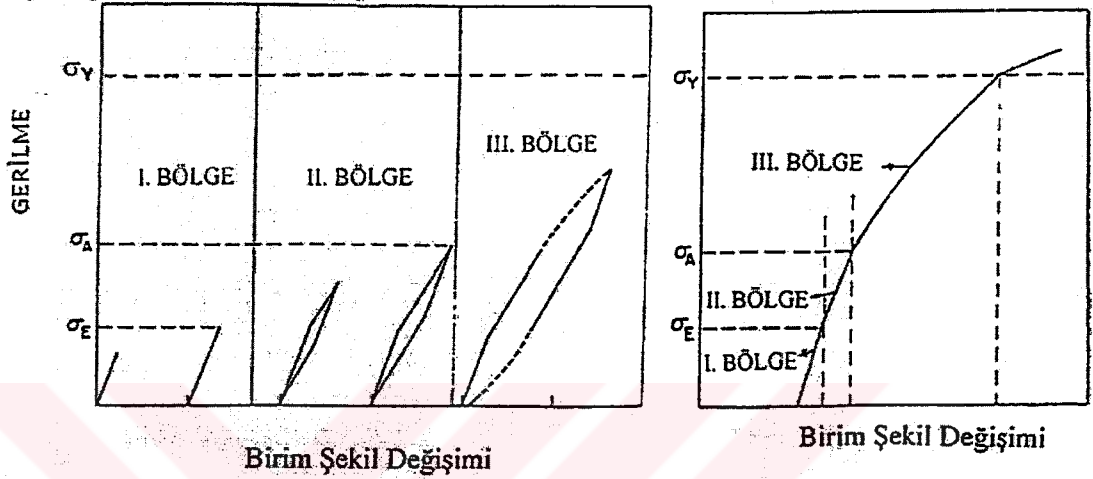
$$\Delta E = \frac{E_u - E_r}{E_u} \quad (8.2)$$

Elastiklik modülündeki bu değişimin demir-karbon alaşımlarında, çözünmüş karbon atomlarının kafes içinde bazı arayer noktalarına hareket etmesi nedeniyle oluşabileceği üzerine bir iddia da vardır (Allgeier ve Evans, 1995 – Allgeier, 1994 - Bolmaro, Povo, 1987). Bunun yanında histerisiz çevriminin yükleme - boşaltma çevrimi sırasındaki iç sürtünmenin neden olduğu enerji kaybının etkisi bulunduğu da bahsedilmektedir (Allgeier ve Evans, 1995).

Kuvvet dönüştürücülerde kullanılan en uygun malzemeler bile ideal seviyede elastik değildir. Elastik olmayan bu davranış, malzemenin akma gerilmesinin oldukça altında yüklenmesi durumunda dahi görülebilmektedir (Yorgiadis, 1985). Malzemelerde görülen histerisiz davranışının elastik olmayan bu davranışlardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Anelastik davranış, zamana bağlı bir bileşen olup uygulanan gerilmenin kaldırılması ile toparlanma gösterir. Zamanla oluşan toparlanma histerisiz olarak karşımıza çıkar. Bir malzemedeki histerisiz oluşumunu, sabit şekil değişimi hızında uygulanan çekme deneylerinden elde edilen, gerilme-şekil değişimi (σ - ϵ) grafiklerinde, malzemenin elastik bölgedeki yükleme gerilmesini üç farklı bölgeye ayırarak inceleme olanağı vardır (Alexopoulos, 1981). Şekil 8.9'da, I. bölgede görülen ve elastik sınır olarak adlandırılan σ_E 'nin altında uygulanan gerilmelerde malzeme tamamen ideal elastik olarak şekil değiştirir ve burada zamanın her hangi bir katkısı yoktur. Bu elastik aralığın dislokasyon hareketine direnç gösteren sürtünme gerilmesinin büyüklüğü ile

ilgili olduğu iddia edilmektedir (Alexopoulos, 1981). Uygulanan gerilme elastik sınırın üzerine çıkarıldığında bir histerisiz çevriminin oluştuğu gözlenmektedir. Şekil.8.9'da, II. bölgedeki histerisiz çevrimi, toparlanan ve zamana bağlı birim şekil değişiminin varlığını göstermekte ve anelastik birim şekil değişimi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 8.9. Akma gerilmesinin altında gerilme – birim şekil değişimi eğrilerinde farklı bölgelerin şematik gösterimi

Histerisiz çevrimleri gerilme seviyesinin (σ_A)-anelastik sınır olarak adlandırılan gerilme seviyesine kadar kapalı kalmaktadır. Bir başka ifade ile, malzeme gerilme uygulanmadan önceki konumuna geri gelmektedir. Gerilme seviyesi malzemenin anelastik sınırını aştığında yani III. bölgede bu defa histerisiz çevrimi, numune sıfır yüke kadar boşaltıldıktan sonra ancak belli bir oranda kapanabilmektedir. Gerilme seviyesi hala malzemenin akma gerilmesinin (σ_Y) altında kaldığı için toparlanamayan birim şekil değişimi genellikle mikroplastisite ile açıklanmaya çalışılmaktadır. Sonuç olarak, uygulanan gerilme, malzemenin akma gerilmesine yaklaştığında, makroskopik plastik akış oluşumu gözlemlenir (Alexopoulos, 1981).

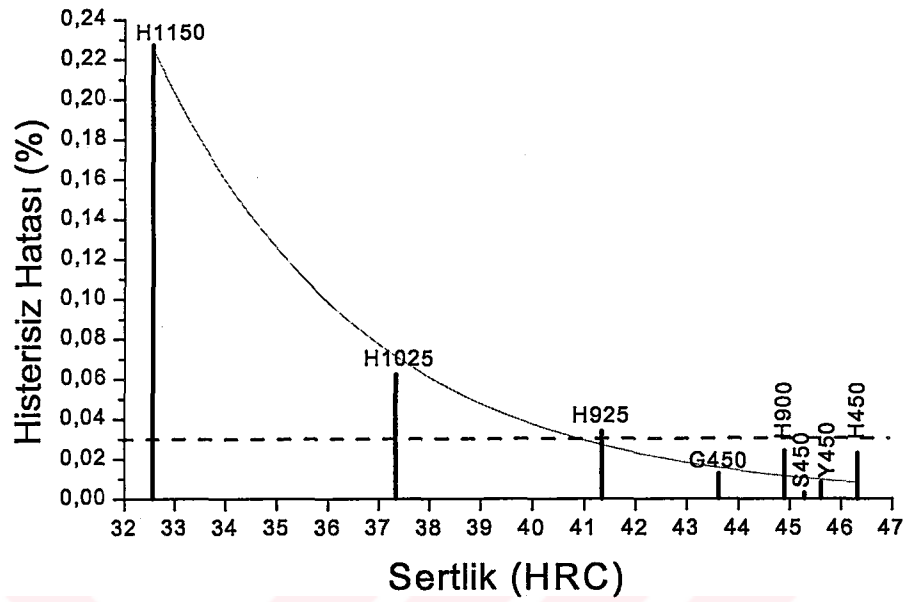
Anelastik şekil değişiminin özellikle dislokasyon hareketlerinin esneyerek kavışmasından, dislokasyon hareketine direnç gösteren sürtünme gerilmesinin büyüklüğünden ve dislokasyon kaymasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Alexopoulos, 1981). Bu durum anelastik modülü değerinin, dislokasyon oluşumu ve hareketlerini engelleyici koşulların sağlandığı durumlar olan malzemenin iç yapısına ve

gördüğü ısı işleme bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, sertleştirme ve yaşlandırma, temperleme ve yeniden kristalleştirme gibi ısı işlemler de anelastik modül üzerinde etkin rol oynayabilmektedir (Alexopoulos, 1981). Bu çalışmadan anelastik gerilme sınırı ve buna bağlı olarak histerisiz hatasının malzemeye ve uygulanan ısı işlemlere bağlı olarak değişebileceği ve histerisiz çevriminin oluşumunda dislokasyon hareketlerinin etkin rol oynadığı sonucu çıkarılmaktadır.

Histerisiz hatası ile sürünme davranışı arasında yapılan çalışmalarda doğrudan bir ilişkiye rastlanmamıştır (Yamaguchi, 1984). Fakat aynı kuvvet dönüştürücü için yavaş veya hızlı yüklenme zamanlarına göre farklı histerisiz hataları elde edilebilmektedir (Paetow, 1986). Bilgisayar kontrollü ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasında gerçekleştirilen ölçümlerde yüklenme hızının daima sabit olması, farklı yüklenme hızlarının neden olabileceği etkiler oluşmayacaktır.

8.3.1. Sertliğin histerisiz hatası üzerindeki etkisi

Uygulanan ısı işlemlerin, histerisiz hatasının üzerinde önemli etkilerinin olduğu çeşitli yayınlarda belirtilmektedir (Yorgiadis, 1985 – Allgeier ve Evans, 1995 – Allgeier vd., 1997 – Fank, 2002). Bu durumun, uygulanan ısı işlem ve yaşlandırmaya bağlı olarak sertliği ve akma mukavemeti değişen malzemedeki dislokasyon yoğunluğundaki fark nedeniyle oluştuğu iddia edilmektedir (Wood, 1971).



Şekil 8.10. Histerisiz hatasının sertlik ile değişimi

Şekil 8.10'da numunelerin sertlik değerlerine karşılık histerisiz hata değerleri grafiği verilmiş olup EN 10002-3'e göre hata sınıfları değerlendirmesinde sınıf 0.5'e karşılık gelen % 0.03'lük değer yatay bir çizgi ile belirtilmiştir. Grafik incelendiğinde genel olarak sertliğin artması ile histerisiz hatasında bir düşüş gözlemlenmiştir. En düşük histerisiz hatası değeri HRC 45.29 sertlik değerine sahip S450 kodlu numunede elde edilmiştir. Grafikte, %0.03 değerinin altında kalan değerlerin 44 ila 46 HRC sertlik değerleri arasında kaldığı görülmektedir. Bu numuneler incelendiğinde H900 haricinde diğer H450, Y450 ve G450 ısı işlemlerinde numunelere sıfır altı işlem (subzero treatment) olarak tanımlanan malzemeyi (-) eksi sıcaklıkta belirli bir süre bekletme işlemi uygulanmıştır. Bu sayede çözeltiye alma tavından sonra soğutma tam bir martenzit dönüşümü oluşturularak, yapıda oluşabilecek kalıntı ostenit miktarı en aza indirilmiş ve dislokasyon miktarı artırılmış olur (Krauss, 1980 – Perry, Jasper, 1977). Daha sonra uygulanan yaşlandırma işlemi ile de yapıda çökelme sertleştirme oluşturulur. Bu sayede mikroyapının tamamı martenzite dönüşmüş ve çok küçük kümecikler halinde çökelme tanecikleri içeren oldukça sert bir yapı haline gelmiştir.

Oda koşullarında martenzitik yapıda bulunan 17-4 PH paslanmaz çelik malzemede martenzit dönüşümü 1040°C de çözeltiye alma sonrasında soğutma ile gerçekleştirilir. Yayınmasız bir yer değiştirme reaksiyonu olan martenzitik dönüşüm sırasında, YMK (yüzey merkezli kübik) yapıdaki ostenit, hızlı soğutma nedeniyle HMK (hacim merkezli kübik) ferrite dönüşemeyip içerdiği faz ile karbonu yayınarak atamamakta ve kararsız-çarpılmış durumda HMT (hacim merkezli tetragonal) yapıdaki martenzit oluşmaktadır. Bu dönüşüm sırasında oluşan dislokasyon yoğunluğu $10^5 - 10^{12}$ adet/cm² mertebelerine ulaşmaktadır (Onaran, 1988 - Demirkol, 1991 - Hurley, vd., 1998). Bu işlemten sonra uygulanan sıfır altı sıcaklıktaki işlem dislokasyon oluşumunu daha da teşvik etmektedir.

Malzemenin dislokasyon dağılımı ve yoğunluğunun uygulanan ısıl işleme bağlı olduğu bilinmektedir (Read, 1953, Hull, 1975). Histerisiz çevriminin oluşumunda dislokasyon hareketleri ve kaymasının etkili olduğu yukarıda açıklanmıştır. Bu durumda dislokasyon hareketini zorlaştıracak her mekanizma histerisiz hatasını düşürücü etki yapabilmektedir. Bu durumda, yüksek sertlik sonucu dislokasyon yoğunluğu artmakta ve artan dislokasyon yoğunluğu ile dislokasyonların birbirlerini engellemeleri sonucu histerisiz hatası küçülmektedir.

Bölüm 3'te Tablo 3.5 ve 3.6'da, 17-4PH çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemenin farklı ısıl işlem kademeleri ile çeşitli sertlik ve akma mukavemeti değerleri verilmektedir. Akma mukavemetini değiştiren her ısıl işlemin anelastik sınırı da etkilemesi nedeniyle, kuvvet dönüştürücülerdeki histerisiz hatasında değişmelerin olabileceği sonucuna varılabilir. Literatürde yer alan ısıl işlemler arasında H900 ısıl işlemi en yüksek akma mukavemetine sahip olması dolayısıyla σ_A anelastik sınırı değerinden dolayı H925, H1025 ve H1150 ısıl işlemlerine göre en küçük histerisiz hatası bu numunede elde edilmektedir. Bunun nedeni olarak artan akma mukavemetine bağlı olarak anelastik sınırın artması ve buna bağlı olarak aynı çalışma gerilmesi altında oluşabilecek histerisiz çevriminin küçülmesi söylenebilir.

H925, H1025 ve H1150 ısıl işlem gruplu numunelerde ise sertliğin düşmesi ile histerisiz hatası giderek artmaktadır. Bu ısıl işlemlerde yaşlandırma ısıl işleminin sıcaklık değerlerinin giderek yükselmesi ile çökelen taneciklerinde irileşmekte olduğu ve bunun da dislokasyon hareketlerini kolaylaştırarak yapıda yumuşama getirdiği

belirlenmektedir (Hsiao, vd., 2002 - Viswanathan, vd., 1988 – Irvine, vd., 1959) Buna göre, yapıdaki çökelti taneciklerindeki irileşmenin dislokasyonların hareketini zorlaştıran sınırların ve yüzey alanının azalmasına neden olması ve bunun dislokasyon hareketini kolaylaştırdığı ve histerisiz hatasını artırdığı ortadadır.

8.3.2. Aynı sertlikteki farklı iç yapıların histerisiz hatası üzerindeki etkisi

Yapılan çalışmada H900, H450, G450, Y450 ve S450 ısıl işlemlenmiş numunelerin ortalama sertlik değerleri 44 ile 46 HRC olarak ölçülmüştür. ISO 6508-2'e göre Rockwell sertlik standardına göre ± 1 HRC sertlik ölçüm değerleri arasındaki değişimler kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Bu durumda bu dört grup numune yaklaşık aynı sertlik değerine sahip olmasına karşın sertlikten farklı olarak mikroyapıdan da kaynaklanabilecek bazı değişikliklerin histerisiz hatası üzerinde etkili olduklarını söyleme olanağı vardır. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmada, 15-5 PH ve 17-4 PH çökeltme sertleştirmeli martenzitik paslanmaz çeliklerde, martenzitik yapı içindeki kalıntı ostenit miktarı ve uygulanan farklı yaşlandırma işlemlerine bağlı olarak elde edilen karbürler ve çökeltilerin histerisiz hatasını değiştirdiği belirlenmiştir (Allgeier, 1994). Aynı şekilde, Fank'ın (2002) yaptığı çalışmada da, beynitik yapı içindeki karbürlerin tabaka halinde değil de çok ince dağılmış bir şekilde yapıda bulunmaları nedeniyle dislokasyon hareketlerinin daha etkin şekilde engellenmesinden dolayı, aynı sertlik değerlerindeki ince veya kaba martenzitik yapı ile arasında histerisiz hatasını değiştirdiği belirtilmiştir. Buna göre, yapıdaki kalıntı ostenit miktarının ve çökelti taneciklerinin dağılımı, büyüklüğü ve dislokasyonları engellemeleri ile histerisiz hatasının değiştiğini söylenebilir. Ayrıca, yapıdaki sert çökelti taneciklerinin matris içinde ince dağılımı nedeniyle zorlanma sırasında dislokasyonların esneyerek kavislenmesi ve hareketleri için yeterli mesafe bulamamaları nedeniyle sert parçacıklar dislokasyonları daha etkin bir şekilde kilitleyebilmekte ve histerisiz hatasının azalmasına neden olabilmektedirler (Demirkol, 1991).

8.4. Sürünme Hatası

Sabit kuvvetin belirli bir zamanla kuvvet dönüştürücü üzerinde bekletilmesi sonucunda, dönüştürücünün gösterdiği çıkış voltajında zamana bağlı olarak belirli bir değişim gözlemlenir, bu olay sürünme hatası olarak ifade edilir (Bartel ve Yaniv, 1997). Gözlemlenen durum, uygulanan kuvvet karşısında yay malzemesinin ve dirençli uzama ölçer malzemesinin sürünme davranışından kaynaklanmaktadır.

Yay elemanına yapıştırılan dirençli uzama ölçerlerden kaynaklanan sürünme etkisi dirençli uzama ölçer tellerini tutan plastik taşıyıcı malzeme ve yapıştırıcıda meydana gelen viskoz sürünmeden oluşmaktadır (Bethe, 1997). Tüm deney numunelerinde aynı olan uzama ölçerler, aynı yapıştırıcı ve yapıştırma koşulları kullanıldığından bu etkinin ihmal edilebileceği düşünülmüştür. Bu durum sürünme hatasının doğrudan yay malzemesinin sürünme davranışı ile ilişkili olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

Bu konu ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda sürünme hatasının büyük oranda malzemeden kaynaklandığı ortaya konmuştur (Bartel ve Yaniv, 1997 - Bray vd., 1990 - Bergqvist, 1986 - Allgeier ve Evans, 1995 - Fank, 2003). Doğal olarak, malzemeye uygulanan ısıl işlem ve sonrasında ortaya çıkan iç yapının değişimi sürünme hatası üzerinde etkili olmaktadır. Spoor (1986) tarafından yapılan çalışmada, Be-Cu alaşımına uygulanan farklı yaşlandırma ısıl işlemlerine bağlı olarak sürünme hatalarında büyük değişimlerin gözlemlendiği; yine Allgeier'in (1994) yaptığı çalışmada da çökme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemelerin farklı ısıl işlemler sonrası sürünme davranışlarında farklılıkların olduğu görülmüştür. Ayrıca, yay malzemesine uygulanan ısıl işlemlerin sürünme ve histerisiz özellikleri üzerinde etkili olduğu konusunda önemli bulgular vardır (Kawai, 1984 - Bethe ve Baumgarten, 1986 - Allgeier vd., 1998). Bethe'nin 1997 yılında yaptığı çalışmada kuvvet dönüştürücülerdeki yay elemanı malzemesine bağlı olan sürünme hatasının nedenleri ile ilgili olarak aşağıdaki görüşler ileri sürülmüştür:

1. Yayınma, yay malzemesinin homojen gerilme altında gösterdiği anelastik davranışta baskın olan parametredir.

2. Gerilme, atomik difüzyonu artırıcı etki yapar. Uygulanan elastik şekil değişimi miktarının etkin rol oynadığı atomsal yayınmanın giderek artması, malzemede gevşemeye neden olur.
3. Numune yüzeyindeki herhangi bir kusur dislokasyonlara rahatlatıcı bir etki oluşturur ve tane içinde dislokasyon hareketlerinin gerçekleşmesi yüzeydeki duruma göre daha zordur. Yüzeğe yakın dislokasyonların hareketi daha rahat olduğu için hemen yüzeğe çıkıp şekil değişimine neden olabilirler. Dislokasyon hareketleri yüzeyde daha rahat gerçekleşip gevşemeye neden olarak sürünme şekil değişimi oluştururlar.

Ayrıca, çeşitli kaynaklarda kuvvet dönüştürücülerine uygulanan yükün kuvvet dönüştürücü kapasitesine oranı artıka sürünme hatasının da arttığı belirtilmektedir (Kawai, 1984 - Measurements Group Katalog - Allgeier, T., 1994 – Fank 2003). Ancak, hazırlanmış olan deney numunelerinin tasarımının ve hazırlanışının aynı olduğu ve de aynı gerilme uygulandığı için elastik şekil değişimi miktarı da aynı kalmakta, dolayısıyla bu durumun herhangi bir farklılık oluşturması beklenmemektedir.

Bunların dışında, sürünme hatası üzerinde kuvvet dönüştürücü tasarımı, yükleme zamanları ve ön yükleme uygulanmış olması ve olmamasının etkisi vardır (Fank, 2003). Yine, tüm numunelerde aynı koşullar uygulanması nedeniyle bu durumun bir etki yaratması söz konusu değildir.

Sonuç olarak, yay elemanı malzemesini ilgilendiren yönüyle sürünme hatasına etki edebilecek mekanizmalar olarak yayınma ve dislokasyon hareketleri ön plana çıkmaktadır. Her ne kadar yayınmanın yüksek sıcaklıklarda daha etkin olduğu bilinmekteyse de kuvvet dönüştürücülerinde oda sıcaklıklarında bile karşılaşılan mikro sürünme davranışı için küçük değerlerde olsa da yayınmanın etkin olabileceği söylenebilir.

Kristal kafes içinde atomların bir denge konumundan diğere denge konumuna atlayarak yaptıkları sıcaklığa bağılı olarak yer değiştirmeleri katı hal yayınması olarak adlandırılmakta ve bu olay matematiksel olarak (8.3) bağıntısıyla verilen I. Fick kanunu ile ifade edilmektedir (Güleç ve Aran, 1998 - Erdoğan, 1998 - Hsvechnikov, 1970).

$$J = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8.3)$$

Bu bağıntıda, J değeri, birim alandan geçen atom sayısını, D yayınma katsayısı ve $\frac{\partial c}{\partial x}$ ise konsantrasyon gradyenidir. D yayınma katsayısı Arrhenius bağıntısı çerçevesinde,

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{R_g T}} \quad (8.4)$$

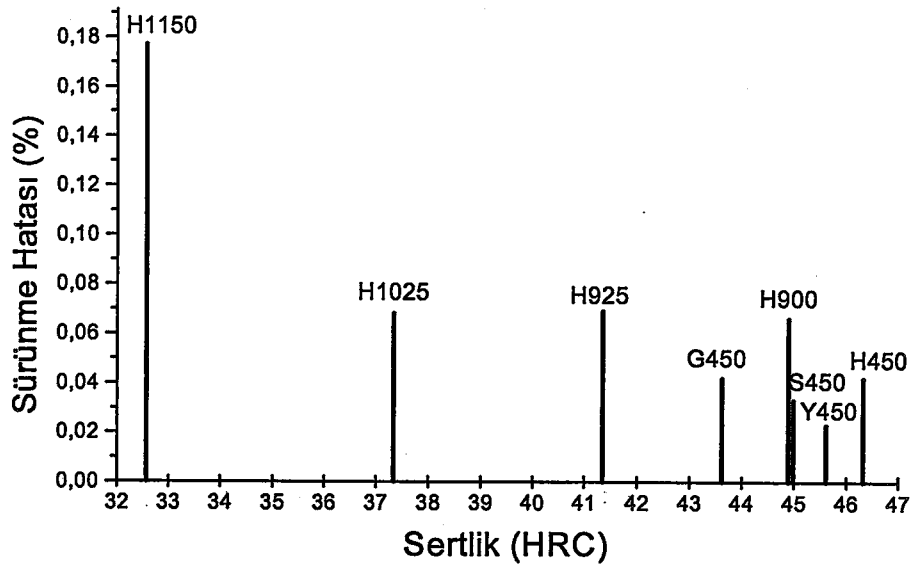
şeklinde tanımlanmaktadır. Bu bağıntıda D_0 , malzemenin yayınma sabiti, Q , malzemenin yayınma aktivasyon enerjisi; R_g , universal gaz sabiti; T, mutlak sıcaklıktır.

Q , R_g ve D_0 sabitleri sıcaklığa bağlı değildir. Yüzey merkezli kübik (YMK) demir yapısında C difüzyonu için $Q = 137.850 \text{ J.mol}^{-1}$ ve $D_0 = 0.23 \times 10^{-4}$ iken; hacim merkezli kübik (HMK) demirde C difüzyonu için ise $Q = 87.570 \text{ J.mol}^{-1}$ ve $D_0 = 0.011 \times 10^{-4}$ değerleri literatürde verilmektedir. Bir atomun bir yerden başka bir yere hareket etmesini sağlayan enerji yayınma aktivasyon enerjisi ile ifade edilir ve ne kadar küçük olursa yayınma daha kolay gerçekleşmektedir. Bu nedenle yayınma ile aktivasyon enerjisi arasında ters orantı ilişkisi vardır (Güleç ve Aran, 1998 - Hsvechnikov, 1970). Atomsal boşlukların yoğunluğunun, noktasal kusurların ve uygulanan ısı işlemlerin malzemenin aktivasyon enerjisi üzerinde etkisinin olduğu bilinmektedir (Krishtal, 1970 - Hsvechnikov, 1970). Atomlar, tane veya kafes içinde daha zor, kafes kusuru olarak kabul edilen tane sınırı bölgesinde daha kolay ve serbest yüzeylerde ise en kolay yayınırlar. Mutlak sıfır (-273 °C) sıcaklığına inilmediği takdirde teorik olarak yayınma her sıcaklıkta görülebilmektedir. Her ne kadar mühendislik uygulamalarında, benzeş sıcaklığın 0.25 değerlerinden düşük sıcaklıklarda görülen yayınma ihmal edilse dahi, hassas ölçümlerde kullanılan kuvvet dönüştürücülerde, oda sıcaklığında görülebilen sürünme hatasının kaynağının literatürde de belirtildiği gibi yayınma kaynaklı olması beklenmektedir (Bethe, 1997 – Bethe ve Baumgarten, 1986).

Kuvvet dönüştürücülerde malzemeye bağlı özellikler arasında en önemlilerinin histerisiz ve sürünme olduğu bilinmesine karşın karbonlu ve alaşımlı çeliklerden üretilmiş numunelerden alınan ölçümlerde, histerisiz ve sürünme arasında doğrudan bir ilişkiye rastlanmamıştır (Kawai, M., 1984 - Yamaguchi, vd., 1984 - Skundric ve

Kovecevic, 1990 - Allgeier, T., 1994 – Fank, 2003). Bunun histerisiz ve sürünme hatalarında etkili rol oynayan mekanizmalardaki farklılıktan kaynaklandığını ileri sürülebilir. Sürünme hatası üzerinde etkili olan mekanizmalardan dislokasyon hareketlerini kapsayanlara göre deney sonuçları karşılaştırdığında, histerisiz hatalarında görülen değişimlerin sürünme hatalarında da tekrar etmesi beklenebilir. Ancak, Fank'ın 2003 yılında AISI 4340 çelik üzerinde yaptığı çalışmada aynı sertlikteki martenzitik ve bey nitik yapıları karşılaştırdığında, bey nitik yapıları numunelerin histerisiz hatası, martenzitik yapıları oranla daha düşük elde edilirken, sürünme hatası martenzitik yapıları olanlara göre daha büyük çıktığı görülmüştür. Ayrıca, kaba martenzit boyutuna sahip numunelerin histerisiz hatası, ince martenzit boyutuna sahip numunelerden daha büyük çıkarken, sürünme hatasında azalma elde edilmiştir. Buna göre benzer farklılıkların görüldüğü sürünme hatası üzerinde dislokasyon hareketlerinin yanı sıra yayınma mekanizmalarının da etkili rol oynadığı yorumu yapılmıştır. Başka bir çalışma olarak, Sava'nın 1990 yılında yayınladığı makalede, bazı kuvvet dönüştürücülerin sürünme hatası değerleri mükemmel olmasına karşın doğrusallık ve histerisiz hata değerleri kötü olan sonuçlarının olduğu ve bu hatalar arasında doğrudan bir ilişkiden söz edilemeyeceği belirtilmiştir.

8.4.1. Malzeme sertliğinin sürünme hatası üzerindeki etkisi



Şekil 8.11. Sürünme hatasının sertlik ile değişimi

Şekil 8.11'de numunelerin sertlik değerlerine karşılık sürünme hata değerleri grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde genel olarak sertliğin artması ile sürünme hatasında bir düşüş gözlemlenmektedir. 17-4PH paslanmaz çelik malzemeyi çözeltilmeye alma sonucunda ara işlem olarak sıfır altı işlem (subzero treatment) olarak tanımlanan sıvı azot içerisinde bekletildikten sonra yaşlandırılan numuneler ile bu işlem uygulanmadan yaşlandırılan numunelerin sürünme hata oranlarında yaklaşık %40 oranında bir azalma gözlenmektedir.

Martenzitik dönüşüm sırasında ortaya çıkan aşırı gerilmeler kafeste çok sayıda yeni kristal kusuru (ikizler, dislokasyonlar, dizi hataları) oluşturmaktadır. Yüzey merkezli kübik kafeste yüksek oranda çözünebilen C atomları, martenzitik dönüşüm sonrasında hacim merkezli tetragonal kafeste zorunlu olarak kalmakta ve çarpılmaya neden olmaktadır (Güleç ve Aran, 1998). Soğutma sırasında meydana gelen kristal kafesteki bu çarpılma nedeniyle C atomlarının yayınma aktivasyon enerjisi yükselmektedir (Krishtal, 1970). Yükselen aktivasyon enerjisi yayınımları zorlaştırmakta bu da sürünme hatasını iyileştirmektedir. Sıfır altı işleminde sürünme hatasının yayınımları zorlaştırarak düşürdüğü söylenebilir. Ayrıca numunelere uygulanan yaşlandırma işleminde yaşlandırma sıcaklığı ve/veya süresinin artırılmasıyla ters orantılı olarak mikroyapıda çökelti tanecikleri giderek irileşecek ve buna bağlı olarak aktivasyon enerjisi de düşecektir. Bu oluşum da sürünme hatası değerini arttıracaktır.

Artan sertliğe bağlı olarak dislokasyon yoğunluğunun da artması ve buna bağlı olarak dislokasyon hareketlerinin zorlaşmasının da sürünme hatasının düşmesinde etkili olabileceği düşünülmektedir. Bu durumun histerisiz hatasında açıklandığı üzere dislokasyon yığılmaları nedeniyle dislokasyonların hareketlerini engelleyici bir etkiye neden olan kilitleme veya dislokasyon hareketini kolaylaştırıcı etkisi olan gevşeme mekanizmaları ile açıklanması da olasıdır (Allgeier ve Evans, 1995 - Balmaro ve Povolo, 1987 – Fank, 2003). Artan sertlik miktarı ile yoğunluğu da artan dislokasyon yapısının hareketleri, olası kilitlemeler nedeniyle zorlaşacağı için sürünme hatası azalabilmektedir.

Sıfır altı işlem uygulanmış numunelerde, çözeltilmeye alma tavından sonra soğutma ile martenzit dönüşümü oluşturularak, yapıda oluşabilecek kalıntı ostenit miktarı en aza

indirilmiş ve dislokasyon miktarı artırılmış olur (Krauss, 1980 – Perry, Jasper, 1977). Daha sonra uygulanan yaşlandırma işlemi ile de yapıda çökme sertleştirilmesi oluşturulur. Bu sayede mikroyapı tamamı martenzite dönüşmüş ve çok küçük kümecikler halinde çökme tanecikleri içeren oldukça sert bir yapıdadır.

En düşük sürünme hatası değeri HRC 45.61 sertlik değerine sahip Y450 kodlu numunede, en yüksek hata değeri de H1150 ısıtılı işlemli numunede elde edilmiştir. H450 ve G450 ısıtılı işlemli numunelerde 1200s. sonra ortalama olarak aynı sürünme hatası değerleri görülmüştür. H900, H925 ve H1025 ısıtılı işlemli numunelerin sürünme hatası değerleri de bir birbirlerine yaklaşık eşit seviyede sürünme hatası değeri göstermiştir. H900, H925 ve H1025 ısıtılı işlemli numunelerde sertlikte belirgin bir değişim gözlenmesine karşın, aynı sürünme hatası değerleri elde edilmesi, sürünme hatası üzerinde sertlik değişiminden daha çok yayınma mekanizmasının etkin olduğunu göstermektedir.

8.4.2. Aynı sertlikteki farklı iç yapıların sürünme hatası üzerindeki etkisi

Şekil 8.10'da görüldüğü gibi H900, H450, G450, S450 ve Y450 ısıtılı işlemli numunelerin ortalama sertlik değerleri 44 ile 46 HRC olarak ölçülmüş olup, Rockwell sertlik standardına ISO 6508-2'e göre ± 1 HRC sertlik ölçüm değerleri arasındaki değişimler kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Bu durumda bu beş grup numune yaklaşık aynı sertlik değerine sahip olmasına karşın, sertlikten farklı olarak mikroyapıdan da kaynaklanabilecek bazı değişikliklerin histerisiz hatasında olduğu gibi sürünme hatası üzerinde de etkili olduklarını söylemek olasıdır.

H900 ısıtılı işlemli numunenin diğer dört grup numuneden daha yüksek sürünme hatası değeri göstermesinin nedeni olarak sıfır altı ısıtılı işlemin uygulanmaması olduğu bir önceki bölümde belirtilmiştir.

Sıfır altı ısıtılı işlem uygulanmış numuneler incelendiğinde çözeltiye alma ısıtılı işlemi sonrası soğutma ortamının da sürünme hatası üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Numuneleri soğutma ortamlarının soğutma hızlarına göre en yavaştan hızlıya doğru sıralayacak olursak H450, G450, Y450 ve S450 şeklindedir. Artan soğutma hızı mikroyapıdaki tane yapısını küçültecek ve yoğun dislokasyon yapısı ortaya çıkartacaktır. Bu durumda yayınma zorlaşacak ve sürünme hatası düşecektir. Ancak, Şekil 8.11'de

görülen durum anlatılandan biraz farklıdır. Öncelikle, H450 ve G450 ısıtılmalı işlemlerle numunelerde 1200s. sonra ortalama aynı sürünme hatası değerleri görülmüştür. Bu durum G450 ısıtılmalı işlemlerle numunelerin yaşlandırma süresi diğer numunelerden farklı olarak 3 saat uygulanmasından dolayı, çökelme tanecikleri ve yapıdaki dislokasyonlar daha düşük enerjili duruma geçmeleri için gerekli olan enerjiye daha fazla maruz kalmışlardır. Bu durumda, numunelerdeki bir sertlik düşümü ve sürünme hatasının H450 ısıtılmalı işlemlerle numunelerin seviyesine getirmiştir. Y450 ısıtılmalı işlemlerle numunede tüm numunelere göre en düşük sürünme hatası değeri elde edilmiştir. S450 ısıtılmalı işlemlerle numunede ise Y450 ile H450 ve G450 numunelerin sürünme hata değerlerinin arasında bir değerde sürünme hatası ölçülmüştür. Bu aradaki fark binde mertebelerinde olup oldukça küçük değerdedir. S450 kodlu numunede en hızlı soğuma gerçekleşmesi ile en küçük taneli ve yoğun dislokasyonlu bir yapıya yaşlandırma işlemi uygulandığında, yaşlandırma ısıtılmalı işlemindeki maksimum sertliğin elde edildiği tepe noktanın aşılması yapıyla sertliğinde düşmenin olduğu yani tanelerin irileşme aşamasına başladığı sonucuna varılabilir. Azda olsa tanelerdeki irileşme atomsal yayınlamayı kolaylaştırarak sürünme hatasında artışa neden olacaktır. Bu nedenden dolayı, S450 kodlu numunenin sürünme hatası değeri Y450 numuneye göre az miktarda yüksek olarak belirlenmiştir.

9. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

1. 17-4PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemede farklı ısıl işlem koşulları ile elde edilen farklı yapı ve sertlikte hallerinde tekrarlanabilirlik hatasının belirgin bir değişim göstermediği saptanmıştır. Bu hatanın malzemeye bağlı olmadığı, büyük oranda diğer etkenler diyebileceğimiz dirençli uzama ölçerlerin deney numunelerine yapıştırma işlemine, yükleme koşullarına, dönüştürücünün tasarımına ve yükleme sırasında kullanılan aparatlara bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Tüm numunelerin ortalama tekrarlanabilirlik hata değerlerinin en iyi doğruluk sınıfına sahip dönüştürücülerin hata sınırı olan % 0.01'in üçte biri seviyesinde ve farklı ısıl işlemli numuneler arasındaki farkın ise % 0.002 gibi çok küçük bir değerde olması bu görüşü desteklemektedir.
2. Doğrusallık hatasında da tekrarlanabilirlik hatasına göre daha küçük değerler ve değişimler görülmüştür. Yine aynı şekilde, tekrarlanabilirlik hatası gibi doğrusallık hatası da 17-4PH malzemeye uygulanan ısıl işlemlerden etkilenmemekte olup, görülen farklılıklar rastgele veya diğer etkenlerden kaynaklanan hatalardan ve ihmal edilebilecek düzeyde küçük hatalar olduğu saptanmıştır. Tüm numunelerin ortalama doğrusallık hatası değerlerinin en iyi doğruluk hatası sınırı olan % 0.01'in sekizde biri, farklı ısıl işlemli numunelerdeki doğrusallık hataları arasındaki en büyük farkın ise % 0.0006 seviyesinde olması doğrusallık hatasının da malzemeye bağlı bir özellik olmadığını desteklemektedir.
3. Farklı sertlik değerine sahip numunelerde en belirgin olarak histerisiz hatasının değiştiği tespit edilmiştir. Genel olarak, sertlik değerinin artması ile histerisiz hatası değeri giderek azalmaktadır.

4. En düşük histerisiz hatası değerleri 45 HRC sertlik değerli numunelerde elde edilmiştir. Bunlar arasından sertlik değeri 44.99 HRC olan S450 ısıtılmalı işlemli numunede en düşük histerisiz hatası ölçülmüştür.
5. Çözeltiliye alma ısıtılmalı işlemi sonrasında uygulanan sıfır altı ara soğutma işlemi ile elde edilen numunelerin histerisiz hatalarında iyileşme görülmüştür. Bu işlem, kalıntı ostenitin martenzite dönüşümünü sağlamıştır. Martenzit miktarındaki artış beraberinde dislokasyon yoğunluğunun artmasına ve bu da histerisiz hatasının azalmasına neden olmuştur.
6. Sürünme hatasında genel olarak, sertlik değerinin artması ile hatanın giderek iyileştiği görülmüştür.
7. Sürünme hatası oluşumunda en etkin mekanizmanın atomsal yayınma olduğu, bunun yanısıra dislokasyon hareketlerinin de olayda katkısının olduğu belirlenmiştir. Yayınmayı teşvik eden her koşulun sürünme hatasını artırdığını söyleme olanağı vardır.
8. H 900, H925 ve H1025 ısıtılmalı işlemli numunelerde sertlikte belirgin bir değişim gözlenmesine karşın, aynı sürünme hatası değerleri elde edilmiştir. Bu da sürünme hatası üzerinde sertlik değişiminden daha çok, ısıtılmalı işlem ile değiştirilen mikroyapıdaki atomsal yayınma mekanizmasının etkin olduğunu göstermektedir.
9. 17-4PH çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik malzemeye çözeltiliye alma ısıtılmalı işlemi sonrasında uygulanan sıfır altı ısıtılmalı işlem kademesinin, sürünme hatasında yaklaşık % 40'a yakın belirgin düşme sağlamıştır.
10. En düşük sürünme hatası değeri 45.61 HRC sertlik değerine sahip Y450 ısıtılmalı işlemli numunede elde edilmiştir.
11. Kuvvet dönüştürücülerinde histerisiz hatası ile sürünme hatası arasında genel bir ilişki saptanamamıştır.

Bu çalışma sonucunda, 17-4PH paslanmaz çelik yay malzemeli kuvvet dönüştürücülerin üretiminde, S450 ve Y450 ısıtılmalı işlemleri uygulanarak en iyi performans özelliklerinin sağlanabileceği saptanmıştır. Bu ısıtılmalı işlemler, önceden Allgeier tarafından bulunan RSOQ ve RSGQ ısıtılmalı işlemlerine göre hem gerektirdiği cihazlar açısından daha

ekonomik, hem de daha pratik ve kolaydır. 17-4PH paslanmaz çelik malzemenin, piyasadaki satış fiyatı çelik malzemelerin (ör. 4140, 4340) fiyatının çok az üstünde olmasına karşın, diğer çeliklere göre daha düşük sıcaklıkta sertleştirilebilmesi, çarpılma oranının çok düşük olması toplam maliyeti birbirine oldukça yaklaştırmaktadır. Bunlara ek olarak, 17-4PH malzemenin üstün korozyon direnci ileride bu malzemenin kuvvet dönüştürücü yay malzemesi olarak ve de diğer endüstriyel alanlarda da çok daha fazla kullanılacağına göstergesidir.

İleri bir çalışma ile ilgili öneri olarak, bu çalışmada çekilen TEM fotoğraflarında özellikle H900, H450, G450, Y450 ve S450 ısıtılmış numuneler de Cu çökelti tanecikleri görülememiş olması, fotoğrafların çekiminde kullanılan 100kV kapasiteli TEM cihazının bu çökelti taneciklerini yakalayabilmek için kapasitesinin yeterli olmadığını ortaya çıkarmıştır. Daha gelişmiş yüksek kapasiteli bir TEM cihazı ile 17-4PH malzemenin ısıtılmış yapıları ayrı bir konu olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aerospace Structural Metals Handbook, 1983. Metals And Ceramics Information Center, Columbus, Ohio, U.S.A.
- Ak Steel Technical Data, 2003, 17-4 PH stainless steel, www.aksteel.com
- Alexopoulos, P.S., Cho, C.W., Hu, C. P., Li, Che-Yu, 1981, Determination of the Anelastic Modulus for Several Metals, *Acta Metallurgica*, Vol 29(4), 549-577
- Allgeier, T., 1994, Factors Influencing the Mechanical Hysteresis in Stainless Steel Load Cells, A Thesis for the Doctor of Philosophy, Glamorgan University, England.
- Allgeier, T., Evans, W.T., 1995, Mechanical Hysteresis in Force Transducers manufactured from Precipitation-hardened Stainless Steel, *Journal of Mechanical Engineering Science, Part C*, Vol 209, 125-132
- Allgeier, T., Gassmann, H., Sawla, A., 1998, Load Application and Measuring Behaviour of a Bending Ring Type Force Transfer Standards, International Conference of IMEKO TC3 Measurement of Force and Mass, Sept, 14-18, Teajon, Korea.
- AMS 5643P, 1999, Steel, corrosion resistant, bars, wire, forgings, tubing and rings 16Cr-4.0Ni-0.30(Cb+Ta)-4.0Cu solution heat treated, precipitation hardenable, SAE, USA
- Arpacı, A., 1995, Deneysel Gerilme Analizi, İ.T.Ü Makine Fakültesi Ders Notları, Gümüşsuyu, İstanbul.
- Atlas Steels, 2000, The Atlas Steels Technical handbook of stainless steels, Atlas Steels Metals Distribution Technical Services Department, Australia
- Barbato, G., Bray, A., Levi, R., Scapatucci, D., 1984, An Analysis of The Effects of Strain-gages Positioning in a Square-ring Load Cell, Proceedings of 10th International Conference of IMEKO, Kobe, Japan, September 11-14, s.37-42.
- Barbato, G., Desogus, S., Zompi, A., Levi, R., 1981, Load Cell Design Developments by Numerical and Experimental Methods, *Experimental Mechanics*, September 1981, p. 341-348.
- Bartel, T. W., Yaniv, S. L., 1997. Creep And Creep Recovery Response Of Load Cells Tested According to U.S. And International Evaluation Procedures, *Journal Of Research Of The National Institute Of Standards And Technology*, Vol 102, N.3, May-June, s. 349-361

- Baumann, E., 1976. Elektrische Kraftmeßtechnik, VEB Verlag Technik Berlin, Germany.
- Bergqvist, B. M., 1986. Pilot Test to Determine Micro-Elastic Effects in Load Cell Receptor Materials, Proceedings of 11th International Conference of IMEKO, Amsterdam, The Netherland, May 12-16, s.313-321
- Bethe, K. , 1997, After Effects in Load Cell, IMEKO World Congress Proceedings, June 21-24, Tampere- Finland
- Bethe, K., Baumgarten, D., 1986. Creep Of Low Range Scales, Proceedings of 11th International Conference of IMEKO, Amsterdam, The Netherland, May 12-16, s.323-329
- Bolmaro, R.E., Povolo, F., 1987, Anelastic Behaviour of Materials under multiaxial Strains J. Mater.Sci.,22(11), p.4158-4164
- Bray, A., Barbato, G., Levi, R., 1990. Theory And Practice Of Force Measurement, Academic Press, London.
- Callister, W. D., 2000, Materials Science and Engineering-An Introduction, John Wiley& Sons, Inc., New York
- Chandler,H., 1998, Heat treater's guide practices and procedures for irons and steels, 2nd edition, ASM International, Ohio.
- Cohen, M., 1963, Heat treatment of metals, The Institution of Metallurgists, London
- Dally, J.W. And Riley, W.F., 1965. Experimental Stress Analysis, Mcgrawhill, New York.
- Debnam, R.C., Jenkins, R.F., 1972, An Investigation of The Performance of Force Measuring Devices of Very High Precision, VDI-Berichte, Nr. 176, p.31-41.
- Demirkol, M., 1991. Mekanik Metalurji Ders Notları, İTÜ Makine Fakültesi, Gümüşsuyu, İstanbul.
- DIN 17440, Technical Delivery Condition for Stainless Steel Drawn Wire
- EN 10002-3, Metallic Materials - Tensile Testing - Part 3 - Calibration of Force Proving Instruments Used for the Verification System of the Uniaxial Testing Machine, May 1994
- Erdem, U., 1982, Force and Weight Measurement, J. Phys. E: Sci. Instrum., vol. 15, p. 857-872, UK.
- Erdiller, B., Saral, A., 1982. DMS (Uzayabilir Ölçü Şeridi) İle Ölçme Esasları, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları : 819, Derlemeler : 43

- Erdoğan, M., 1998, Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri, cilt 2, Nobel yayın dağıtım, Ankara
- Erdoğan, M., 2000, Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri, Cilt 1, Ankara
- Fank, S., 2002, Kuvvet Dönüştürücülerinde Yay Elemanı Malzemesi Özelliklerinin Performans Üzerindeki Etkisi, Doktora tezi, İTÜ, İstanbul
- Fank, S., 2003, Kuvvet Dönüştürücülerde Isıl ve Mekanik İşlemlerin Histerisiz Hatasına Etkisi, İtü dergisi/d mühendislik, Cilt 2, Sayı 2, Nisan 2003, s. 60-70, İstanbul
- Fank, S., Orhan, M. H., Kaçmaz, S., 1999. Effect of Interpolation Equations On The Evaluation of Measurement Uncertainty, Proceedings of IMEKO World Congress, Osaka, Japan, 13-18 June s.77-81
- Fank, S., Özbay, H.Ö., Baytaroğlu, Ş., 1995. Çekme-Basma Test Makinalarında Kalibrasyonun Önemi. 1.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildirileri, Eskişehir
- Fank, S., Özbay, H.Ö., Baytaroğlu, Ş., 1995. Kuvvet Dönüştürücüler Kalibrasyon Prosedürü. 1.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildirileri, Eskişehir
- Fank, S., Özbay, H.Ö., Baytaroğlu, Ş., 1995. Kuvvet Standardının Oluşturulması ve Sanayiye Transferi. 1.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildirileri, Eskişehir
- Fank, S., Sawla, A., Özbay, H.Ö., Gaßmann, H., 1996. Establishment of National Force Scale at UME and Results of Intercomparison Measurements Between UME and PTB, The 15th International IMEKO TC3 Conf. on Accuracy, Assurance in Force, Torque and Mass Meas., Basic Metrology to Industrial Applications, Madrid, Spain, October 7-11, s. 65-74
- Gassmann, H., TheiB, D., Baethke, K., 1993, Proceedings of 13th International Conference on IMEKO TC3 Measurement of Force and Mass, Helsinki, Finland, May 10-14, p. 48-54.
- Gizmajer, A., 1993, Load cells and force measuring devices: common characteristics and differences, Proceedings of 13th International Conference on IMEKO TC3 Measurement of Force and Mass, Helsinki, Finland, May 10-14, p. 83-87.
- Goodhaw, P. J., 1973, Specimen Preperation I, Materials Science (Practical Methods in Electron Microscopy), North American Elsevier Publishing Co. Inc. , New York
- Güleç, Ş., Aran, A. 1998, Malzeme Bilgisi (Cilt 1), İTÜ Makina Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul
- Habibi-Bajguirani, H.R., 2002, The effect of ageing upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5PH stainless steel, Materials Science and Engineering, A338, p. 142-159.

- Habibi-Bajguirani, H.R., Jenkins, M.L., 1996, High-resolution electron microscopy analysis of the structure of copper precipitates in a martensitic stainless steel of type PH 15-5, *Philosophical Magazine Letters*, vol.73, no 4, p. 155-162
- Hayden, W., Moffatt, W. G., Wulff, J., 1984, *Mechanical Behavior of Materials*, John Wiley& Sons, Inc., New York.
- Hellwig, R.H., 1986, Development, Testing and Specifications of Super Precision Force Transducers for International Comparison Measurements, *Proceedings of 11st International Conference of IMEKO TC3 Measurement of Force and Mass*, Amsterdam, Netherland, May 12-16, p.13-22.
- Hoffman, K. 1976. *An Introduction To Strain Gage Techniques By Practical Experiments*. HBM Publication, VD 76004e, Germany.
- Hoffman, K., 1976b. *Applying The Wheatstone Bridge Circuit*. HBM Publication, VD 72001e, Germany.
- Hoffmann, K., 1984. *Practical hints for the application of strain gauges*. HBM Publication, VD 84005e, Germany.
- Holman, J.P., 1994. *Experimental Methods For Engineers*, Mc Grawhill, New York
- Hsiao,C.N., Chiou, C.S., Yang, J.R., 2002, Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel, *Materials chemistry and physics*, 74, 134-142, Elsevier
- Hsvechnikov, V. N., 1970, *Diffusion Processes in Metals*, Israel Program for Scientific Translations Jurasalem, Israel.
- Hull, D, 1975, *Introduction to Dislocation*, Pergamon Press, Oxford
- Hurley, D. C., Balzar, D., Pustcher, P. T., Hollman, K. W., 1998, Nonlinear Ultrasonic Parameter in Quenched Martensitic Steels, *J. of Applied Physics*, Vol.83, N. 9, p.4584-4587
- Interlloy Technical Data, 2003, 630 (17-4) Precipitation hardening stainless steel bar, www.interlloy.com.au
- Irvine, K.J., Llewellyn, D.T., Pickering, F.B., 1959, Controlled-transformation stainless steels, *Journal of the iron and steel institute*, July, s. 218 – 239, USA
- ISO 6508-2, 1999, *Metalic Metaterials-Rockwell Hardness Test- part 2: Verification and calibration of testing machines*
- Isogawa,S., Yoshida, H., Hosoi, Y., Tozawa, Y. 1998, Improvement of the forgability of 17-4 precipitation hardening stainless steel by ausforming, *Journall of materials processing technology*, 74, 298-306, Elsevier
- Kaluç, E., 1996. *Malzemelerin Kaynak Kabiliyetleri Ders Notları*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

- Kaluç, E., Tülbentçi, K., 1998, Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği, Kocaeli Üniversitesi, 19-20 mart 1998, Kocaeli
- Kattus, J.R., 1978, Aerospace structural metals handbook, Ferrous alloys, code 1501.
- Kaufmann, R., 1983. Messwertaufnehmer Auf DMS Basis Und Ihr Temperaturverhalten, Messen Und Prüfen, December, S.745-750
- Kawai, M., 1984. Problems Raised By Improvements in Load Cell Accuracy, Proceedings of 10th International Conference of IMEKO, Kobe, Japan, September 11-14, s.59-62
- Kaya, A.A., 2003, Kişisel görüşme.
- Kelly, A, 1988, Study On Nonlinearity Of The Super Precision Load Cell Proceedings of International Conference of IMEKO Kobe, Japan, September 11-14, s.89-93
- Knott, A., 1995. The Accuracy of the NPL 1.2 MN Deadweight Force Standard Machine, The 14th International IMEKO TC3 Conference on State of the Art in Force and Mass Measurement, IMEKO TC3, Warszawa, Poland, July 22-25
- Kuvvet Eğitim Dökümanı, 2003, Kuv 1, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli.
- Krauss, G., 1980, Principles of Heat Treatment of Steel, ASM, Ohio, USA
- Krishtal, M. A., 1970, Diffusion Processes in Iron Alloys, Israel Program for Scientific Translations Jurasalem, Israel.
- Lakhtin, Y., 1994, Fiziksel metalurji ve ısıl işlem, Osmangazi Üniversitesi yayını, Eskişehir
- Lukas, J., 1986, Ways for The Removal of The main Disadvantages of Force Transducers with Semiconductor Strain Gages, Proceedings of 11st International Conference of IMEKO TC3 Measurement of Force and Mass, Amsterdam, Netherland, May 12-16, p.283-292.
- Measurements Group Yayını, 1984. Modern Strain Gage Transducers, Epsilonics, Measurements Group Inc., U.S.A.
- Measurements Group Yayını, 1988. Strain Gage Based Transducers, Their Design And Construction, Measurements Group Inc., USA
- Measurements Group Yayını, 1989, Measurements Group -Vishay-U.S.A. Technotes
- Measurements Group Katalog, Transducer Class Strain Gages, Measurements Group Inc., USA.

Metals Handbook, 1998, Desk Edition, ASM International, Ohio.

MKE Seminer Notu, 1982, Çelik ısıtım işlem semineri, 20 – 24 Eylül 1982, Ankara

Murayama, M., Katayama, Y., Hono, K., 1998, Microstructural evolution in a 17-4PH stainless steel after ageing at 400°C, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 30, February 1999, p. 345-353.

Nakagawa, H., Miyazaki, T., Yokota, H., 2000, Effects of ageing temperature on the microstructure and mechanical properties of 1.8Cu-7.3Ni-15.9Cr-1.2Mo-low C, N martensitic precipitation hardening stainless steel, Journal of Materials Science, 35, p. 2245-2253.

Norden, K.E., 1984, Electronic Weighing in Industrial Processes, Granada Technical Books, London, UK.

Nutting, J., 1963. The Electron Microscope And its Application to the Study of Metals, Sorby Centenary Conference, May, Shiffeld.

Onaran, K., Erman, B., 1988, Malzemelerin yapı ve özellikleri, cilt III, İTÜ, İstanbul

Özbay, H., 1997. 100 kN Kapasiteli Basma Tipi Kuvvet Gerinim Ölçerli Dönüştürücü Tasarımı, Yüksek Lisan Tezi, KO.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli

Parlaktürk, H., 2000. Halka tipli kuvvet dönüştürücüsü tasarımı ve ölçüm yöntemleri, Yüksek Lisan Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Ens., Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli

Peckner, D.B., 1977, Handbook of stainless steels, Mc Graw-Hill book company

Perry, C.C., Lissner, H.R., 1962. The Strain Gage Primer, McGrawhill, New York.

Perry, C.C., Jasper, J.C., 1977, Handbook of stainless steels, Mc graw hill book Co., USA

Peters, M., 1984, Reasons for and Consequences of The Rotation and Overlapping Effect, Proceedings of 10th International Conference of IMEKO, Kobe, Japan, September 11-14, s.353-358.

Quinn, T.J., Speake, C.C., Brown, L.M. .,1992. Material Problems in the Construction of Long-period Pendulums, Phil. Mag., A 65(2), p 261-276

Rack, H.J., Kalish, D., 1974, The Strength, Fracture Toughness, and Low Cycle Fatigue Behavior of 17-4 PH Stainless Steel, Metallurgical Transactions, volume 5, july 1974, s. 1595-1605.

Read, W. T., 1953, Dislocations in Crystal, McGraw-Hill Book Company, Inc. New York

- Salman,S., Gülsoy,H.Ö., Demir, O., 2002, 17-4PH paslanmaz çelik parçalarında ısıtım işlem şartlarının mekanik özelliklere etkisi, 9. Denizli malzeme sempozyumu, 8-10 mayıs 2002, Denizli
- Sava, J., 1990, Load Cells 200N....1kN With H-type Spring Elements, Proceedings of 12th International Conference oo IMEKO TC3 Measurement of Force and Mass, Szeged, Hungary, September 4-7, p.251-256
- Skundric S., and Kovecevic D., 1990. The Strain Gage Based Load Cell with bolted Spring Assembly, Proceedings of 12th International Conference of IMEKO TC3 Measurement of Force and Mass, Szeged, Hungary, September 4-7, p.251-256
- Smallman, R.E. and Ashbee. K.H.G, 1966. Modern Metallography Pergamon Press, London.
- Spoor, M., 1986. Improving Creep Performance Of The Strain Gage Based Load Cell, Proceedings of 11th International Conference of IMEKO, Amsterdam, The Netherland, May 12-16, s.293-302
- Steidel, R. F., 1971. An Introduction to Mechanical Vibrations, John Wiley & Sons, Canada
- Technical Note, 1978. Strain Gage Installation Procedures For Transducers, Measurement Group Inc., USA.
- Technical Note, 1979. Optimising Strain Gage Excitation Level, Measurement Group Inc., TN-502, USA.
- Technical Note, 1983. Errors Due To Misalignment Of Strain Gages, Measurement Group Inc., TN-511, USA.
- Technical Note, 1992. Strain Gage Thermal Output And Gage Factor Variation With Temperature, Measurement Group Inc., TN-504-1, USA.
- Topuz, A., 1993. Malzeme Muayenesinde Özel Konular, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, Sayı 280
- TS 2535 - 1, 2002, Paslanmaz çelikler-bölüm 1: paslanmaz çelikler listesi, TSE, Ankara
- TS 2535, 1976, Paslanmaz çelikler, TSE, Ankara
- Vaughan, J., 1975. Application Of B & K Equipment To Strain Measurements, Bruel And Kjaer, Denmark.
- Viswanathan, U.K., Banerjee, S., Krishnan, R., 1988, Effects of aging on microstructure of 17-4 PH stainless steel, Materials science and engineering, A104, 181-189, Elsevier

Yamaguchi, Y., Ishino, J., Hida, N., 1984. Evaluation Of Creep Of Load Cells Utilizing Strain Gages, Proceedings of 10th International Conference of IMEKO, Kobe, Japan, September 11-14, s.33-36

Yorgiadis A., 1985. Long term Stability of Strain Gage Load Cells, Presentation at the Western Regional Strain Gege Committee, Winter Meeting, February 12-13, Phoenix, Arizona.



ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Eskişehir’de doğdu. İlk öğrenimini İzmit Hızırreis İlkokulunda, orta öğrenimini İzmit Ortaokulunda, lise öğrenimini ise Gölcük Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünde tamamladı. Üniversite eğitimine 1990 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde başladı. 1994 yılında mezun oldu ve Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 1996 yılında mezun olarak Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı İmalat ve Konstrüksiyon dalında doktora eğitimine başladı.

1994 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak işe başladı. 2000 yılında ise bu görevinden ayrılarak TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsünde (UME) işe başladı. Halen, TÜBİTAK-UME Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarında araştırmacı ve laboratuvar Kuvvet birim sorumlusu olarak görev yapmaktadır.