İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERS SARKAÇLA ESNEK ELEMANLARIN ANELASTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Levent YAĞMUR

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONSTRÜKSİYON VE İMALAT

NİSAN 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERS SARKAÇLA ESNEK ELEMANLARIN ANELASTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Levent YAĞMUR
(503972012)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Kasım 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Nisan 2006

Tez Danışmanı :	**Y.Doç.Dr. Turgut GÜLMEZ**
Diğer Jüri Üyeleri	**Prof.Dr. Paşa YAYLA (KO.Ü.)**
	Doç.Dr. Erol ŞENOCAK (İ.T.Ü.)
	Doç.Dr. Kenan GENEL (SA.Ü.)
	Y.Doç.Dr. Muzaffer ERTEN (İ.T.Ü.)

NİSAN 2006

ÖNSÖZ

Bakır Berilyum (Cu-Be) alaşımlarının malzeme özelliklerinin anelastiklik davranışına etkilerinin incelendiği bu çalışma, TÜBİTAK-Ulusal Metroloji Enstitü'nde (UME) gerçekleştirilmiş olup, UEKAE ve bazı firmaların da desteği ile sonuçlandırılmıştır.

Bu çalışma konusunu bana öneren ve çalışmanın bir çok safhasında bana desteğini esirgemeyen, UME Kütle Standartları Laboratuvar sorumlusu Sevda KAÇMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Çalışmalara birlikte başladığım Doç.Dr. Şafak YILMAZ'a ve bu çalışmanın büyük bir bölümünde ve tamamlanmasında tez hocası olarak her türlü yardımı yapan ve tezin iyi bir çalışma olması için tüm gayretini sergileyen değerli hocam Y.Doç.Dr. Turgut GÜLMEZ'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ters sarkaç sisteminin mekanik tasarım aşamasında daha farklı açılardan düşünmeme vesile olan Prof.Dr. Peter R. SAULSON'a, CCD kamera ve optik ölçüm sistemiyle ilgili tüm çalışmalarda bana yardım eden Prof.Dr. Fikret Hacızade'ye, düzeneğin mekanik imalatını kendi imkanlarıyla gerçekleştiren Ermak Makina Muhendislik A.Ş.'den Zafer ERTÜRK'e, esnek elemanların imalatı ve bazı grupların iç yapı incelemesi için gerekli maddi kaynağı sağlayan SEM Limited Şti.'den Salih ÖZTUNAOĞLU'na, TEM incelemeleri için Kırıkkale Üniversitesi'nden Erdem YAŞAR'a, CMM ölçümleri için Okhan GANİOĞLU ve İlker MERAL'e, pürüzlülük ölçümleri için Murat AKSULU'ya, sertlik ölçümleri için Cihan KUZU'ya, tüm mekanik işlemlerde yardımcı olan Dr. Bülent AYDEMİR'e ve fikirlerine her zaman başvurduğum Dr. Sinan FANK'a, ısıl işlemlerde fırının kullanılmasında bana yardımcı olan Dr. Hüseyin SÖZERİ ve Dr. Uğur KÜÇÜK'e, esnek elemanların tel erozyonla imalatında yardımcı olan TEK-İŞ Ltd'den Şamil ÖZOĞLU'na ve UME Mekanik Atelye sorumlusu Sevim CEVAHİR nezdinde tüm çalışanlarına teşekkürlerimi sunuyorum.

Nisan 2006 Levent YAĞMUR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **xii**
SUMMARY **xiv**

1. GİRİŞ **1**

2. ESNEK ELEMANLAR **7**
2.1. Esnek Eleman Türleri 8
2.1.1. Yaprak Tipi Elemanlar 8
2.1.2. Çentikli Elemanlar 11
2.1.3. Diğer Tipler 12
2.2. Esnek Eleman İmalat Yöntemleri 13
2.3. Esnek Eleman Tasarım Kriterleri 15
2.4. Esnek Elemanların Malzemesi 16
2.5. Esnek Elemanların Montajı 21
2.6. Esnek Elemanlı Sistemler 24
2.6.1. Doğrusal Hareketli Mekanizmalar 24
2.6.2. Dönme Hareketli Mekanizmalar 25

3. ELASTİKLİK VE ANELASTİKLİK **26**
3.1. Elastik Davranış 27
3.2. Anelastik Davranış 29
3.3. Büyük Dış Atalete Sahip Rezonans Sistemler 34
3.3.1. Sistemin Zorlanmış Titreşimi 35
3.3.2. Sistemin Serbest Titreşimi 36
3.4. Mekanik Modeller 37

4. ESNEK ELEMANLI TERS SARKAÇ **40**
4.1. Esnek Elemanlı Sarkaçlara Genel Bir Bakış 40
4.2. İdeal Ters Sarkaç 41
4.3. Anelastik Esnek Elemanlı Ters Sarkaç 44
4.4. Sarkaç Kalite Faktörü ve Hesabı 45

5. DENEY NUMUNELERİNİN ÖZELLİKLERİ **48**
5.1. Malzeme Özellikleri 48
5.2. Yüzey Etkileri 48
5.3. Isıl İşlemler 49
5.3.1. Çözeltiye Alma 49
5.3.2. Yaşlandırma ve Uzun Süreli Yaşlandırma 51

5.3.3. Retrograsyon ve Yeniden Yaşlandırma (RYY) 51
5.3.4. Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı 52
5.4. Cu-Be Malzemesinin Mikro Yapısal Özellikleri 53

6. DENEY NUMUNLERİ VE ÖLÇÜM DÜZENEĞİ 56
6.1. Deney Planı 56
6.2. Deney Numuneleri 57
6.2.1. Tasarımı 57
6.2.2. Malzeme Özellikleri 59
6.2.3. İmalatı 59
6.2.4. Isıl İşlemler 60
6.2.4.1. Yaşlandırma ve Uzun Süreli Yaşlandırma 60
6.2.4.2. Retrograsyon ve Yeniden Yaşlandırma (RYY) 62
6.2.4.3. Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı 62
6.2.5. Numunelerin Mekanik Özellikleri 63
6.2.6. Optik Mikroskop İncelemesi 64
6.2.7. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) İncelenmesi 67
6.3. Ölçüm Düzeneği 73
6.3.1. Mekanik Tasarım 74
6.3.2. Optik 77
6.3.3. Dinamik 78
6.3.3.1. Esnek Elemanın Rijitliği 78
6.3.3.2. Sistemin Periyodu ve Ayarlanması 79
6.3.3.3. Kütlesel Atalet Momenti 81

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 82
7.1. Genel Sonuçlar 85
7.2. İç Yapının Sarkaç Kalite Faktörüne Etkisi 86
7.3. Gerilme Sonrası Anelastik Davranış 90
7.4. Dinamik Gerilme Altında Modül Hatasının Belirlenmesi 92
7.5. Anelastik Sınırın Belirlenmesi 94
7.6. Elde Edilen Sonuçların Güvenilirliği 98
7.7. İç Yapı Özelliklerinin Anelastik Davranışa Etkilerinin İrdelenmesi 100
7.8. Elde Edilen Sonuçların Genel Özeti 102
7.9. Öneriler 103

KAYNAKLAR 105

ÖZGEÇMİŞ 109

KISALTMALAR

Cu-Be	**:**	Bakır berilyum alaşımı
Cu	**:**	Bakır
Be	**:**	Berilyum
Co	**:**	Kobalt
Ni	**:**	Nikel
Fe	**:**	Demir
Pb	**:**	Kurşun
ASTM	**:**	Amerikan Test ve Malzeme Birliği
TÜBİTAK	**:**	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UME	**:**	Ulusal Metroloji Enstitüsü
UEKAE	**:**	Ulusal Elektronik Kriptoloji Araştırma Enstitüsü
HRC	**:**	Rockwell sertlik değeri (C skalası)
HRB	**:**	Rockwell sertlik değeri (B skalası)
HV1	**:**	Vickers sertlik değeri (1 kg'lık yük için)
G.P	**:**	Guinier-Preston bölgeleri
SA	**:**	Katı çözelti uygulanmış numune
AR	**:**	Katı çözelti sonrası soğuk şekil değiştirmiş numuneler
Y	**:**	Yaşlandırılmış numuneler
USY	**:**	Uzun süreli yaşlandırılmış numuneler
TB1,2,3	**:**	Yaşlandırma sonrası tavlama uygulanmış numuneler
Y2	**:**	Katı çözelti sonrası yaşlandırılmış numuneler
USY2	**:**	Katı çözelti sonrası uzun süreli yaşlandırılmış numuneler
KÇ	**:**	Katı çözelti uygulaması
ŞD	**:**	Soğuk şekil değiştirmiş (pekleşme yapılmış)
TD04	**:**	Katı çözeltiye alındıktan sonra soğuk şekil değiştirmiş
TH04	**:**	Çökelme sertleştirmesi yapılmış
TB00	**:**	Katı çözeltiye alınmış
CMM	**:**	Koordinat ölçme cihazı
CD	**:**	Yoğun disk
UNF	**:**	Birleştirilmiş numaralandırma sistemi
CCD	**:**	Işığa hassas bir çeşit elektronik kamera
BIMP	**:**	Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Bürosu
LIGO	**:**	Lazer interferometreli yerçekimsel dalga gözlemlenmesi
TEM	**:**	Geçirimli elektron mikroskobu

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	Esnek elemanların imal edildikleri malzemeler ve elastik modülleri……..	17
Tablo 2.2.	Malzeme özellik tabloları için temel alınan değerler……...	17
Tablo 2.3.	Bazı malzemelerin özellikleri…….....	18
Tablo 2.4.	Bazı malzemelerin normalize edilmiş özellik grupları.....	19
Tablo 3.1.	Elastiklik ve anelastiklik kavramlarının karşılaştırmalı tablosu …..	27
Tablo 5.1.	Cu-Be malzemesinin mekanik özellikleri (silindirik formda).....	51
Tablo 6.1.	C17200 kodlu Cu-Be malzemesinin kimyasal bileşimi.....	59
Tablo 6.2.	Numunelerin imalatında kullanılan tezgahın özellikleri.....	59
Tablo 6.3.	Numunelerin mekanik özellikleri.....	63
Tablo 6.4.	Düzenekte ölçüm elemanı olarak kullanılan kameranın özellikleri.	78
Tablo 7.1.	Deneyler sırasındaki laboratuvar şartları.....	82
Tablo 7.2.	Numune kodları, uygulanan ısıl işlemler ve malzeme özellikleri....	84
Tablo 7.3.	İç yapının Q değerine etkisi	88
Tablo 7.4.	Tüm deney numunelerinin Q değerleri (ω=1 rad/sn için).....	89
Tablo 7.5.	Gerilme sonrası anelastik davranışta zaman sabitleri.....	92
Tablo 7.6.	Farklı iç yapıların modül hataları.....	93
Tablo 7.7.	Belirsizlik Bileşenleri.....	98
Tablo 7.8.	Yaşlandırılmış Cu-Be malzemesi için $\Delta E/E$ Değerleri.....	99

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. : Tek serbestlik derecesine sahip esnek elemanlı sistem …….. 7
Şekil 2.2. : Eğilme altındaki elastik elemanın matematik modeli..... 9
Şekil 2.3. : Çekme gerilmesi altında eğilmeye çalışan bir elemanın matematik modeli..... 9
Şekil 2.4. : Teğetsel (F_y) ve çekme kuvvetinin (F_x) birlikte etki ettiği esnek eleman modeli..... 10
Şekil 2.5. : Çentik türüne göre; (a) dairesel, (b) eliptik, (c) yaprak tür esnek elemanlar..... 11
Şekil 2.6. : Çapraz elastik elemanlar: a) Basit iki elastik elemanlı, b) Simetrik dört yaprak tip elemanlı, c) Simetrik üç yaprak tip elemanlı (merkezdeki elemanın genişliği diğer ikisinin toplamı kadar)..... 12
Şekil 2.7. : BIPM NBS-2 Kütle komparatörü esnek elemanı; a) Isıl işlem öncesi, b) Aşındırma işlemi sonrası son hali..... 14
Şekil 2.8. : Hassas yerçekimi deneyleri için kullanılan cihazın esnek elemanı; a) Tel erozyon ile imalatı sonrası elektron mikroskobu fotoğrafı, b) Elektro-parlatma sonrası son hali..... 15
Şekil 2.9. : Simetrik tasarımın etkisi..... 16
Şekil 2.10. : Küçük esnek eleman mekanizmaları için malzeme özellik profili.. 20
Şekil 2.11. : Metrolojik açıdan yüksek kararlılık için malzeme özellik profili... 21
Şekil 2.12. : Bir esnek elemanın uygun şekilde montajı..... 21
Şekil 2.13. : Yaprak tip esnek elemanın rijit bağlantısı..... 22
Şekil 2.14. : Tipik bir yaprak esnek eleman bağlantısı; a) Civata kesiti çok küçük ve kullanılan rondela uygun değil, b) Doğru bağlanma şekli..... 22
Şekil 2.15. : Uzun esnek elemanlı bir sistemde destekleyiciler..... 23
Şekil 2.16. : Esnek elemanın yüzeyleri ile bağlandığı kısımlarda oluşan kayma gerilmeler (W yükü altında çekme gerilmesine maruz, L boyunda, I kesit atalet momentine sahip, E elastiklik modülünde malzemeden imal edilmiş bir esnek elemanda)..... 24
Şekil 2.17. : İki yaprak tip esnek elemanın kullanıldığı paralel levhalı mekanizma..... 25
Şekil 2.18. : Çapraz tip esnek elemanlı mekanizma..... 25
Şekil 3.1. : Elastik davranışın matematik modeli..... 28
Şekil 3.2. : σ-ε_t eğrisinde tanımlamalar..... 29
Şekil 3.3. : Sabit yüklemede gerilme sınırları..... 30
Şekil 3.4. : Anelastiklik davranışının aşamaları; a) Sabit yük altında anelastiklik (geri dönebilir), b) Sabit yük altında geri dönemez anelastiklik (viskoelastik davranış)..... 32

Şekil 3.5. : Anelastik yaya sahip tek serbestlik derecesine sahip bir sistemin mekanik modeli..... 34
Şekil 3.6. : Bir anelastik katının doğal titreşimlerinin serbest azalması..... 37
Şekil 3.7. : Mekanik modeller, a) Tek gevşeme sürecine sahip Maxwell Modeli, b) Genelleştirilmiş birleşik model..... 38
Şekil 4.1. : Esnek elemanlı sarkaçlar; (a) Basit sarkaç, (b) Ters sarkaç, (c) Yeni ters sarkaç..... 41
Şekil 4.2. : İdeal bir test sarkacın şematik diyagramı..... 42
Şekil 4.3. : Bir ters sarkacın normalize edilmiş potansiyel enerji fonksiyonu V/κ (mgL/κ 'ın dört değeri için); (a) mgL/κ=0, (b) mgL/κ=0.99,1.00,1.01..... 43
Şekil 4.4. : Zamana bağlı genlik azalma karakteristiğine genel bir bakış..... 46
Şekil 5.1. : Cu-Be malzemesinin faz diyagramı..... 49
Şekil 5.2. : Cu-Be malzemesinin sertleştirme işlemi..... 50
Şekil 5.3. : Retrograsyon ve yeniden yaşlandırma (RYY)..... 52
Şekil 5.4. : Toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi..... 53
Şekil 5.5. : Cu-Be (UNS 17200) faz diyagramı..... 56
Şekil 5.6. : Yaşlandırma sırasında malzemede oluşan çökelti formları..... 55
Şekil 6.1. : Deney numunelerinin imalat resimleri..... 58
Şekil 6.2. : Numunelerin ısıl işlemi için aparat..... 60
Şekil 6.3. : Cu-Be malzemesi için yaşlandırma eğrisi..... 61
Şekil 6.4. : Tavlama sıcaklığı ve süresinin numune sertliğine etkisi..... 62
Şekil 6.5. : Yaşlandırılmış (Y) ve AR kodlu numunelere uygulanan yeniden kristalleşme ısıl işlemi..... 63
Şekil 6.6. : Numunelerin enine (a) ve boyuna (b) kesit görüntüsü..... 64
Şekil 6.7. : Yaşlandırılmış numunenin iç yapısı (315 ^{0} C'de 2 sa.)..... 65
Şekil 6.8. : Uzun süreli yaşlandırılmış numunenin iç yapısı (315 ^{0} C'de 6 sa). 66
Şekil 6.9. : Numunelerde yeniden kristalleşme başlangıcı..... 66
Şekil 6.10. : Numunelerde tane büyümesi..... 67
Şekil 6.11. : Yaşlandırılmış numunenin elektron mikroskop görüntüsü..... 68
Şekil 6.12. : Berillitlerin tane içerisindeki dağılımları..... 69
Şekil 6.13. : Uzun süreli yaşlandırılmış numunenin geçirimli elektron mikroskop görüntüsü..... 70
Şekil 6.14. : Yapıda Widmanstätten deseni..... 71
Şekil 6.15. : TB1 numunelerin TEM fotoğrafı..... 72
Şekil 6.16. : Yaşlandırma sonrası tavlama ile yapıdaki bozulma..... 73
Şekil 6.17. : Deney düzeneğinin fotoğrafı..... 74
Şekil 6.18. : Düzeneğin genel perspektif görüntüsü (CAD)..... 75
Şekil 6.19. : Esnek elemanın sarkaç koluna bağlantı şekli..... 76
Şekil 6.20. : Ölçüm düzeneğinin kesit resmi ve parçalar..... 77
Şekil 6.21. : CCD kameranın aktif bölgesinin fotoğrafı..... 77
Şekil 6.22. : Potansiyel enerjilerin dengelenmesi..... 79
Şekil 6.23. : Net potansiyel enerji..... 80
Şekil 6.24. : Kütle ağırlık merkezinin periyoda etkisi..... 80
Şekil 6.25. : Kütle ağırlığının periyoda etkisi..... 81
Şekil 7.1. : Tipik bir numune için sarkacın farklı periyotlarda salınım davranışı; salınım periyotları: a) 3.1 sn, b) 7.8 sn, c) 13.1 sn, d) 27.8 sn..... 85

Şekil 7.2. : Genlik azalmasının zaman göre değişimi..... 86
Şekil 7.3. : Sarkaç kalite faktörünün (Q) açısal frekansla (ω) değişimi..... 87
Şekil 7.4. : Gerilme sonrası davranışın zaman göre değişimi..... 91
Şekil 7.5. : Gerilmeye bağlı olarak modül hatasının değişimi..... 93
Şekil 7.6. : Gerilme oranına bağlı olarak modül hatasının değişimi..... 94
Şekil 7.7. : Kaba taneli numunede anelastik sınır..... 95
Şekil 7.8. : Uzun süreli yaşlandırılmış numunede anelastik sınır..... 96
Şekil 7.9. : Yaşlandırılmış numunede anelastik sınır..... 97
Şekil 7.10. : Yaşlandırılmış Cu-Be malzemesinin önceki çalışmalara göre anelastik sınırı..... 97

SEMBOL LİSTESİ

k	:	Rijitlik
θ	:	Açısal sapma
M	:	Moment
$k_{\theta,M}$	:	Bir momente karşılık ortaya çıkan açıya bağlı rijitlik
E	:	Elastiklik modülü
G	:	Kayma modülü
K	:	Hacim modülü
ν	:	Poisson oranı
I	:	Kütlesel atalet momenti
I_{kesit}	:	Kesit atalet momenti
F	:	Çekme ya da basma kuvveti
F_x	:	X yönünde etkiyen çekme ya da basma kuvveti
F_y	:	Y yönünde etkiyen çekme ya da basma kuvveti
σ	:	Gerilme, dayanım
σ_y	:	Akma gerilmesi
σ_A	:	Anelastik gerilme sınırı
σ_E	:	Elastik gerilme sınırı
σ_{maks}	:	Maksimum gerilme
t	:	Esnek elemanın kalınlığı
b	:	Esnek elemanın genişliği
L	:	Esnek elemanın boyu, sarkaç kol boyu
L_{eff}	:	Esnek elemanın efektif boyu
Δ	:	Yerdeğiştirme
y	:	Y yönündeki yerdeğiştirme
δ	:	Sapma
s	:	Efektif moment noktası
τ	:	Eğilme momenti
W	:	Ağırlık kuvveti
C_1, C_2	:	Katsayılar
R_a	:	Pürüzlülük değeri
ρ	:	Malzemenin yoğunluğu
k	:	Isıl iletkenlik katsayısı
α	:	Isıl genleşme katsayısı
C	:	Özgül ısı
R	:	Eğrilik yarıçapı
τ_s	:	Kayma gerilmesi
T	:	Kinetik enerji
V	:	Potansiyel enerji
ω	:	Açısal frekans
ω_r	:	Rezonans frekansı
T	:	Periyot

ε	:	Birim şekil değişimi
ε_x	:	X yönündeki birim şekil değişimi
ε_y	:	Y yönündeki birim şekil değişimi
ε_t	:	Toplam birim şekil değişimi
M	:	Genel malzeme elastiklik modülü
J	:	Uygunluk (Modül uygunluğu)
μ	:	Sönümleme viskozitesi
β	:	Sıkıştırılabilirlik
t	:	Zaman
E_u	:	Gevşememiş elastiklik modülü
E_r	:	Gevşemiş elastiklik modülü
ΔE	:	Elastik modül kaybı
$\Delta E/E$	:	Bağıl elastik modül kaybı
$\alpha, \gamma, \beta, \tau$, K	:	Sabitler
x	:	X ekseni yönündeki uzama miktarı
ΔW	:	Malzemede bir çevrimde depolanan enerji miktarı
θ	:	Uygulanan gerilme ve şekil değiştirme arasındaki faz farkı
m	:	Kütle
A_n	:	Salınım genliği
A_o	:	İlk salınımın genliği
A_n	:	n.salınımın genliği
δ	:	Logaritmik azalma fonksiyonu
ϕ	:	Malzeme iç sürtünmesi
g	:	Yerçekimi ivmesi
N	:	Sarkaca etkiyen kuvvet
Q	:	Sarkaç kalite faktörü
T1,T2,T3	:	Değişik tavlama sıcaklıkları

TERS SARKAÇLA ESNEK ELEMANLARIN ANELASTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Metallerin anelastik davranışı, metroloji biliminin özellikle kütle, basınç ve boyutsal alanlarında, yerçekimiyle ilgili deneyler ile hassas ölçümlerde kullanılan yüksek hassasiyet gerektiren cihaz ve sensör elemanlarının tasarımıyla ilgili bir malzeme özelliğidir. Sensöre uygulanan yükün genliği ve onun uygulanma sıklığı cihazın ölçüm belirsizliğini etkiler. Tüm sensörler dinamik yük altında çalışırlar ve bu nedenle de dinamik olarak test edilmeleri gerekir.

Önceki çalışma ve açıklamalarda metallerdeki anelastiklik malzeme iç sürtünmenin kaynağı olarak belirtilmiş ve sönümlenen kuvvet uygulanan yükün hızıyla orantılı olarak modellenmiştir. Bahsedilen çalışmada, anelastiklik kavramı, yükleme koşulları ve malzemedeki diğer iç yapısal mekanizmaların sonucu olan iç sürtünmeyi ifade eden bir terim olarak ele alınmıştır. Bazı mekanik modeller metallerde uygulanan yükün izi olarak sönümlemeyi tanımlamak amacıyla kullanılmıştır. Gecikmiş cevabın ve sönümlemenin tanımlanmasında elastiklik modülü, frekans alanında bir karmaşık sayı olarak ele alınabilir. Bu sayının gerçel ve sanal kısımları kuvvet ile ortaya çıkan şekil değişimleri arasındaki fazı ve kaymasını göstermektedir. Bu değerlerin oranı malzemenin modül kaybını vermektedir.

Sarkaç, esnek elemanın dinamik olarak testinde çeşitli davranışlara sahiptir. Basit bir sarkaçta, frekans sarkaç kolunun uzunluğuna bağlı olduğundan, düşük frekanslar kolayca elde edilemez. Frekans, sarkaç kol uzunluğunun karesiyle değiştiğinden bir kaç saniyeden daha fazla yüksek periyotların elde edilmesi, deney yapma uygunluğu olmayan çok uzun sarkaç kollarını gerektirir. Yine basit sarkaçta frekans, asılı kütlenin ağırlığından bağımsızdır (eğer havanın kaldırma etkisi yok sayılırsa). Bir ters sarkaç, metallerin anelastikliğinin belirlenmesinde kullanılan özel ve değerli bir cihazdır. Ters sarkaçta frekans, üzerinde taşınan kütlenin ağırlığının veya ağırlık merkezinin değiştirilmesiyle geniş bir aralıkta kolayca değiştirilebilir. Bu özellik, özellikle sarkaç esnek elemanının anelastikliği üzerine yapılan çalışmalarda, metallerin dinamik olarak testine imkan tanır. Bir çok malzemede (gerçekte metrolojik açıdan tümünde), esnek eleman malzemesinin ideal elastik olmaması nedeniyle ortaya çıkan enerji kaybı sonucunda yapısal sönümleme görülmektedir. Malzeme tarafından depolanarak dönüşen enerji nedeniyle esnek eleman yük uygulanmadan önceki eski pozisyonuna dönemez. Zamana bağlı gevşeme süreci görülür. Ters sarkaç, zorlanmış veya serbest bir titreşim sisteminde, uygulanan yük ve ortaya çıkan şekil değişimi arasındaki faz farkının doğrudan tespitinde, düşük sönümleme nedeniyle tespiti zor olan elastik modül kaybının belirlenmesinde kullanılan anelastiklik ölçüm cihazıdır. Bir çok sarkaç türü ve anelastiklik ölçümü için farklı uygulama şekilleri mevcuttur. Bazı araştırmacılar, yüksek hassasiyetli kütle karşılaştırması yapabilen cihazlarının tasarlanması amacıyla, bakır berilyumdan esnek elemanlara sahip, anelastiklik ölçümünün yapılabildiği birleştirilmiş ve

burulmaya çalışan sarkaçlar kullanmışlardır. Çeşitli esnek eleman formları ve tasarımları pivot elemanı olarak kullanılmıştır. Bazı araştırmacılar, esnek elemanın basma gerilmesine maruz kaldığı bir ters sarkaçta ölçümler yapmıştır. Bu çalışmalarının deney düzeneğinde hazır tip çelik malzemeden esnek elemanlar kullanılarak, değişik salınım frekanslarına göre anelastiklik ölçülmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar, ters sarkaç düzeneğinin malzemedeki iç sürtünmelerin çalışılmasında değerli bir cihaz ve geniş bir frekans aralığında anelastiklik göstergesi olarak kullanılabileceği, diğer yöntemlerle çok zor olan anelastik davranış özelliklerinin doğrudan testlerine imkan tanıdığı gösterilmiştir.

Bu çalışmada anelastiklik ölçümü için, esnek elemanı bakır berilyum malzemeden imal edilmiş yeni bir ters sarkaç tasarlanmış ve çalışma performansının sınırları belirlenmiştir. Yeni sarkacın esnek elemanı dikey pozisyonda basma değil çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bir çok esnek eleman tasarımları ve malzeme özellikleri nedeniyle çekme gerilmesi altında çalışmakta olup, basma gerilmesi uygulamalarında performansları kötüdür. Esnek elemanın çekme gerilmesine maruz kalabilmesi için, bağlandığı sarkaç koluyla yeni bir şekilde montaj edilmiştir. Sarkacın kalite faktörü, üstel bir fonksiyon olarak azalan salınımların TÜBİTAK-UEKAE tarafından geliştirilip üretilen CCD kamera ile, 2 s ile 30 s arasındaki periyotlarda tespit edilmesiyle elde edilen veriler kullanılarak belirlenmiştir.

İkinci bölümde, hassas parçalar olarak kullanılan esnek elemanların tipleri, imalat metotları sunulmuş ve onların rijitlik katsayılarının hesaplanması ve diğer parametreler açıklanmıştır. Esnek elemanların kullanıldığı bazı sistemler ile imalatı için uygun esnek eleman malzemeleri verilmiştir.

Üçüncü bölümde, elastiklik ve anelastikliğin teorisi açıklanmıştır. Metallerin elastik-anelastik davranışının ifade edilmesi için kullanılan çeşitli mekanik modeller üzerinde durulmuştur. Farklı modellerin dinamik cevaplarıyla anelastikliğin belirlenmesi için kullanılan ölçüm metotları sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, esnek elemanlı ters sarkaç dinamiği hakkında bilgiler verilmiştir. İdeal ve anelastik sarkaç için denklemler açıklanmıştır. Sarkaca ait kalite faktörü ve potansiyel enerji fonksiyonları vurgulanmıştır.

Beşinci bölümde, ısıl işlemler ve yüzey etkileri açıklanmıştır.

Altıncı bölümde, Cu-Be numunelerinin tasarımı, malzeme iç yapısının optiksel ve geçirimli elektron mikroskobu fotoğrafları, imalat parametreleri sunulmuştur. Deneysel düzenek ile onun mekanik ve optik kısımları açıklanmıştır.

Tezin son bölümde, farklı içyapılardaki Cu-Be örnekleriyle ters sarkacın kalite faktörleri, modül kayıpları ve anelastik limitleri verilmiştir. Ayrıca, malzeme mikro yapısının anelastik özelliğe etkisi ve bu davranışa neden olan mekanizmalar tartışılmıştır.

INVESTIGATION OF ANELASTIC BEHAVIOUR IN FLEXURE ELEMENTS USING INVERTED PENDULUM

SUMMARY

Anelastic behaviour of metals is one of the mechanical properties interested for designing high accurate measurement device and sensors, which are especially used in mass, force, pressure and dimensional fields of metrology science, gravitational experiments and precision measurements. Amplitudes of load applied on sensor with the frequency designate its level of measurement uncertainty. All sensors are exposed to dynamic loading therefore they must be tested in dynamic mode.

Previous efforts and explanations performed carried out to understand anelasticity in metals were emphasized as source of internal friction and it was modelled the damping force as proportional to velocity of applied load on it. In that work, term of anelasticity refers to friction that results from loading conditions and other micro mechanical process in materials. Some mechanical models were used to describe damping as sign of applied load in materials. Description of delayed response and damping can be determined by taking modulus of elasticity as complex number in frequency-domain. The real part and the imaginary part of it represent in-phase restoring force and phase lag respectively. The ratio of these values gives us modulus loss of the materials.

A pendulum has such behaviour for dynamic testing of its flexure. In a simple pendulum, low frequencies cannot be easily provided as frequencies depend on length of pendulum rod. The frequency changes as a function of the square root of the length so that the higher periods more than a few seconds require very long pendulum rod, which is not useful for experimental view. Besides, frequencies in a simple pendulum are independent of suspended mass (if it assumes that air bouncy effect is nonexist). An inverted pendulum is a particularly valuable measurement apparatus to determine anelasticity of metals. The frequencies of an inverted pendulum are easily changed over a wide band by adding mass on top of the pendulum mass or by changing centre of gravity of the suspended mass. This enables dynamic testing of metals especially studying anelasticity in flexure elements of the pendulum. In many materials (in fact all metals in view of metrology science) structural damping occurs because the energy loss is due to the flexure material, which is not perfect elastic. Energy stored into the material is dissipated therefore the flexure is not returned to its original position. It shows time depended relaxation process. An inverted pendulum can be used as an anelastic measurement apparatus to determine directly the phase shift between applied stress and resulting strain and modulus loss of elasticity, difficult to see in materials with low damping in a forced or free vibration. There are many types of pendulum apparatus and different orientations are used for measurement of anelasticity. Some researchers used combined torsional and combined ones to determine anelasticity of flexures, made of copper beryllium, to design high sensitive mass comparator. Different flexure forms

and designs were used as pivot elements. Several researchers carried out some measurements using an inverted pendulum in compression. They used instant steel flexure element in their test set-up and determined anelasticity with respect to various frequencies. Their studies show that inverted pendulum is valuable tool for study internal friction and it can be used as a probe of anelasticity in a wide band of frequencies and allows direct tests of features of anelastic behaviour that are hard to perform in other ways.

In this study, a novel inverted pendulum with a flexure element, made of beryllium-copper alloy, for measuring anelasticity in spring materials was designed and the limits of its working performance were presented. The flexure of the new pendulum was subjected to a tension stress at vertical position not compression one. Many flexure elements are used in tension and they are not good at compression applications because of their design and material properties. A new orientation was done for connection of the flexure and pendulum rod to provide a tension stress on it. Quality factor of the pendulum was determined by measuring pendulum oscillation, decaying exponentially, using a CCD camera, developed and produced by TÜBİTAK-UEAKE, detecting angular changes of the pendulum between 2 s and 30 s oscillation periods.

In chapter two, flexures used as a precise element, types, manufacturing methods are given and calculation of their stiffness and other parameters are explained. Some systems with flexure elements and suitable materials for manufacturing are introduced.

In chapter three, theory of elasticity and anelasticity are explained. Mechanical models for representing of elastic-anelastic behaviour of metals are mentioned. Dynamic responses of different models and measurement methods used for determination of anelasticity are given.

In chapter four, information about dynamic of the inverted pendulum with flexure element is given. Ideal and anelastic pendulum equations are explained. Potential energy functions and quality factor of the pendulum are emphasized.

In fifth chapter, heat treatments and surface effects are explained.

In sixth chapter, Cu-Be samples design, material microstructure's optical and transmission electron microscopy photographs, manufacturing parameters are presented with experimental set-up and its parts both mechanical and optical ones.

In the last chapter of the thesis, quality factors of the inverted pendulum with Cu-Be samples in different microstructure, their modulus loss and anelastic limits are given. And also microstructure effects and mechanisms on anelastic behaviour of the material are discussed.

1. GİRİŞ

Malzemelerin elastik deformasyon özelliği, hassas makina ve ölçüm cihazlarında 100 yıldan fazladır kullanılmaktadır. Malzemelerin elastiklik özelliğinin kullanıldığı 2 ana grup uygulama alanından söz edilebilir. Bunlar; Metroloji'de ölçme elemanı ve hassas cihazlarda esnek elemanlardır. Esas olarak bu özelliğe göre tasarlanmış esnek elemanlar, çok yüksek hassasiyetin söz konusu olduğu mekanik ölçüm cihazlarında, mikroskoplarda, terazilerde, adım tekrarlı kamera ve x-ışın interferometlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Esnek elemanlar bilgisayar sabit disklerinde, CD (yoğun disk) çalarlarda, CMM'de (koordinat ölçme cihazı), optik tarayıcılarda ve interferometrelerde, dinamometrelerde, sismograflarda, basınç dönüştürücülerinde, kuvvet ölçerlerde, ciroskoplarda ve diğer pek çok hassas ölçüm cihazlarında kullanılmaktadır [1-10].

Doğru ölçüm, kullanılan cihaz ve malzemelerin uygun bir şekilde seçilmiş olmasına bağlıdır. Genel olarak mekanik alanında yapılan ölçümlerde, metallerin elastiklik özelliği yaygın şekilde kullanılmaktadır. Malzemelerin elastik davranışını etkileyen en önemli parametrelerden birisi iç yapısal özellikleridir. Uygun ısıl ve mekanik işlemlerle elastiklik davranışı iyileştirilmiş malzemelerin kullanıldığı cihazlarda yüksek doğruluklu ölçümler yapılabilmektedir. Bu nedenle, ölçüm teknolojilerinde ve elastiklik özelliğinin kullanıldığı esnek elemanlı sistemlerde kullanılacak malzemelerin uygun şartlarda teste tabi tutulması gerekmektedir. Bu testler, üretilen ölçme elemanı veya kullanılan sistem üzerinde yapılabileceği gibi, özel tasarlanmış düzenek ve cihazlarda da gerçekleştirebilmektedir. Bazı durumlarda malzemenin bir cihaz veya sisteme dönüşmeden test edilmesi zorunlu olabilmektedir. Maliyetler açısından düşünüldüğünde, cihaz veya sistem imalatı öncesi performanslarını etkileyecek malzemelerin uygun seçilmesi etkili olacaktır. Hassas ölçme cihazları ve esnek elemanların malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmalarının yapılabilmesi için özel tasarlanmış düzenek ve sistemlere ihtiyaç vardır.

Esnek elemanlı mekanizma, içerisinde rijit bir gövdeye sahip elastik eleman içeren ve uygulanan kuvvete göre geometrik olarak tanımlanabilen bir hareket üreten sistemlerdir. Bu tür sistemlerin avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır [2,10].

Avantajları;

1. Uygulanması, geometrisi, biçimleri basittir ve imalatları çok pahalı değildir.
2. Yorulmaya bağlı kırılma olmadıkça esnek elemanlar, geri dönülebilir deformasyonlara maruz kalır ve herhangi bir aşınma hasarı da söz konusu değildir. Dolayısıyla aşınmasız ve sürtünmesiz sistemlerdir.
3. Tüm mekanizma tek bir parça olarak (yekpare) imal edilebilir.
4. Mekaniksel kuvvet iletimini kolayca yerine getirirler.
5. Yer değiştirmeler düzgün ve devamlıdır. Ortaya çıkan hareketler hesap edilebilir ve tekrarlanabilirdir.
6. Hasara uğrama mekanizmaları yorulma ve kırılma gibi bilinen türdendir.
7. Sıcaklık değişimlerinden ve mekanik titreşimlerden etkilenmeyecek şekilde tasarlanabilirler.
8. Küçük şekil değişimleri için uygulanan kuvvet ile yer değiştirme arasında doğrusal bir ilişki vardır. Elastik yer değiştirmeler imalat toleransından etkilenmezler.

Dezavantajları;

1. Kuvvet-yer değiştirme karakteristiğinin çok iyi hesap edilmesi, elastiklik modülünün ve geometrik/boyutsal ölçülerin doğru şekilde elde edilmesiyle ilişkilidir.
2. Malzemelerin çoğunda, yüksek gerilmelerde (elastik bölgede) yükün uygulanması ve kaldırılması sırasında ortaya çıkan gerilme-şekil değiştirme eğrisinde histerisiz etkisi görülür. Bu etkinin en aza indirilmesi için esnek eleman malzemesinin iyi seçilmesi gerekmektedir.
3. Esnek elemanların hareket alanı boyutlarına ve rijitliklerine göre sınırlıdır.
4. Klasik sürtünmeli yataklama sistemleriyle karşılaştırıldığında, çalışma ekseni dışındaki yüklemelerde rijitlik değeri göreceli düşük, tahrik yönünde ise yüksek değerdedir.

5. Yüksek yükleri karşılayamazlar.
6. Kazayla aşırı yüklemelerde geri dönülmez sonuçlarla karşılaşılabilir veya bu olmasa bile yorulma ömrü büyük oranda azalır.
7. Yüksek yüklerde birden fazla gerilme durumu (eğilme, burkulma vb.) ortaya çıkabilmektedir.

Malzemelerde iç sürtünmeden kaynaklanan zamana bağlı elastik davranış, anelastiklik ile açıklanmış ve malzemeye etkiyen gerilmeden termomekanik işlemlere kadar malzemeyi karakterize eden değişik özelliklerinin bir sonucu olduğu ortaya konulmuştur. Genel olarak bu tür etkiler, malzemede ideal elastik davranışa göre gecikmiş bir cevaba neden olmaktadır. Sönümlemenin bu formu, karmaşık sayı formunda yazılan elastiklik modülünün frekans alanında ifade edilmesi olarak tanımlanabilir. Karmaşık sayı olarak ifade edilen elastiklik modülünün gerçel kısmı fazdaki yerine getirme kuvvetini, sanal kısmı ise (gerçel kısma göre karşılaştırıldığında çok küçük) quadratik formda faz sönümleme kuvvetini vermektedir. Esnek elemanların kullanımında, diğer tüm mekanik tasarımlarda olduğu gibi malzemenin elastik ve anelastik davranışı metroloji açısından çok önemlidir. Metalik malzemeler elastik bölgede belirli bir gerilme değerinin üzerinde anelastik davranış gösterir. Anelastik davranış zamana bağlı doğrusal bir davranıştır ve bu tür malzemelerin özellikle hassas ölçüm cihazlarda kullanımında doğruluğa etki eden en önemli parametrelerden biridir. Elastik bölgede malzemenin elastiklik modülü yani gerilme-şekil değişimi doğrusunun eğimi sabit değil değişkendir. Gerilme yüklemesi ve boşaltması sırasında ise gerilme-şekil değişimi döngüleri oluşur. Bu döngüler anelastik sınırına kadar kapalıdır, yani yük ortadan kalktığında malzeme hemen eski haline döner [11-13].

Malzemenin farklı gerilme seviyelerindeki elastiklik modül değerleri arasındaki fark modül kaybını (veya hatasını) vermektedir. Modül kaybı, gerilme altında malzemenin iç sürtünmelerinin bir göstergesidir. Malzemelere uygulanan gerilmeye bağlı olarak modül hatası yani modül kayıpları artmaktadır [14,15]. Esnek elemanların kullanıldığı ölçüm bilimi (metroloji) alanı göz önüne alındığında, bu kayıpların seviyesi önemli bir parametre olmaktadır. Ölçüm doğruluğunun çok önemli olduğu Metroloji'de, gerilme altında malzemenin mümkün olduğu kadar az modül kaybına sahip olması istenir. Metroloji'de yükleme ile yükün boşalması

arasında ortaya çıkan histerisiz hatası, bu modül kaybıyla alakalıdır. Sensör elemanı olarak imal edilecek malzemelere, modül kayıpları en düşük seviyede olacak şekilde iç yapı özellikleri kazandırılmalıdır.

Malzemelerde, elastiklik modülünün artan gerilme ile bir miktar azalmasının bir nedeni olarak, artan kuvvet ile malzeme atomları arasındaki mesafesinin değişimi dolayısıyla bu mesafe ile elastiklik modülü arasındaki ilişki gösterilmektedir [16]. Elastiklik modülündeki bu değişimin demir-karbon alaşımlarında, çözünmüş karbon atomlarının kafes içerisinde bazı arayer noktalarına hareket etmesinin bir sonucu olduğu belirtilmiştir [16,17]. Bazı çalışmalarda, şekil değişimlerinin elastik bir karakterde olmasına karşın, malzemede gevşemeye yol açan mikroplastik şekil değişimi mekanizmalarının modül kaybına katkısının olabileceği de değerlendirilmiştir [16-18].

Esnek elemanların eğilme momenti altında iç sürtünme ve hareket kayıplarının histerisiz hatasına neden olması konusundaki ilk çalışmaları Eastman 1937'de yapmıştır [1]. 1969'da Weinstein malzemelerin uzun dönem kararlılıklarını, histerisiz hatasına ve buna etkiyen iç gerilmeler nedeniyle ortaya çıkan gevşeme ve malzemelerin mikro şekil değişimlerini incelemiştir [19]. 1980'de Alexopoulos ve arkadaşları bazı metaller için statik çekme deneyi ile gerilme-şekil değiştirme eğrilerini elde ederek anelastik modül değerlerini bulmuştur [13].

Esnek elemanların hassas ölçme cihazlarında uygulaması ve etkilerini incelenmesi konusunda ilk çalışmaları Quinn ve arkadaşları 1986'da yapmıştır. Bakır berilyum (Cu-Be) malzemeden imal edilmiş teller kullanılarak kütlelerin eş kollu bir teraziye asılması durumunda, ortaya çıkan frekans bağımlı sönümleme incelenmiştir. Bu çalışmada rezonans frekansı düşürülerek eş kollu terazinin duyarlılığının arttırılması ve böylece çok hassas bir ölçüm cihazının elde edilmesi amaçlanmıştır [20]. Yine aynı araştırmacı ve arkadaşları 1992'de, Cu-Be malzemesinin iç yapısal özelliklerinin ölçülen büyüklüğe etkisini incelemek için (anelastiklikden dolayı) birleşik tip özel bir sarkaç sistemi yapmıştır [18]. 1993 yılında Saulson, ters sarkacın bir elastik elemanla zemine bağlanmasıyla iyi bir anelastiklik ölçüm cihazı olabileceğini göstermiştir. Böylece, elastik elemanın anelastik davranışının doğrudan ters sarkaçla ölçülebileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada hazır tip çelik malzemeden bir esnek eleman kullanılarak Quinn ve arkadaşlarının bulduğu sonuçlara benzer sönümleme sonuçları elde edilmiştir [21]. 1995'te yine Quinn ve arkadaşları, Cu-Be

malzemesinin gerilme bağımlı sönümlemesi üzerine sistematik çalışmalar yapmışlardır. Bu amaçla farklı tip esnek elemanlar değişik tip torsiyonel sarkaçlarda test edilmiştir. Aynı çalışmada, geniş ve ince bir dönel esnek elemanın yerine getirme momentinin yükten bağımsız olduğu kaydedilmiştir [14].

1995'te Sgobba, farklı yüzey durumlarının anelastik gevşemeye etkilerini incelemiştir. Ayrıca hem yüzey tabakasının hem de ana malzemenin anelastik ve elastik özelliklerini açıklamıştır. Bu çalışmada, Al ve Cu malzemeler ısıl işlem sıcaklıkları ve bu sıcaklıklarda tutma süresinin bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar çökelti serbest bölgesi, çökeltilerin boyutu ve yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak verilmiştir [22-23].

1996'da Yuki ve arkadaşları, anelastikliğin ölçümü için Cu-Be malzemeden elemanların kullanıldığı düşük frekanslarda çalışan (0.03 Hz - 0.5 Hz) bir x-sarkaçta (çapraz formda) ölçümler yapmış ve daha önce Quinn ve arkadaşların elde ettiği sonuçlara benzer sonuçlar elde etmiştir [24]. 1997'de Quinn ve arkadaşları, çekme gerilmesi altındaki dönel elemanlar üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada [15]'de elde ettikleri sonucun aksine, artan yükle doğrusal olarak elastik modül hatalarının değiştiğini (artış yününde) gözlemlemişlerdir [15]. 1999'da Speak ve arkadaşları anelastiklik ve ölçümü konusunda gelişmeleri anlatan bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada sundukları bir dislokasyon hareketi modelinin Cu-Be malzemede gözlemlenen davranışı açıklayabileceğini ifade etmişlerdir [25]. Bir başka çalışmada, elastik davranışı ve diğer üstün özellikleri nedeniyle uzun yıllardır çok farklı alanlarda özellikle de Metroloji'de yaygın kullanımı olan Cu-Be malzemesi incelenmiştir [26,27].

Çökeltme sertleştirilmesi uygulanabilen demirdışı Cu-Be alaşımı gösterdiği iyi elastik davranışı nedeniyle özellikle sensör imalatında duyar eleman olarak kullanılmaktadır. Hassas ölçme cihazlarında, kuvvet ileten elastik eleman olarak veya iletkenliği ve manyetik olmayışı nedeniyle de yerçekimi uygulamalarında algılayıcı eleman olarak kullanılmaktadır. Cu-Be malzemesinin elastik davranışını, ısıl işlemi sonrasında oluşan çökeltilerin malzeme içerisindeki büyüklüğü, geometrisi ve dağılımı etkilemektedir. Bu etki, özellikle hassas ölçümlerin yapıldığı sistemlerde hatalara neden olabilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda Cu-Be malzemesi incelenmiş [14,15,18,20,24,25] ortaya çıkan anelastik davranış farklı ölçüm

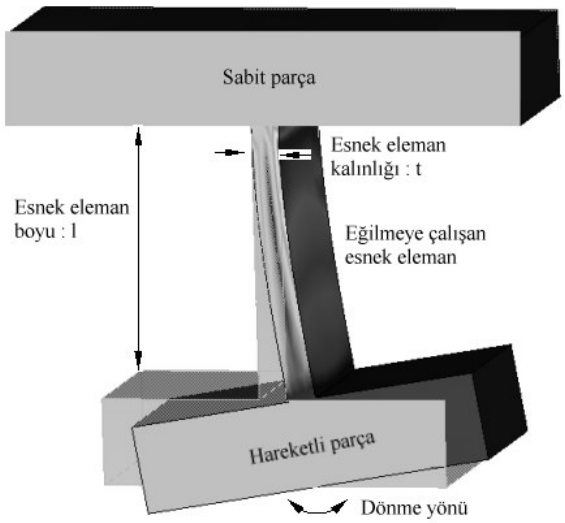
teknikleri ve cihazları kullanılarak ortaya konulmaya çalışılmıştır [8,11-15,17-21,24,25,28].

Yukarıda özetlenen konuyla ilgili önceki çalışmalarda, Cu-Be malzemesinin özellikle çökeltme sertleştirmesi ile ortaya çıkan farklı iç yapı özelliklerinin anelastik davranışına etkisi incelenmemiştir. Bu çalışma ile, farklı çökelti ve iç yapı özelliklerinin Cu-Be malzemesinin anelastik özelliklerine etkisi incelenmiş, ayrıca bu çalışmada yapılan anelastiklik ölçümler [21]'de önerilen çalışma prensibiyle aynı fakat yükleme şartları farklı, tamamen yeni bir cihaz olarak tasarlanan mekanik ve optik elemanlara sahip ölçme sistemiyle yapılmıştır [29]. Bu şekilde, esnek eleman malzemelerinin dinamik olarak test edilebilecekleri, yeterli doğrulukta çalışabilen, taşınabilir ve uygun maliyette bir cihazın ortaya konulması amaçlanmıştır. Kurulan düzenekte, tüm metalik malzemeler 2-30 s aralığında dinamik kuvvet etkisinde teste tabi tutularak malzemelerin bu frekans aralığında davranışı incelenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, Cu-Be alaşımından elde edilen farklı mekanik ve iç yapısal özelliklere sahip esnek elemanların davranışı incelenerek, anelastikliğe etki eden önemli parametreler ortaya konulmaya çalışılmıştır. Farklı sertlik ve akma sınırlarına sahip esnek elemanlar ile dislokasyon yoğunluğunun malzemenin elastik davranışına etkileri araştırılmıştır.

Bu çalışma ile, hassas ölçüm ve cihazlarda kullanılan metalik malzemelerin dinamik olarak test edilebileceği bir düzenek ve ölçüm sistemi kurularak Cu-Be alaşımlarının çökelti tipleri ve iç yapıdaki dislokasyon yoğunluğunun anelastik özelliğine etkileri araştırılmıştır. Yaygın şekilde kullanılan Cu-Be alaşımının anelastik davranışının daha da iyileştirilebilmesi için çeşitli ısıl işlemler denenmiş ve daha önce bu malzeme için elde edilen sonuçlar yeni kurulan düzenekle de teyit edilmiştir [29].

2. ESNEK ELEMANLAR

Esnek elemanlar, bağlı olduğu sisteme uygulanan kuvvete karşılık, malzemenin elastik cevabıyla tekrar eski konumuna gelirler. Bir yay elemanı gibi düşünülebilecek esnek eleman, birbirine bağlanmış iki parçadan hareketli olanının, uygulanan kuvvetin ortadan kalkmasıyla tekrar eski konumlarına getirilmesi amacıyla kullanılırlar. Şekil 2.1'de esnek eleman, tek serbestlik derecesine sahip bir sistemde sabit platformla hareketli kolun birbirine bağlanmasında kullanılmıştır [1,2,6,10].



Şekil 2.1.Tek serbestlik derecesine sahip esnek elemanlı sistem [1]

Esnek elemanların farklı uygulamalar için değişik tipleri vardır; yaprak tip yaylar, çentikli olanlar ya da çapraz elemanlar gibi. Bu elemanlar cihaz veya bir mekanizmada uygulanan kuvvete karşı bilinen (hesap edilebilen) bir hareket göstermesi nedeniyle kullanılmaktadır. Esnek eleman kullanımının ana amacı; uygulanan gerilmeye karşın hassas bir yer değişiminin gerçekleştirilmesi veya tam tersi, bilenen bir yer değiştirmeye karşın ortaya çıkan kuvvetin hassas bir şekilde bilinmesidir. Esnek eleman türlerinin birbirine göre üstün ve sınırlı oldukları yanları vardır. Esnek elemanlarını kullanımında, uygulanan yükleri karşılama şeklinden

rijitliğine ve imalatına kadar bir çok faktör etkilidir. Tüm bu elemanlar genelde tek bir serbestlik derecesinde kullanılmaktadır [2].

Esnek elemanın maruz kaldığı gerilme durumlarına göre rijitlikleri değişmektedir. Basma gerilmesi altında rijitlikleri büyük oranda düşmektedir. Aksine çekme gerilmesi altında da rijitlikleri büyümektedir (Denklem (2.1)'in gereği). Şekil 2.1'deki sistem incelendiğinde Denklem (2.1)'deki rijitlik ifadeleri elde edilir [1,2,10].

$k_\theta = M/\theta = EI/L$; F=0 olmak üzere;

$$M/\theta = \sqrt{EIF}\cot(L\sqrt{F/EI}) \text{ ; F : Basma kuvveti} \qquad (2.1)$$

$M/\theta = \sqrt{EIF}\coth(L\sqrt{F/EI})$; F : Çekme kuvveti

Esnek elemanın yüzeyinin taşıyabileceği gerilme σ_{maks}, elastiklik modülü E, kalınlığı t ve boyu L olmak üzere maksimum sapma açısı θ_{maks}, Denklem (2.2)'de olduğu şekilde elde edilir [10].

$$\theta = \frac{2L\sigma_{maks}}{Et} \qquad (2.2)$$

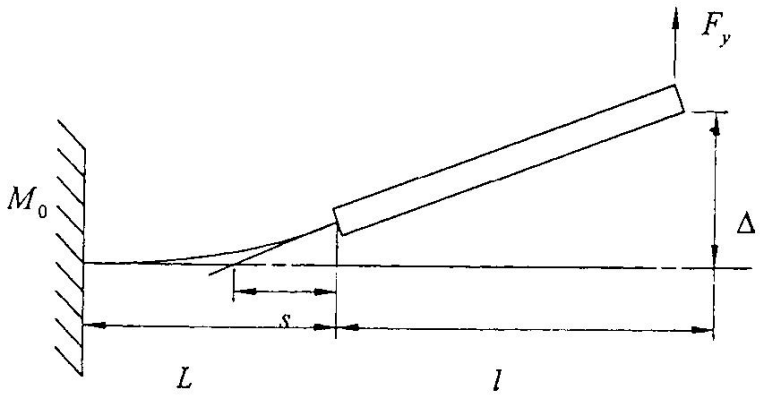
2.1. Esnek Eleman Türleri

Farklı uygulamalar için değişik esnek eleman türleri kullanılmıştır. Bu esnek eleman türlerinin birbirlerine göre üstün ve eksik yanları bulunmaktadır. Esnek eleman türüne göre, ortaya çıkan rijitlik ve yer değiştirme büyüklüklerinin bağıntıları da değişiklik göstermektedir [2].

2.1.1 Yaprak Tipi Elemanlar

Bu tip esnek elemanlar, imalatının ve montajının kolay olması nedeniyle tercih edilmektedir. Yaprak tip esnek eleman, 2 rijit elemana bağlanarak veya yekpare şekilde imal edilmek suretiyle mekanizmalarda kullanılırlar. Bu tür elemanlar bir çok hassas cihazda kullanılır [2].

Şekil 2.2'de yaprak tip esnek elemana teğetsel kuvvetlerin birlikte etki ettiği model gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Eğilme altındaki elastik elemanın matematik modeli [2]

Bu mekanizmada rijit ucun sapması Δ, Denklem (2.3)'de yazıldığı şekilde ifade edilir. Burada F_y yatay kuvveti göstermektedir.

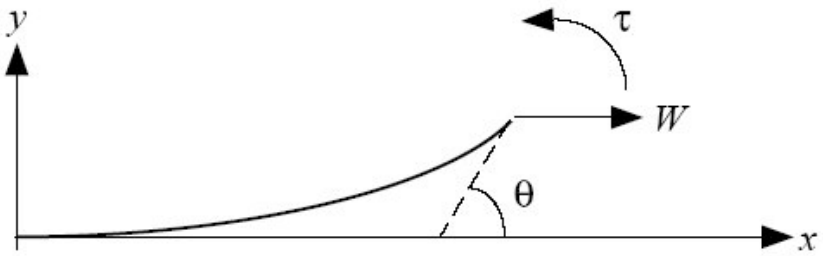
$$\Delta_y = F_y \frac{L(l^2 + Ll + L^2/3)}{EI} \tag{2.3}$$

Efektif moment noktası s ise;

$$s = \frac{Ll + 2L^2/3)}{L + 2l} \tag{2.4}$$

olarak verilir.

Çekme gerilmesi altında eğilmeye maruz bir esnek eleman için model Şekil 2.3'de verilmiştir. Burada W=m.g'dir.



Şekil 2.3. Çekme gerilmesi altında eğilmeye çalışan bir elemanın matematik modeli [2,14]

Burada, eğilme momentiyle (τ) θ açısı yapan bir esnek elemanın rijitliği Denklem (2.5)'deki şekilde verilebilir.

$$\theta = \frac{\alpha \tanh(\alpha.L_f)}{W}\tau \tag{2.5}$$

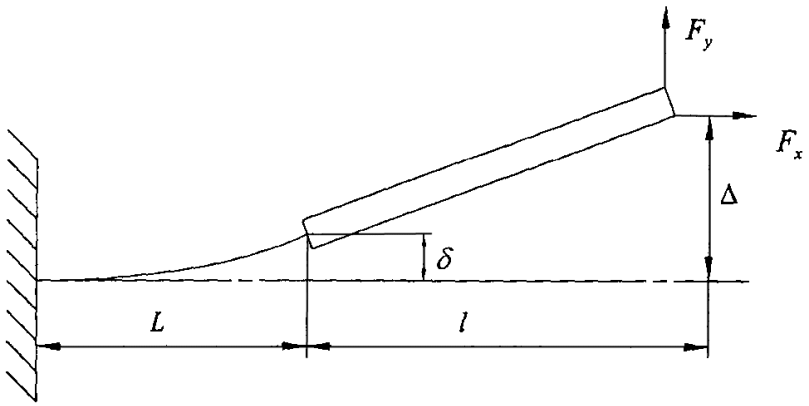
Bu denklemde α, (2.6) bağıntısıyla verilir.

$$\alpha = \sqrt{\frac{W}{EI_{kesit}}} \tag{2.6}$$

Rijitlik ise (2.7)'deki gibi yazılır.

$$k = \sqrt{WE.I_{kesit}\coth\left(L_f.\alpha\right)} \tag{2.7}$$

Başka bir yükleme durumunda, esnek eleman bir ucundan rijit bir çubuğa bağlanmıştır. Rijit çubuğun diğer ucu ise serbest ve teğetsel hem de eksenel kuvvetlere maruzdur. Eksenel kuvvetin basma veya çekme olması durumuna göre iki farklı modelden bahsedilebilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Teğetsel (F_y) ve çekme kuvvetinin (F_x) birlikte etki ettiği esnek eleman modeli [2]

Şekil 2.4'deki gösterime göre; y'yi düşey x de yatay eksen alınırsa, rijit çubuğun serbest ucunun yer değiştirmesi (2.8) bağıntısıyla ifade edilir.

$$\Delta = \frac{F_y}{F_x}\frac{L+l}{1+C_1} \tag{2.8}$$

Burada C_1;

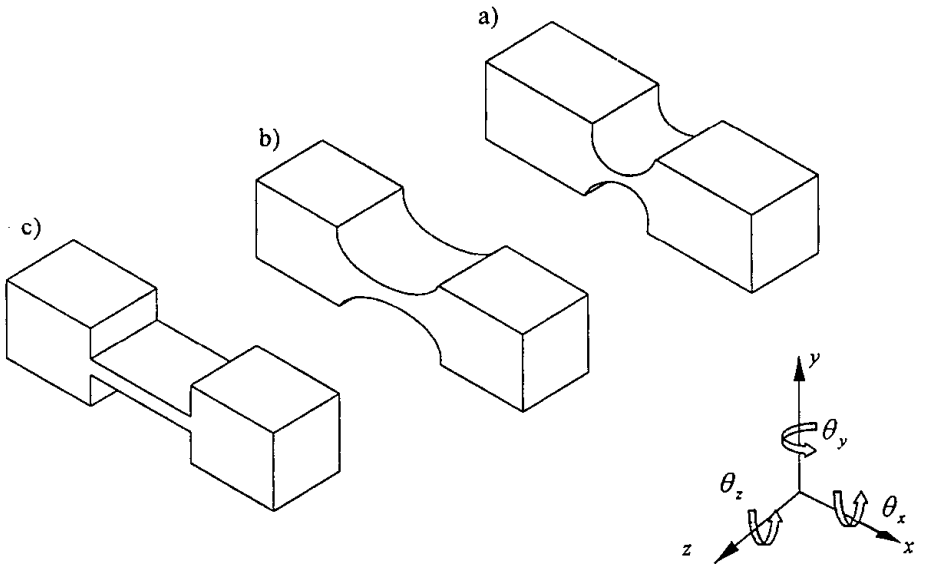
$$C_1 = \frac{M_z}{F_x \Delta} = \frac{\omega \coth(\omega) + \frac{L}{l}}{(\omega)^2 (1 + \frac{l}{L}) + \frac{L}{l}(\omega \coth(\omega) - 1)} \tag{2.9}$$

ve $\omega = L\sqrt{\frac{F_x}{EI}}$ olarak verilir. Efektif pivot noktası s ise (Şekil 2.2'de gösterilmiştir);

$$s = \frac{1}{C_1 \frac{\omega}{L} \sinh(\omega) - \left(\frac{1 + C_1}{L + l}\right)(\cosh(\omega) - 1)} - l \tag{2.10}$$

2.1.2. Çentikli Elemanlar

Yaprak tip esnek elemanlardan sonra en yaygın kullanılanlar, çentik şeklinde farklı geometrilerde şekil verilmiş elastik elemanlardır. Daha çok yekpare şekilde imal edilirler. Şekil 2.5'de bu gruba ait farklı tasarımlar verilmiştir [2].



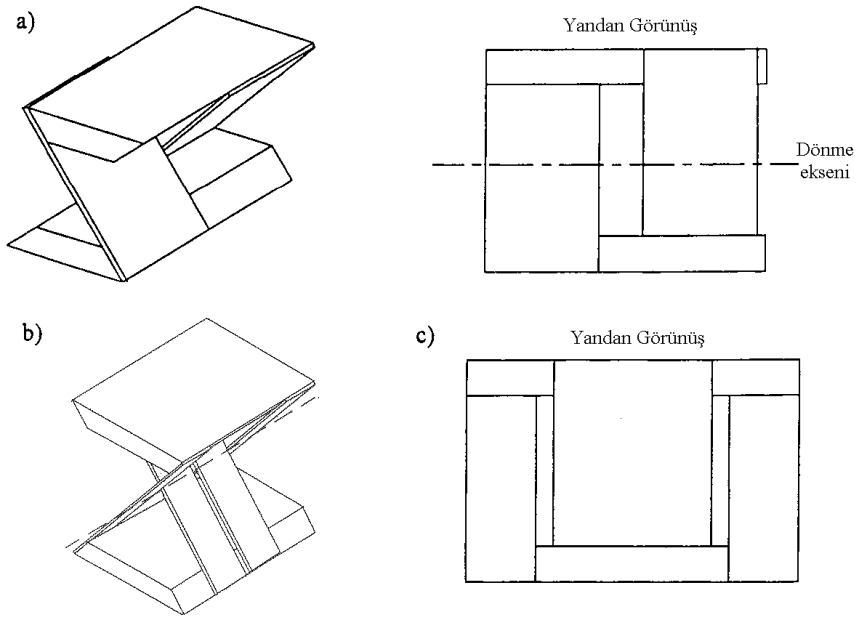
Şekil 2.5. Çentik türüne göre; (a) dairesel, (b) eliptik, (c) yaprak tür esnek elemanlar [2,10]

Genel olarak esnek elemanların çoğunluğu iki genel gruba ayrılabilir. Bunlar çentikli olanlar ve yaprak tip olanlardır. Bir elemana birbirine yakın iki adet delik delinmek suretiyle kolayca dairesel çentikli bir esnek eleman elde edilebilir (Şekil 2.5a). Yaprak tip olanlar, kalınlığı yeterince ince elastik elemanlar iki tarafından rijit bir

şekilde bağlanılarak elde edilirler (Şekil 2.5c). Bunlar doğrudan yekpare olarak da imal edilebilirler. Bu tür elemanların çalışması sırasında maksimum gerilmeler bölgesel olarak bu inceltilmiş kısımlarda ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle dönme ekseninin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Çentikli elemanlarda inceltilen kısım, esnek elemanın fazlaca deformasyonuna izin vermez, yani elastik bölgede çok büyük şekil değişimleri bu tür sistemlerde mümkün değildir. Yaprak türlerde ise maksimum gerilme inceltilmiş levha (elastik eleman) boyunca dağıldığından çentikli olana göre gerilme seviyesi daha düşüktür ve daha fazla deformasyona izin verebilirler. Bu tür sistemlerde efektif pivot noktası sabit bir nokta değil, uygulanan gerilme nedeniyle ortaya çıkan deformasyonla değişmektedir [2].

2.1.3. Diğer Tipler

Çentikli tip elastik elemanlar, göreceli basit elemanlar olmasına karşın düşük elastik deformasyon özellikleri nedeniyle kısıtlı bir davranış gösterirler. Bu sorunu gidermek için eskiden beri çapraz tip elastik elemanlar kullanılmaktadır. Sistem, iki ya da daha fazla düzlemsel elemanın birbirlerine çapraz şekilde belirli bir açıyla (normalde 90^{o}'dir) bağlanmasıyla elde edilir [2].



Şekil 2.6. Çapraz elastik elemanlar: a) Basit iki elastik elemanlı, b) Simetrik dört yaprak tip elemanlı, c) Simetrik üç yaprak tip elemanlı (merkezdeki elemanın genişliği diğer ikisinin toplamı kadar) [2,10]

Şekil 2.6a'da görülen sistem bu grubun en basit olanıdır. Bu sistem, eşit boydaki iki adet esnek eleman bağlanarak elde edilmiştir. Bir çok uygulama için uygun ve kolay bir çözüm olmasına karşın düşey yöndeki dönel rijitliğinin kötü olması bir dezavantajdır. Düşey eksene göre simetrik olan Şekil 2.6b'de sistem daha kullanışlıdır. İki esnek eleman çifti kullanılarak elde edilmiştir. Her biri diğerinin ucuna bağlanmış ve paraleldir. Şekil 2.6c'de merkezde diğer ikisinin genişliğinin toplamına eşit bir genişlikte üçüncü bir eleman kullanılmıştır [2,10].

2.2. Esnek Elemanların İmalat Yöntemleri

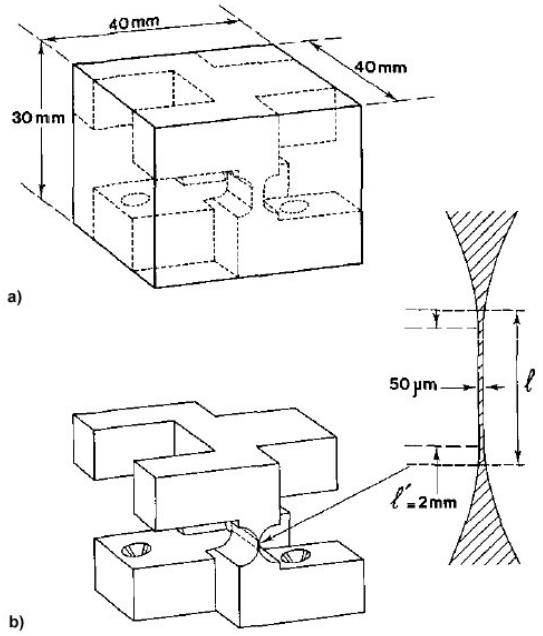
Esnek elemanların imalatında klasik imalat yöntemlerinden olan talaşlı imalat teknikleriyle, kaynak ve yapıştırma gibi teknolojiler yaygın şekilde kullanılmaktadır. Göreceli daha küçük geometriye sahip olanlarının imalatında ise, çok daha özel imalat teknolojilerinin kullanılması gerekmektedir. Özellikle yekpare olarak imal edilecek olan esnek elemanlar için uygun bir imalat tekniğinin seçimi önemlidir. Genel olarak bu tür elemanların imalatında aşağıda sıralanan teknolojiler yaygın şekilde kullanılmaktadır [2,30].

- Klasik imalat teknolojileri (Talaşlı imalat)
- Elektro-Erozyonla İmalat (tel ve dalma olmak üzere)
- Litografik dağlama (kimyasal işlemlerle)
- Elektro-kaplama (veya şekil verme)
- Aşındırma yöntemi

Çentikli tip esnek elemanların imalatı klasik imalat teknolojileriyle kolaydır. İstenilen çapta iki deliğin esnek elemanın kalınlığını verecek şekilde delinmesiyle dairesel tip esnek eleman elde edilmiş olur. Bu tür bir esnek eleman imalatında ilk deliğin delinmesinde herhangi bir sorun ortaya çıkarmamasına karşın, ikinci deliğin delinmesi sırasında inceltilmiş kısmın hasara uğramasına veya çarpılmasına neden olunabilir. Bu olumsuzluğu önlemek için, ilk deliğin delinmesinden sonra bu deliğin bir tespit pimiyle desteklenmesi gerekmektedir. Dairesel olmayan çentikler için benzer şekilde ilk delinen kısmın özel bir aparatla desteklenmesi gerekmektedir. Bu çözüme alternatif olarak, ilk açılan cebin doldurması işlemi verilebilir. Bu tür doldurma işlemlerinde balmumu, soğutuluncaya kadar temasa geçmeyen düşük

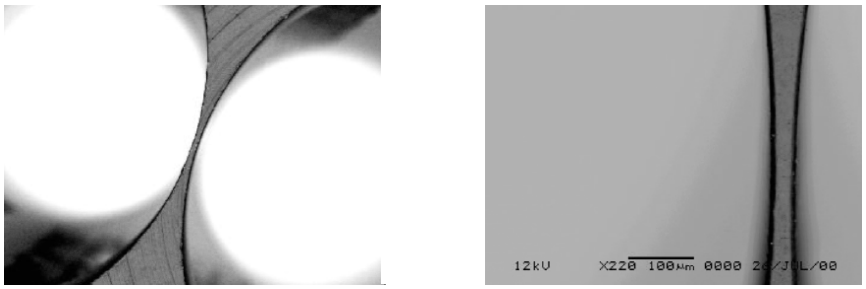
sıcaklık metalleri, iki elemanlı reçineler ve lehimler kullanılabilir. Bu yöntemlerin kötü tarafı esnek eleman malzemesinin ısıtılacak olmasıdır. Burada uygulanan sıcaklık ve esnek eleman malzemesinin türü çok önemli parametrelerdir. Alternatif olarak; oda sıcaklığında kullanılabilecek reçineler uygun bir çözüm olarak verilebilir [2,30].

BIPM'deki NBS-2 adlı, 1 kg ağırlıkların çok hassas ölçümlerinin yapılabildiği kütle komparatörünün esnek elemanları (Şekil 2.7) çözeltiye alınmadan önce klasik imalat teknolojileriyle Şekil 2.17a'daki duruma getirilmiştir. Isıl işlemenin ardından, elmas bir takımla işlendikten sonra alumina taş kullanılarak aşındırma yöntemiyle son haline getirilmiştir [4,15,18,20].



Şekil 2.7. BIPM NBS-2 Kütle komparatörü esnek elemanı;
a) Isıl işlem öncesi, b) Aşındırma işlemi sonrası son hali [4]

Yerçekimi deneylerinde kullanılmak üzere, Amerika'daki Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü (Caltech) ve M.I.T (Massachusetts Institute of Technology) tarafından yürütülen LIGO projesi kapsamında tasarlanmış başka bir cihazda, Şekil 2.8'de resimleri verilen esnek elemanlar imal edilmiştir. Şekil 2.8a'da görülen eleman, tel elektro erozyon tekniği ile 50 µm kalınlıkta elde edildikten sonra elektro-parlatma ile son boyutuna (30 µm) getirilmiştir [5].



a) b)

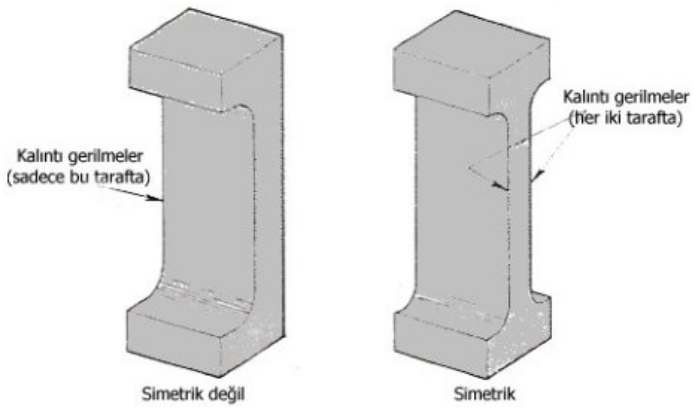
Şekil 2.8. Hassas yerçekimi deneyleri için kullanılan cihazın esnek elemanı;
a) Tel erozyon ile imalatı sonrası elektron mikroskobu fotoğrafı
b) Elektro-parlatma sonrası hali [5]

2.3. Esnek Elemanların Tasarım Kriterleri

Esnek eleman tasarımının ve kullanımının temel amacı; uygulanan kuvvet veya momente karşılık ortaya çıkan şekil değişimlerinin her zaman "tekrarlanabilir" ve "kararlı" olmasıdır. Bu amaca ulaşmak için esnek eleman malzemesinin uygun şekilde seçilmesi sonra da uygulamaya yönelik bir tasarımın yapılmasına bağlıdır [2,4,6,16,17]. İyi bir esnek eleman tasarımı için üç ana parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Bunlar; malzeme tipi ile iç yapı özellikleri (ısıl işleme bağlı malzemenin iç yapı özellikleri, anelastik sınırı vb), yüzey durumu ve parça geometrisidir [16-20,22,23]. Esnek elemanın kesit geometrisi de etkili bir parametredir. Aynı alana sahip dikdörtgen kesitli bir esnek eleman, yuvarlak kesitli olana oranla daha duyarlıdır. Bunun nedeni; bu tür eğilmeye maruz dikdörtgen kesitli esnek elemanların dairesel kesitli olanlara oranla daha duyarlı olmalarıdır. Dikdörtgen kesitli bir esnek elemanda $b/t=2(G/\sigma)^{1/2}$ iken (burada G kayma modülüdür), aynı şartlarda dairesel kesitli elemanda $b/t=(3/2\pi)(G/\sigma)^{1/2}$'dır (burada b, esnek elemanın genişliği t ise kalınlığıdır). Bu oranın yüksek olması duyarlılığı arttırmaktadır [15].

Esnek elemanlar kullanıldıkları hassas mekanizma ve ölçüm alanları düşünüldüğünde tek parça (yekpare) olarak imal edilmesi uygun olacaktır. Böylelikle, birbirine bağlı iki parçanın kuvvet altında istenildiği şekilde elastik, kuvvet kaldırıldığında ise tek parça gibi davranması sağlanmış olur. Tek parça imalatı ve/veya kullanımı uygun olmayan durumlarda ise esnek elemanın montajının dikkatlice yapılması gerekmektedir [6]. Esnek elemanın simetrik tasarımı her iki

yüzeyde işlemeden dolayı meydana gelebilecek artık gerilmelerin etkilerinin birbirince karşılanmasına neden olacaktır. Şekil 2.9'da buna örnek bir tasarım gösterilmiştir [19].



Şekil 2.9. Simetrik tasarımın etkisi [19]

Esnek elemanın tasarımında keskin köşelerden kaçınmak gerekmektedir. Ayrıca esnek elemanların basma gerilmesi altında rijitlikleri düşüktür dolayısıyla bu tür uygulamalarda kullanımından mümkün olduğunca kaçınılmalıdır [6].

Esnek elemanlar uygun gerilme aralıklarında kullanılmalıdır. Elastik sınır içerisinde ama anelastik sınır üstündeki gerilmelerde yükün kaldırılmasıyla zamana bağlı elastik davranış görülür. Bu nedenle genel bir değerlendirme olarak; esnek elemanların maruz kalacağı gerilme seviyeleri, anelastikliğin görülmeye başladığı sınırın % (10-30)'unu geçmemelidir (bu bölge tamamen elastik sınır içerisindedir). Malzeme tipine ve uygulanan ısıl işleme göre anelastik sınırı değişebilir. Bu tür malzemelerin kullanıldığı sistemlerde, esnek elemanın maruz kalacağı elastik şekil değişiminin kontrolü için mekanik durdurucu ilave mekanizmalar kullanılabilir. Bu şekilde esnek elemanın kalıcı bir hasara uğraması önlenmiş olur. Elemanın maruz kalacağı gerilme seviyesi ile ilgili diğer bir genel kural; eğilme yarıçapının esnek eleman kalınlığının 300 katından küçük olmasının gerekliliğidir [6,13].

2.4. Esnek Elemanların Malzemesi

Esnek elemanların genel uygulamalarında özel çelik alaşımlarından hassas bir şekilde imal edilen parçalar kullanılmaktadır. Uygulanan kuvvete göre farklı esnek

eleman malzemeleri kullanılabilir. Tablo 2.1'de esnek eleman malzemesi olarak kullanılan malzemelerin genel bir listesi ve elastiklik modülleri verilmiştir [1,2,6,10].

Tablo 2.1 Esnek elemanların imal edildikleri malzemeler ve elastik modülleri [1,2,6,10]

Malzeme	E [GPa]
Karbonlu çelikler	210
Paslanmaz çelikler	186
Pirinç	100
Aluminyum	70
Fosfor bronzu	105
Cu-Be	126
Nikel	200
Alman gümüşü	125
İnvar	150
Eritilmiş Silika	72.8
Kuartz Fiber	72.8
Karbon Fiber	420
Plastikler	0.7-2
Sert lastikler	1.05

Genel olarak, bir esnek elemanın elastiklik modülü ve geometrisi o elemanın rijitliğini ifade eder. Isıl işlemler ve benzer sertleştirme işlemleri malzemenin elastiklik modülünü büyük oranda değiştirmemesine karşın esnek elemanların çalışma sınırı olan anelastik sınırını değiştirebilir. Bu yüzden malzemeye uygulanacak ısıl işlemin doğru seçilmesi gerekmektedir [6].

Farklı malzemelerin özellikleri karşılaştırılarak daha sistematik bir malzeme seçimi yapılabilir. Tablo 2.2'deki malzeme özellikleri temel alınarak çeşitli özellik tabloları (Tablo 2.3) ve bu özelliklerin normalize edilmiş (birimsiz) değerleri verilmiştir (Tablo 2.4) [10].

Tablo 2.2. Malzeme özellik tabloları için temel alınan değerler [10]

Malzeme Özelliği	Değeri	Temel Alınan Malzeme
Elastiklik Modülü	200 GPa	Çelik
Maks. Dayanım	300 MPa	Çelik
Yoğunluk	4000 $kg.m^{-3}$	Seramik
Isıl Genleşme	7×10^{-6} K^{-1}	Seramik
Isıl İletim	150 $W.m^{-1}.K^{-1}$	Pirinç
Özgül Isı	7×10^{-6} $kg^{-1}.K^{-1}$	Metaller

Tablo 2.3. Bazı malzemelerin özellikleri [10]

	Elastistlik Modülü, E	**Dayanım σ**	**Yoğunluk ρ**	**Özgül Isı *C***	**Isıl İletk. Kats., *k***	**Isıl Genl. Kats., α**
Aluminyum	0.35	0.40	0.70	1.2	1.6	3.4
Berilyum	1.6	1.2	0.50	2.4	1.3	1.7
Bakır	0.65	0.80	2.2	0.50	2.6	2.4
Magnezyum	0.25	0.50	0.45	1.4	1.0	3.7
Molibden	1.6	1.5	2.6	0.35	0.90	0.70
Titanyum	0.60	2.3	1.1	0.70	0.15	1.3
Tungsten	2.1	4.5	4.8	0.20	1.1	0.65
Dökme Demir	0.75	0.70	1.8	0.70	0.35	1.6
Çelik	1.1	1.0	2.0	0.55	0.35	1.6
Yay Çeliği	1.0	2.0	2.0	0.55	0.35	1.6
Sert Çelik	1.1	3.3	2.0	0.55	0.25	1.6
Invar	0.70	1.3	2.0	0.65	0.15	0.15
18/8 Psz. Çelik	1.0	1.7	2.0	0.70	0.10	2.3
Elinvar	0.85	1.2	2.0	0.60	0.07	0.55
Prinç 70/30	0.55	1.5	2.1	0.50	0.75	2.8
Bronz 90/10	0.65	2.0	2.2	0.50	0.35	2.4
Fosf. Bronzu	0.55	1.7	2.2	0.50	0.45	2.4
Cu-Be	**0.65**	**2.5**	**2.1**	**0.45**	**0.65**	**2.4**
Duraluminyum	0.35	1.0	0.70	1.2	1.0	3.3
Silikon	0.95	0.65	0.55	0.95	1.1	0.35
Elmas	6.0	10.0	0.90	0.50	3.9	0.15
Si. Karbid	2.1	1.5	0.80	1.3	0.85	0.55
Si. Nitrid	1.6	3.3	0.80	0.75	0.20	0.50
Alumina	1.7	1.2	0.95	1.4	0.25	1.2
Zirkonya	1.0	2.7	1.4	0.65	0.02	1.5
Tung. Karbid	3.6	11.0	3.8		0.35	1.0
Erit. Silika	0.35	0.25	0.55	1.1	0.01	0.07
Erit. Kuartz	0.35	0.25	0.55	1.1	0.01	0.07
Kronlu Cam	0.35	0.25	0.65	0.95	0.01	1.1
Zerodur	0.45	0.30	0.65	1.1	0.01	0.01
Granit	0.15	0.07	0.65	1.3	0.01	1.7
(Tablo 2.2 temel alınarak hazırlanmıştır)						

Malzeme seçimi için tasarımın kullanılacağı alanın iyi belirlenmesi gerekmektedir. Örneğin; düşük çökme değerleri için yüksek elastiklik modülü, yükleme kapasitesi için yüksek dayanım (σ) değerleri veya kendi ağırlığı ile minimum çökme değerleri için elastiklik modülünün (E) yoğunluğuna (ρ) oranının (özgül modül) yüksek olması gibi. Esnek elemanın rezonans frekansı $(E/\rho)^{1/2}$ ile orantılıdır. Elastik mekanizmalar doğrusal ve küçük elastik şekil değişimlerine maruz kaldıklarından bu tür sistemlerde kullanılacak olan malzemenin düşük elastiklik modülüne (E') sahip olması iyi bir tercih olabilir. Yer değişimlerinin tekrarlanabilir olması elastik sistemlerde çok önemlidir bu yüzden, σ/E oranı yüksek malzeme grupları esnek elemanlı mekanizmalar için tercih edilir. Yüksek dönme hızları ve ivmelenmeler için σ/ρ

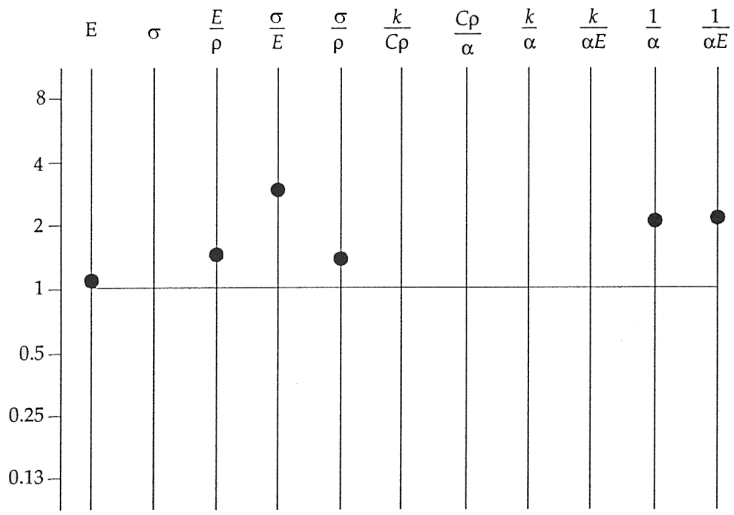
oranı yüksek seçilmelidir. Metroloji alanı düşünüldüğünde, malzemelerin sıcaklık etkilerine göre $\alpha.E$ değerinin düşük seçilmesi uygun olacaktır. Böylece sıcaklık nedeniyle malzemede ortaya çıkan gerilmeler düşecektir. Yine sıcaklık etkileri nedeniyle, elemanın bir bölümünün hareketi kısıtlanmışsa düşük α/k oranı (k;ısıl iletim katsayısı), rijit bir şekilde bağlanmışsa düşük $\alpha E/k$ seçilmelidir. Esnek elemanın sıcaklık değişimlerine hızlı cevap verebilmesi için yüksek $k/C\rho$ oranı tercih edilmelidir (C;Özgül ısı) [10].

Tablo 2.4. Bazı malzemelerin normalize edilmiş özellik grupları [10]

	E	**σ**	**E/ρ**	**σ/E**	**σ/ρ**	**k/Cρ**	**Cρ/a**	**k/α**	**k/αE**	**1 /α**	**1 /αE**
Aluminyum	0.35	0.40	0.50	1.1	0.60	1.9	0.25	0.45	1.3	0.30	0.80
Berilyum	1.6	1.2	3.4	0.70	2.5	1.2	0.65	0.80	0.50	0.60	0.35
Bakır	0.65	0.75	0.30	1.2	0.35	2.3	0.50	1.1	1.7	0.40	0.65
Magnezyum	0.25	0.50	0.50	2.2	1.2	1.7	0.15	0.25	1.2	0.25	1.2
Molibden	1.6	1.5	0.65	0.95	0.60	1.1	1.2	1.3	0.80	1.4	0.85
Titanyum	0.60	2.3	0.55	3.9	2.1	0.20	0.60	0.10	0.20	0.80	1.3
Tungsten	2.1	4.5	0.45	2.2	0.95	1.3	1.3	1.7	0.85	1.6	0.75
Dökme Demir	0.75	0.70	0.40	0.95	0.40	0.25	0.80	0.20	0.30	0.65	0.85
Çelik	1.1	1.0	0.55	0.95	0.50	0.35	0.70	0.25	0.20	0.65	0.60
Yay Çeliği	1.0	2.0	0.50	2.0	1.0	0.35	0.65	0.20	0.20	0.60	0.60
Sert Çelik	1.1	3.3	0.55	3.2	1.7	0.20	0.70	0.15	0.15	0.65	0.60
Invar	0.70	1.3	0.35	1.8	0.65	6:10	8.5	0.90	1.2	6.4	8.8
18/8 Psz. Çelik	1.0	1.7	0.50	1.6	0.85	0.07	0.60	0.04	0.04	0.45	0.45
Elinvar	0.85	1.2	0.40	1.5	0.60	0.05	2.2	0.10	0.15	1.8	2.1
Prinç 70/30	0.55	1.5	0.25	2.9	0.70	0.70	0.40	0.25	0.50	0.35	0.70
Bronz 90/10	0.65	2.0	0.30	3.1	0.90	0.30	0.45	0.15	0.20	0.40	0.65
Fosf. Bronzu	0.55	1.7	0.25	3.0	0.75	0.45	0.45	0.20	0.35	0.40	0.75
Cu-Be	**0.65**	**2.5**	**0.30**	**4.0**	**1.2**	**0.70**	**0.40**	**0.25**	**0.45**	**0.40**	**0.65**
Duraluminyum	0.35	1.0	0.50	2.7	1.4	1.2	0.25	0.30	0.80	0.30	0.85
Silikon	0.95	0.65	1.7	0.65	1.1	1.9	1.6	3.1	3.3	3.0	3.2
Elmas	6.0	10.0	6.9	1.7	11.5	8.8	2.6	23.0	3.8	5.8	0.95
Si. Karbid	2.1	1.5	2.7	0.75	1.9	0.80	1.9	1.6	0.75	1.8	0.90
Si. Nitrid	1.6	3.3	1.9	2.2	4.2	0.40	1.2	0.45	0.30	2.0	1.3
Alumina	1.7	1.2	1.7	0.70	1.2	0.15	1.1	0.20	0.10	0.85	0.50
Zirkonya	1.0	2.7	0.70	2.7	1.9	0.02	0.60	0.01	0.01	0.70	0.65
Tung. Karbid	3.6	11.0	0.95	3.1	3.0			0.35	0.10	0.95	0.25
Erit. Silika	0.35	0.25	0.65	0.65	0.45	0.02	8.5	0.20	0.55	14.0	40.0
Erit. Kuartz	0.35	0.25	0.65	0.65	0.40	0.02	8.6	0.15	0.40	14.0	40.0
Kronlu Cam	0.35	0.25	0.55	0.65	0.35	0.01	0.50	0.01	0.02	0.90	2.5
Zerodur	0.45	0.30	0.70	0.70	0.50	0.02	97.0	1.5	3.3	140.0	308.0
Granit	0.15	0.07	0.30	0.40	0.10	0.01	0.45	0.01	0.04	0.60	3.3
(Tablo 2.2 temel alınarak hazırlanmıştır)											

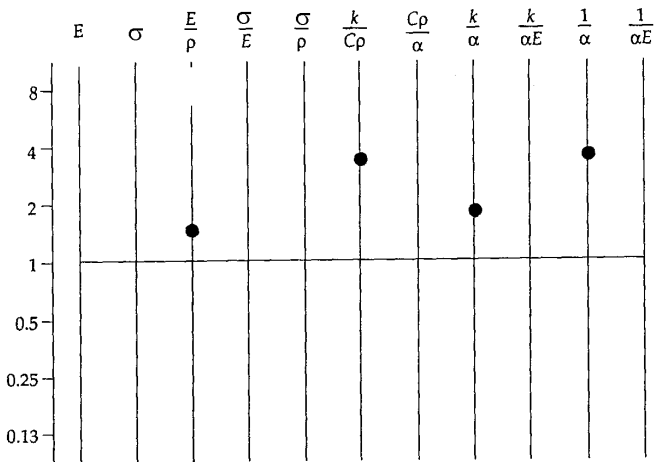
Esnek elemanlı mekanizmalarda yüksek rijitlik için, yüksek elastiklik modülü (E) ve dayanım (σ) değeri ile elde edilebilir. Elemanın ağırlığı dolayısıyla herhangi bir deformasyona maruz kalmaması için σ/ρ oranı yüksek seçilmelidir. Isıl ve çevresel

etkiler nedeniyle 1/α ve 1/αE oranları da dikkate alınmalıdır. Tüm bu tasarım kriterlerine göre, Şekil 2.10'da küçük esnek elemanlı mekanizmalar için temel bir malzeme özelliği profili oluşturulmuştur. Şekil 2.11'de ise, metrolojik açıdan malzemelerin yüksek kararlılık göstermeleri için bir profil öngörülmüştür. Burada belirli özellikler birimsiz şekilde verilmiştir. Seçilen esnek eleman malzemesinin en az bu profil kadar özellikleri sağlaması (üzerinde olması) gerekmektedir [10].



Şekil 2.10. Küçük esnek eleman mekanizmaları için malzeme özellik profili [10]

Çelik, alüminyum ve bakır alaşımları Şekil 2.10'da verilen profile göre σ/E oranı bakımından uygun malzemelerdir. Bakır berilyum (Cu-Be) ve duraluminyum malzemeleri ise σ/E oranı en yüksek olanlarıdır. Burada bakır berilyumun tüm malzeme özellikleri değerlendirildiğinde çok da bu profile uymadığı görülür. Özellikle yay, esnek eleman ve sensör teknolojisinde yaygın şekilde kullanılan bu malzemenin bu sonucu vermesi ilginçtir. Burada ifade edilen profilin, sadece malzemenin özelliklerinin nicelik olarak hesaba katılarak elde edilmesi bu sonucun çıkmasına neden olmaktadır. Esnek eleman malzemelerin özellikle de bakır berilyum malzemesinin üstün tarafı mikromekanik özellikleridir. İyi bir ısıl işlemle ile bakır berilyum malzemesinde oluşturulan çökeltilerin uygun şekilde malzeme içerisinde dağılması sağlanarak çok iyi esnek eleman malzemesi elde edilebilir [2,4,5,10,15,20,26,27,29].

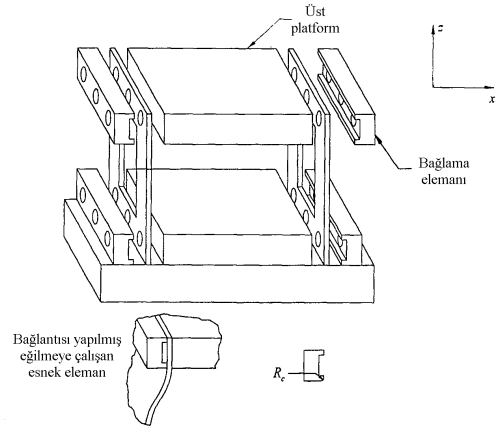


Şekil 2.11. Metrolojik açıdan yüksek kararlılık için malzeme özellik profili [10]

2.5. Esnek Elemanların Montajı

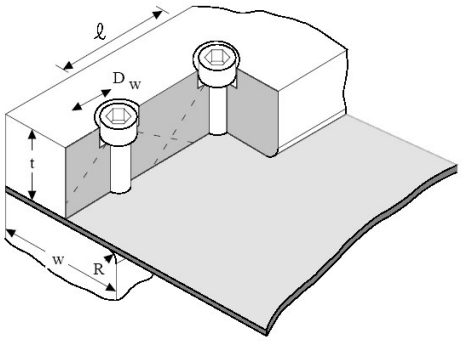
Esnek elemanlar kullanıldığı mekanizmalarda uygun şekilde montaj edilmiş olmaları gerekmektedir. Bu şekilde, ortaya çıkabilecek muhtemel hataların önüne geçilmiş olunabilir. Esnek elemanların tasarımında olduğu gibi montajında da dikkat edilmesi gereken noktalar söz konusudur.

Şekil 2.12'de görülen tek serbestlik dercesine sahip bir mekanizmanın açılmış hali görülmektedir. Bu şekilde görülen mekanizmayı oluşturan tüm elemanların imalatı ve montajı basittir. Yalnız, yaprak tip esnek elemanın üst ve alt kısma hata üretmeyecek şekilde rijit bağlanmasında bazı noktalara dikkat etmek gerekmektedir.



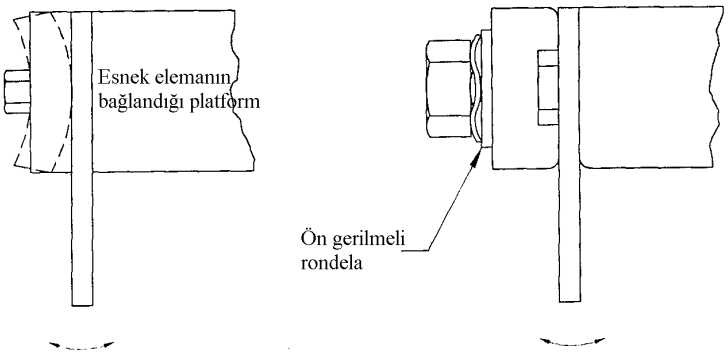
Şekil 2.12 Bir esnek elemanın uygun şekilde montajı [2]

Şekil 2.13'te gösterilen uygulamada, esnek elemanın maruz kaldığı eğilme momenti iki yönde karşılanmaktadır. Burada, yaprak elemanın bağlanması sırasında kullanılan bağlama aparatlarının esnek elemana mümkün olduğunca küçük kuvvetler uygulamasına dikkat edilmelidir. Temas yüzeyi esnek eleman kalınlığından büyük ama minimum düzeyde tutulmalıdır. Eğilme momentine maruz kaldığında herhangi bir keskin köşe elemana temas etmemelidir. Bağlama elemanlarının oturduğu konilerin doğrultularının birbirini örtecek şekilde tasarlanması gerekmektedir (Şekil 2.13).



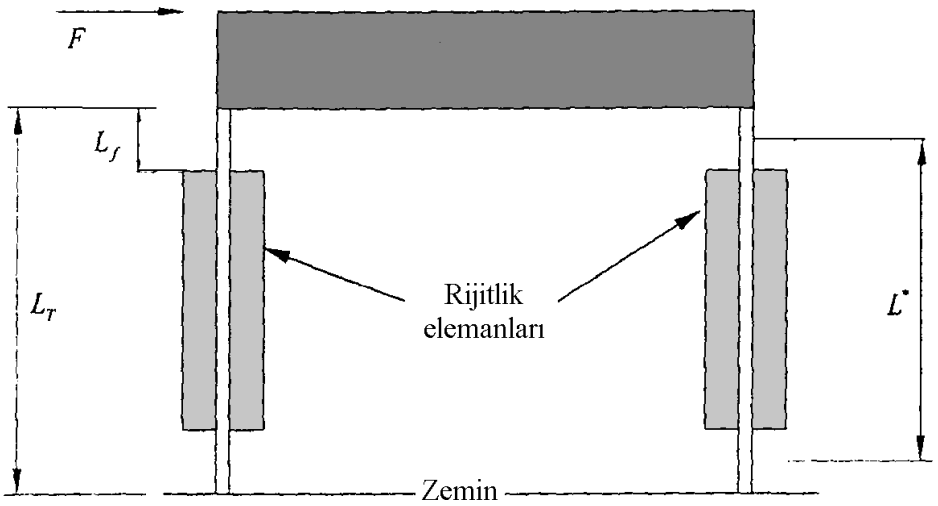
Şekil 2.13. Yaprak tip esnek elemanın rijit bağlantısı [2]

Esnek elemanın mekanizmaya montajında kullanılan civatalar uygun malzeme ve tipte olmalıdır. Civataların elemanla temas yüzeyi cıvatanın kesit alanından büyük olmalıdır. Civatalarda ön gerilmeli rondela türü elemanların kullanımı yararlıdır ve yaklaşık maksimum dayanımına kadar sıkılmalıdır. Şekil 2.14'de yanlış ve doğru bağlantısı yapılmış iki ayrı gösterim yer almaktadır.



Şekil 2.14. Tipik bir yaprak esnek eleman bağlantısı; a) Civata kesiti çok küçük ve kullanılan rondela uygun değil, b) Doğru bağlanma şekli [2]

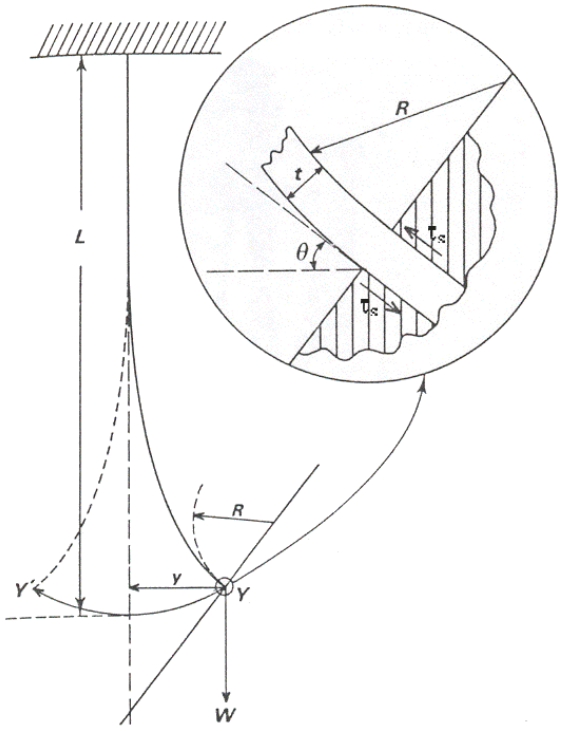
Basma gerilmesi altındaki boyları uzun esnek elemanların burkulma hasarına uğramaması için merkeze yakın bölgelerde yanlardan destekleyici elemanlar kullanılmalıdır. Böylece iki platform arasındaki paralellik de korunmuş olacaktır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Uzun esnek elemanlı bir sistemde destekleyiciler [2]

Genel olarak bakıldığında, bağlantı noktalarında kinematik özelliklere dikkat edilmelidir. Esnek eleman ve tüm mekanizma mümkün olduğu kadar simetrik imal edilmelidir. Elemanların ısıl uzama katsayıları ve ısıl bağımlılıkları mümkün olduğu kadar birbirlerine yakın seçilmelidir. Bağlantı noktalarının esnek elemanın merkezine göre simetrik olmalarına dikkat edilmelidir. Tüm bağlama elemanları yaklaşık aynı sıkma momentiyle sıkılmalıdır. Civata bağlantılarında ön gerilmeli rondelalar kullanılmalıdır.

Şekil 2.16'da görülen ince esnek eleman levhasının rijit olarak bir yere bağlanması durumunda yüzeyler arasında kayma gerilmeleri (τ_s) oluşacaktır. Bu etkilerin azaltılması için uygun bağlantı yapılmalıdır. Ayrıca açısal sapmalar ve esnek eleman geometrisi de ayarlanarak bu işlem gerçekleştirilebilir. Bu etkinin hassas sistemlerde tamamen ortadan kaldırılması için esnek elemanın yekpare imal edilmesi uygun bir çözümdür [5,14].



Şekil 2.16. Esnek elemanın yüzeyleri ile bağlandığı kısımlarda oluşan kayma gerilmeler (W yükü altında çekme gerilmesine maruz, L boyunda, I kesit atalet momentine sahip, E elastiklik modülünde malzemeden imal edilmiş bir esnek elemanda) [14]

Şekil 2.16'da gösterilen esnek eleman bağlantı sisteminde ortaya çıkan eğilme yarıçapı R (2.11) bağıntısıyla verilmiştir..

$$R = 1/\alpha.\theta.\coth(\alpha L) \tag{2.11}$$

α, Denklem (2.6)'da verilmiştir.

Yüzeyler arasında oluşan kayma gerilmesi τ_s = G.t/R olarak Denklem (2.11)'de ifade edilen R'ye göre verilir. Burada G, esnek eleman malzemesinin kayma modülüdür.

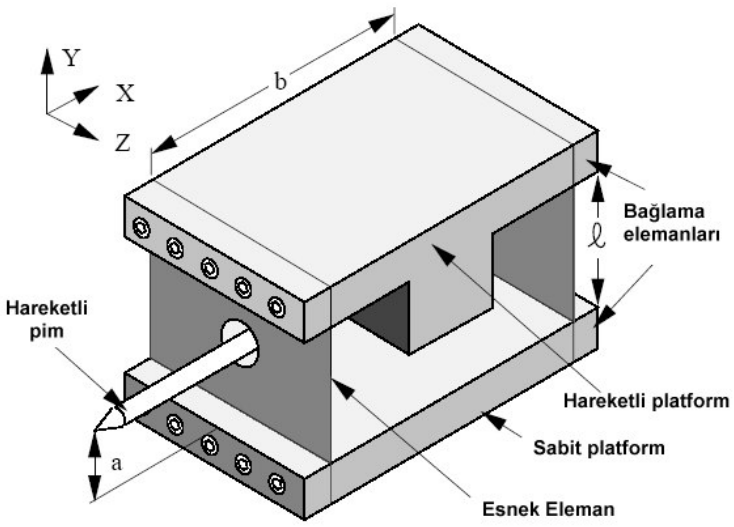
2.6. Esnek Elemanlı Sistemler

2.6.1 Doğrusal Hareketli Mekanizmalar

Esnek elemanlı sistemlerin adet bakımından tek, iki ve dairesel esnek eleman içeren üç ana grupta uygulama alanları vardır. Boyuna rijitliğin arandığı durumlarda ikili esnek eleman tercih edilir. Rijitliğin düşük olduğu kısımlarda destekleme yapılabilir.

Çok küçük yer değişimleri düşünüldüğünde esnek elemanların doğrusal hareket ettikleri söylenebilir [2].

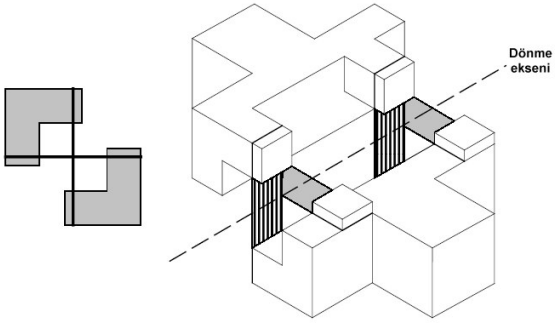
Esnek elemanlar farklı mekanizmalarda bir çok alanda kullanılmaktadırlar. Şekil 2.17'de esnek elemanların kullanıldığı örnek bir sistem gösterilmiştir.



Şekil 2.17. İki yaprak tip esnek elemanın kullanıldığı paralel levhalı mekanizma [10]

2.6.2 Dönme Hareketli Mekanizmalar

Bu tür elemanlar dönme momentinin uygulandığı uygulamalarda kullanılırlar. Genelde düzlemsel ince levha türü esnek elemanlar, çift ya da çapraz tasarımlarda kullanılırlar. Bunun genel bir uygulaması Şekil 2.17'de verilmiştir. Çapraz tip esnek elemanlar iyi kinematik mafsal görevi yapabilirler (Şekil 2.18) [2].



Şekil 2.18. Çapraz tip esnek elemanlı mekanizma [2]

3. ELASTİKLİK VE ANELASTİKLİK

Metalik malzemelerde ideal elastiklik, Hooke yasası olarak bilinen ve gerilme (σ) ile şekil değiştirme (ε) arasındaki ilişkiyi veren bağıntı ile tanımlanır.

$$\sigma = M\varepsilon \tag{3.1}$$

Bu ifade aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$\varepsilon = J\sigma \tag{3.2}$$

Burada;

$$M = 1/J \tag{3.3}$$

Buradaki M, elastiklik modülü (veya sadece modül) olarak tanımlanırken J ise onun karşılığı olan uygunluk modülü (veya sadece uygunluk) olarak ele alınır.

Bahsedilen yaklaşım kesme, eşeksenli ya da hidrostatik şekil değiştirme gibi deformasyonun basit halini göstermektedir. Bu durumlarda, M olarak gösterilen elastiklik modülü gerilme durumuna göre kayma modülü (G), Young Modülü (E) veya hacim modülü (K) olarak ele alınır [11,12].

(3.1) ve (3.2) denklemlerinde ifade edilen ideal elastik davranışın 3 şartı vardır: (1) Uygulanan gerilmenin her seviyesine karşılık gelen şekil değiştirme cevabının (veya tam tersi) bir denge değeri vardır. (2) Denge değeri anlık olarak elde edilir. (3) Cevap doğrusaldır. Elastik davranışın karakteristik özelliği, uygulanan yükün veya şekil değişiminin kaldırılmasıyla tamamen toparlanabilirliğidir ki bu (3.1) bağıntısının doğal bir sonucudur.

İdeal elastik davranışın genelleştirilebilmesi için yukarıda listelenen 3 şart değişik kombinasyonlarda yazılabilir. Bu ihtimaller Tablo 3.12'de her durum için verilmiştir. Eğer 3 şart da sağlanırsa ideal elastik durum sözkonusudur. Sadece doğrusallık (lineerite) sınırlandırılırsa doğrusal olmayan elastiktikten bahsedilebilir. Eğer doğrusallık ve tamamen toparlanabilirlik kaldırılırsa malzemede "anlık plastiklik"ten

sözedilebilir ki bu durum "kristal plastisite" olarak adlandırılır (bu durum en iyi, sünek kristallerin yüksek gerilmede akmalarının bir örneği olarak verilebilir). Diğer yandan Tablo 3.1'deki 3 büyüklükten kalan ikisi anilik şartının olmadığı, diğeri ise cevabın zamana bağlı olduğu durumu gösterir. Yalnızca anilik şartı kaldırılırsa anelastik davranış tipi elde edilmiş olur. Tamamen toparlanabilirliğin kaldırılmasıyla daha genel bir davranış ve anelastikliğin özel bir durumu olan "doğrusal viskoelastiklik" elde edilmiş olur [11,12].

Tablo 3.1 Elastiklik ve anelastiklik kavramlarının karşılaştırmalı tablosu [11]

	Tek Denge İlişkisi (Tamamen Toparlanabilirlik)	**Anilik**	**Doğrusallık**
İdeal Elastiklik	Evet	Evet	Evet
Doğrusal Olmayan Elastiklik	Evet	Evet	Hayır
Anlık Plastiklik	Hayır	Evet	Hayır
Anelastiklik	Evet	Hayır	Evet
Doğrusal Plastiklik	Hayır	Hayır	Evet

Eğer anelastikliğin tanımı özetlenecek olursa şu 3 sonuca ulaşılır.

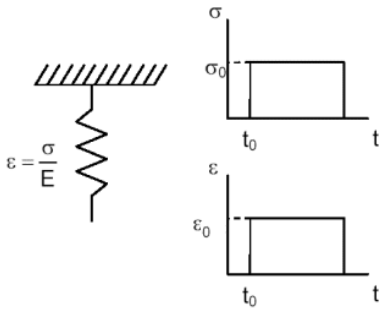
1. Her gerilme için karşılığı olan bir denge şekil değişimi vardır (tam tersi de doğru).
2. Denge durumu yalnızca belirli bir zaman geçince elde edilebilir.
3. Gerilme-şekil değişim ilişkisi doğrusaldır.

Metal malzemelerin tümü anelastikliğin yukarıdaki ilk özelliğini karşılarlar. Anelastikliğin ikinci sonucu; uygulanan mekanik kuvvetlere karşın malzemenin dengeye gelmesi için belirli bir zamana ihtiyacı olmasıdır. Genel olarak, metal malzemelerin kendi kendine zamanla dengeye gelmesi olayı "gevşeme" olarak adlandırılır. Özellikle dış kuvvetler (gerilme veya şekil değişimi) mekanik ise bu durum "anelastik gevşeme" veya "mekanik gevşeme" olarak tanımlanır [11].

3.1. Elastik Davranış

Malzemeler uygulanan gerilme ile şekil değiştirirler. Bu şekil değişimleri akma sınırının altında elastiktir ve gerilme kaldırıldığında tekrar eski konumuna dönerler (Şekil 3.1). Akma sınırından kopma sınırına kadar malzeme elastik ve plastik şekil

değişimini birlikte gösterirler. Yani gerilme kalktığında bile malzeme bir miktar plastik şekil değiştirmiş olur.



Şekil 3.1. Elastik davranışın matematik modeli [11]

Metalik malzemelerin elastik davranışı elastiklik, kayma ve hacim modülleri ile ifade edilir ve bunlar aşağıda açıklanmıştır.

Hooke kanunu gereğince şekil değişimleri uygulanan gerilme ile orantılıdır ve aralarında doğrusal bir ilişki vardır. Gerilme şekil değişimi eğrisinin eğimi elastiklik modülünü (E) ifade etmektedir. Kayma gerilmesi söz konusu olduğunda malzemenin elastikliği kayma modülü (G) ile ifade edilir. Metalik malzemelerde E ile G arasında şu bağıntı vardır.

$$E = 2.(1+\nu).G \tag{3.4}$$

Burada ν malzemenin "Poisson oranını" vermektedir ki bu çoğu metal için yaklaşık 0.3 'tür.

$$\upsilon = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \tag{3.5}$$

Denklem (3.5)'teki z, eksenel yönü, x ve y de bu eksene dik diğer 2 ekseni ifade eder.

Malzemelerin hidrostatik basınç altındaki davranışı hacim modülü (K) ile ifade edilir.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \frac{1}{\beta} \tag{3.6}$$

Burada β sıkıştırılabilirliktir.

3.2. Anelastik Davranış

Hooke kanununa göre; gerilme ile şekil değişimlerinin doğrusal olması tamamen teorik bir yaklaşımdır. Gerçekte bu tam doğrusal değildir (Şekil 3.2). Bu durumda elastiklik modül yani gerilme-şekil değişimi doğrusunun eğimi sabit değil değişkendir. Uygulanan gerilme seviyesine göre değişmektedir. Bu nedenle de malzemenin elastiklik modülü ve buna bağlı olarak da şekil değişimleri, değişik gerilme aralıkları için farklılık göstermektedir [13].

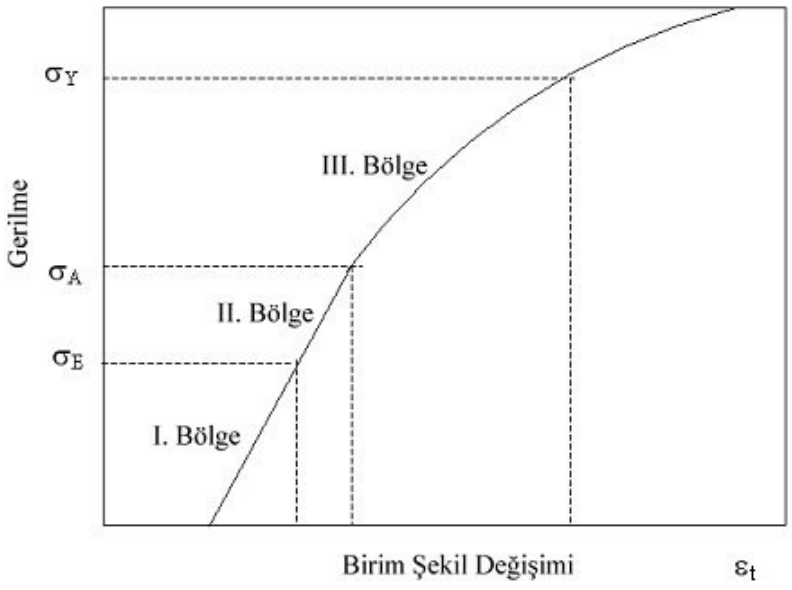
Anelastik modül etkiyen gerilme değerine göre hesaplanabilir.

$$\sigma_a = M.\varepsilon_a \tag{3.7}$$

Burada M anelastik modüldür, ε_a ise ortaya çıkan şekil değişimidir ve Şekil 3.2'de görüldüğü gibi gerilme-şekil değiştirme eğrisinde II. Bölgeyi ifade etmektedir.

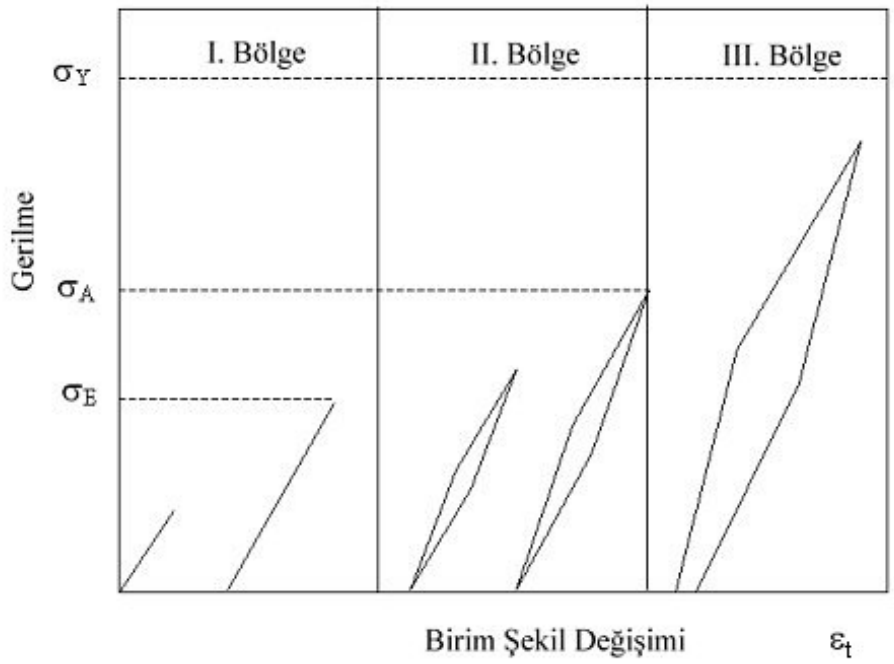
Şekil 3.2'de I.Bölge elastik bölgedir ve daha önce açıklandığı gibi "Hooke" doğrusuyla açıklanır. Bu iki modül denklem (3.8)'deki gibi düzenlenerek efektif elastiklik modülü elde edilebilir.

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{1}{E} + \frac{1}{M} \tag{3.8}$$



Şekil 3.2 σ-ε_t eğrisinde tanımlamalar [13]

Şekil 3.2'de görülen I.bölge ile II. bölge arasındaki sınır elastik, II.bölge ile III.bölge arasındaki sınırı da anelastik limit olarak tanımlarsak; elastik limitin üstünde ama akma dayanımının altındaki bir gerilme değerinde (yaklaşık 0.3 x σ_y) malzeme anelastik davranış gösterir. Gerilme yüklemesi ve boşaltması sırasında σ-ε_t döngüleri oluşur (Şekil 3.3). Burada ε_t, toplam şekil değişimini ifade etmektedir. Bu döngüler anelastik sınırın altında kapalıdır (Şekil 3.3, II.Bölge) ve geri dönebilir şekil değişimlerine neden olur. Bu sınırın üstünde (ama σ_y'nin altında) ise malzeme, zamanla geri dönebilir şekil değişimine maruz kalabilir (Şekil 3.3, III.Bölge). Bu durum mikroplastiklik (mikro akmalarla yerel plastik deformasyonların oluşması) ve dislokasyon hareketleri ile açıklanmaktadır. Ayrıca malzeme içerisindeki kalıntı gerilmeler ve yüzey etkileri de bir faktör olarak düşünülmelidir. Bu şekil değişimleri anelastik sınırın altında geri dönebilir, üstünde ise geri dönemez karakterdedir. Bu durum malzemelerin tümünde görülebilen bir olaydır. Özellikle ölçme ve hassas işlemlerde malzemelerin bu davranışının iyi ortaya konulması gerekmektedir. Malzemeler mikro yapı ve imalat özellikleri nedeniyle bu etkiyi az ya da çok gösterebilir. Özellikle Metroloji'de kullanılan malzemeler bu etkiyi mümkün olduğu kadar az gösteren malzemelerden seçilmelidir [13,16,17].



Şekil 3.3. Sabit yüklemede gerilme sınırları [13]

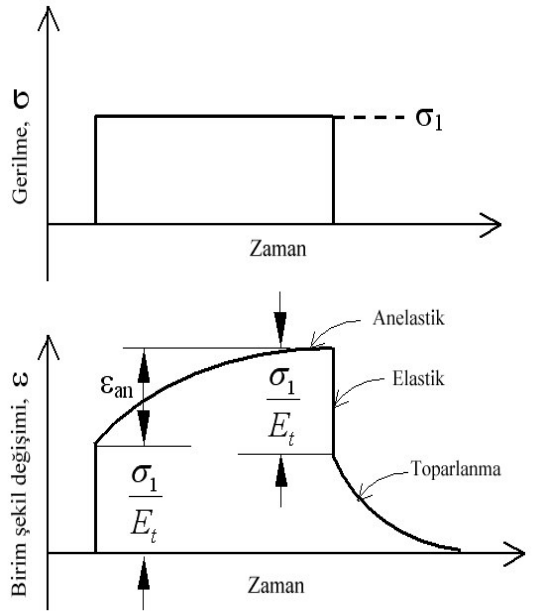
Bilinen elastik teori fiziksel temelli ya da anelastikliğin atomik seviyedeki mekanizmalarını kapsamamaktadır. Fakat anelastikliği, malzeme içinde meydana gelen gevşeme işlemleri olarak ele almaktadır.

Malzemelerin mikro yapısal özellikleri farklı şekillerde modellerle ifade edilmeye çalışılmıştır. Genel olarak bu modellere göre, malzemelerde anelastik davranışın fiziksel anlamı şu şekilde açıklanabilir; malzeme tek bir yay elemanı gibi düşünüldüğünde elastik davranış gösterirler, gerçek malzemelerde ise, birincil yay elemanı ile paralel çalışan başka bir ikincil yay elemanı ve bu elemana seri bir sönümleme elemanı sistemi düşünülmelidir. Buna göre; sabit genlikli ani bir gerilme uygulandığında sönümleme elemanı kilitleme yapacağından onunla seri çalışan ikincil yay elemanı da sisteme ilave etki edilecektir. Malzemenin şekil değişimi, yay elemanlarının toplamı olarak ifade edilecektir (1.Durumu). Bu durumda $E(t)=E(0)=E_u$ yazılır. Eğer gerilme uygulanma süresi artarsa (sabit genlikte) sönümleme elemanı işlevini görecek ve içerisindeki piston zamana bağlı olarak hareket edecektir ki bu durumda ikincil yay elemanı etkisini kaybedecektir (2.Durum). Bu durumda $E(t)=E(\infty)=E_r$ yazılabilir ki burada "r" harfi gevşeme için kullanılmıştır [11].

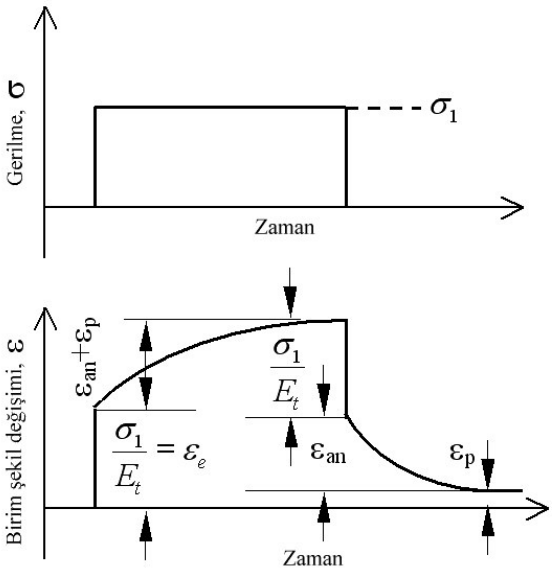
$$E_u = E + \delta E \text{ (1. durum için)}$$
$$E_r = E \text{ (2. durum için)} \qquad (3.9)$$
$$E_u - E_r = \delta E$$

Denklem (3.9)'da ifade edilen fark "modül hatası" olarak adlandırılan malzemeye özgü bir değeri verir ki bu değer yapılan çalışmalara [13,15] göre uygulanan gerilme ile artar, anelastik sınırın altında ise sabittir.

Bir malzemeye sabit bir gerilme uygulandığında herhangi bir zamanda ortaya çıkan deformasyon, o andaki elastik deformasyonu, gecikmiş elastik deformasyonu (anelastiklik) ve plastik deformasyonu içermektedir (Şekil 3.4). Anelastik ve plastik deformasyonlar malzemelerde sürünme (ilk devresi) kategorisinde değerlendirilmektedir. Anelastik ve plastik deformasyon gerilme gevşemesi içerisinde değerlendirilebilir ki bu da elastik düzensizliklerin ana kaynağını oluşturmaktadır [11,12,16]



a)



b)

Şekil 3.4 Anelastik davranışın aşamaları; a) Sabit yük altında anelastiklik (geri dönebilir), b) Sabit yük altında geri dönemez anelastiklik (viskoelastik davranış) [12]

Elastik şekil değişimleri Hooke kanuna göre $\varepsilon_e = \sigma/E_t$ şeklinde ifade edilmektedir. Burada elastik şekil değişimlerinin büyüklüğü uygulanan gerilmenin seviyesine bağlıdır fakat yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda bu bağıntı tam olarak

geçerli değildir. Çünkü metallerin bir de mikro elastik orantı sınırları vardır ki bu sınır elastik orantı sınırının içerisindedir.

Anelastik şekil değişimlerinin miktarı zamana bağlıdır ve sonunda maksimum değere üstel olarak (doğrusal değil) ulaşan şekil değişimlerinin sınırıdır. $\varepsilon_{an} = K.\sigma^{\alpha} (1-e^{-t/\tau})$ şeklinde ifade edilir. Burada K ve α sıcaklığa, soğuk işlemeye, önceki ısıl işlemlere ve metalurjik mekanizmalara bağlı, τ ise zamana bağlı sabitlerdir.

Herhangi bir zamandaki gerilmenin tespit edilmesi gerilmenin uygulandığı süreye bağlıdır. Anelastik gerilme, uygulanan gerilme ortadan kalkıncaya kadar sıfırdan sapmaya neden olmaktadır (Şekil 3.4b). Gerilme sonrası malzeme davranışı "toparlanma" olarak tanımlanmaktadır. Eğer, toparlanma tamamlanmadan malzemeye başka bir gerilme uygulanırsa, herhangi ileri bir zamandaki mevcut gerilme seviyesi, asıl gerilme ve sonradan uygulanan gerilmenin her ikisinin de toplamına bağlıdır.

Plastik şekil değişimlerinin miktarı, gerilme ve zamanın bir fonksiyonudur ve $\varepsilon_p = C.\sigma^{\beta}.t^{\gamma}$ şeklinde ifade edilir. Burada β'nın değeri metaller için 2'den büyük, γ ise 1'den küçük bir sayıdır. Formülden görüldüğü üzere plastik şekil değişiminin artması için gerilme seviyesinin büyümesi gerekmektedir.

Gerilme altında malzemede meydana gelen deformasyonun toplamı için yukarıda bahsedilen 3 parça şekil değişimleri toplanıldığında,

$$\varepsilon = \sigma / E_t + K.\sigma^{\alpha} (1-e^{-t/\tau}) + C.\sigma^{\beta}.t^{\gamma} \qquad (3.10)$$

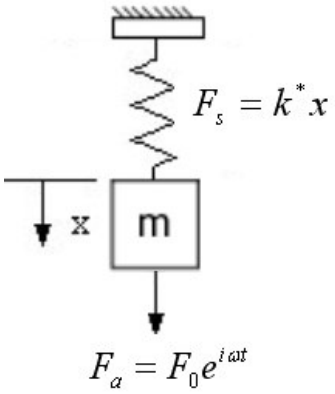
elde edilir.

İdeal elastik katı tanımında malzemeye uygulanan yük ortadan kalktığında şekil değişimi aniden sıfıra döner ve zaman bağlı herhangi bir davranış gözlenmez Anelastik durumda, (b) eğrisinden de görüleceği üzere toplam toparlanma, zamana bağlı olarak tamamlanmaktadır. Aksine, doğrusal viskoelastik katı sadece bölgesel bir toparlanma göstermekte ve kararlı durum viskoz sürünme nedeniyle bir miktar şekil değişimi üzerinde kalmaktadır ki bu toparlanabilen bir özellikte değildir. Deformasyonun daha büyük olduğu durumlarda ise viskoplastiklikten söz edilebilir.

3.3. Büyük Dış Atalete Sahip Rezonans Sistemler

Genelde bir rezonans sistem iki elemana sahip olmak zorundadır, bunlar; elastik eleman (gerçekte anelastik olabilir) ve dış atalet moment. Bu tür bir sistem, büyük bir ataleti üzerinde taşıyan elastik elemanlı, tek serbestlik derecesine sahip sistem olarak düşünebilir. Burada hareket, tek bir yönde ve tek bir koordinatta gerçekleşir. Bir örnek olarak; yukarıdan bir telle asılmış büyük bir kütle sistemi düşünebilir. Bu tür bir sistemde kütle hareketi, boyuna veya torsiyonel olabilir ki bu durumda sarkaç, "torsiyonel" olarak isimlendirilir. Burada kütlenin açısal olarak dönme hareketi sistemi karakterize eder. Kütlenin hareketi dolayısıyla ortaya çıkan deformasyon x koordinatında ifade edilirse, numuneye (bu örnekte tele) etkiyen kuvvet F_s olarak gösterilir. F_s'nin büyüklüğü, x koordinatına göre sisteme etkiyen moment nedeniyle değişecektir. Buradaki F_s ve x, seçilen bazı noktalarda gerilme ve şekil değiştirme ile orantılıdır.

Rezonans sistemi gösteren ve tek serbestlik dercesine sahip bir yay-kütle sistemi Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Anelastik yaya sahip tek serbestlik dereceli bir sistemin mekanik modeli [12]

Eğer test edilen numune ideal elastik bir malzeme ise kütlenin yaya etki ettiği F_s kuvveti, F_s=kx şeklinde yazılabilir. Burada k yay sabitidir. Diğer taraftan anelastik bir malzeme düşünüldüğünde $\sigma=M^*\varepsilon$ (burada M^* karmaşık sayı şeklinde ifade edilecektir) (3.11) bağıntısı elde edilir. Yine burada k^*, karmaşık yay sabitini göstermektedir.

$$F_s = k^* x = k_1(1 + i\tan\phi)x \tag{3.11}$$

k^* değeri M^* ile orantılıdır [11].

3.3.1. Sistemin Zorlanmış Titreşimi

Zorlanmış titreşim deneyinde periyodik bir kuvvet (F_a) kütleye Şekil 3.11'deki gibi uygulanır. Karmaşık sayı gösteriminde Denklem (3.12)'deki gibi yazabilir.

$$F_a = F_0 e^{i\omega t} \tag{3.12}$$

Şekil 3.11'daki sistemin hareket denklemi

$$m\ddot{x} = F_a - F_s \tag{3.13}$$

Kararlı durum çözümüne göre (3.14) bağıntısı yazılabilir.

$$x = x_0^* e^{i\omega t} = x_0 e^{i(\omega t - \theta)} \tag{3.14}$$

Buradaki θ, F_a ile x arasındaki faz farkıdır (F_s ile x arasındaki kayıp açı ϕ ile karıştırılmamalıdır).

$$x_0^{\,2} = \left|x_0^*\right|^2 = \frac{(F_0/m)^2}{(\omega_r^{\,2} - \omega^2)^2 + \omega_r^{\,4}\tan^2\phi} \tag{3.15}$$

Burada,

$$\omega_r \equiv (k_1/m)^{1/2} \tag{3.16}$$

Denklem (3.15) deformasyon genliğinin (x_0) frekansa (ω) bağımlılığını verir ve x_0, $\omega=\omega_r$ iken maksimum, $\omega>>\omega_r$ ve $\omega<<\omega_r$ durumlarında ise küçük değerlere ulaşır. Bu davranış "rezonans" olarak isimlendirilir. Bu frekans (ω_r) sistemin frekansına (ω) bağlıdır. Faz açısı θ Denklem (3.17)'deki gibi verilebilir [13].

$$\tan\theta = \frac{\omega_r^{\,2}\tan\phi}{\omega_r^{\,2} - \omega^2} \tag{3.17}$$

3.3.2. Sistemin Serbest Titreşimi

Zorlanmış titreşimin rezonans cevabının kullanımına ilave olarak, en eski ve en popüler metot; serbest titreşime maruz bir sistemdeki genlik azalmasının dinamik anelastik cevabını kapsayan metottur. Burada sistem bir dış kuvvetle harekete geçirilir ve ortaya çıkan deformasyon genliklerinin zamana göre azalması ölçülerek doğrudan ölçümler gerçekleştirilir. Şekil 3.6, genliğin serbest azalması sırasında titreşimi göstermektedir. Bu durumda sistemin hareket denklemi (3.13)'de verildiği gibidir fakat, dışardan zorlanmış bir kuvvet F_a uygulanmadığından bu değer sıfır (0) alınır. F_s için (3.13)'deki ifadesi yazılırsa;

$$m\ddot{x} + k_1(1 + i\tan\phi)x = 0 \tag{3.18}$$

Bu denklemin çözümünde, serbest titreşimi tanımlayan ve iç sürtünmeyi gösteren bir formda (3.19) bağıntısıyla yazılabilir.

$$x = x_0 e^{i\omega^* t},\ \omega^* = \omega_0[1 + (i\delta/2\pi)] \tag{3.19}$$

Faklı bir şekilde (3.20)'deki gibi ifade edilebilir.

$$x = x_0 e^{-\delta f_0 t} e^{i\omega_0 t} \equiv A(t)e^{i\omega_0 t} \tag{3.20}$$

elde edilir. Burada $f_0=\omega_0/2\pi$ olarak frekansı, δ sabit sayı ve A(t) ise genliği ya da azalmanın fonksiyonunu ifade eder (Şekil 3.6).

Bu çözüm δ'nın küçük olduğu durumlarda sönümlenmiş salınımın üstel fonksiyonunu gösterir. Bu çözüm (3.18) denkleminde yerine yazılır ve gerçel ile sanal kısımları ayrı ayrı birbirine eşitlenirse, (3.21) bağıntısı elde edilir.

$$\omega_0^2 = k_1/m[1 - (\delta^2/4\pi^2)] \doteq k_1/m \tag{3.21}$$

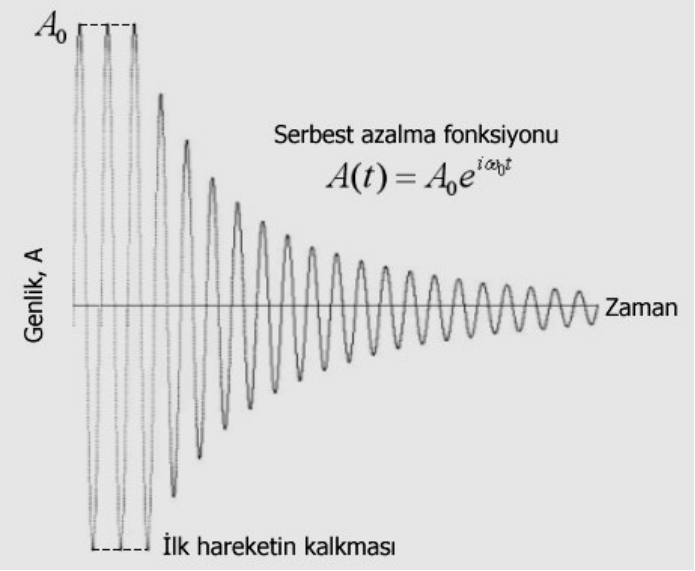
Burada,

$$\delta \doteq \pi\phi \tag{3.22}$$

Boyutsuz δ, logaritmik azalma olarak isimlendirilir, iki tam titreşim çevrimindeki genlikler (A_n) arasındaki oranın doğal logaritmasını ifade eder ve aşağıdaki şekilde gösterilir [11-12,18].

$$\delta = \ln(A_n / A_{n+1}) \tag{3.23}$$

Bu metot sönümlemeyi doğrudan ölçmeye uygun bir yoldur ve (3.22)'de verildiği şekilde iç sürtünmenin ölçümüyle (ϕ) ilişkilidir (π faktörüyle).



Şekil 3.6. Bir anelastik katının doğal titreşimlerinin serbest azalması [12]

δ ile ϕ arasındaki ilişki malzemenin özelliklerinden bağımsız değildir bu nedenle gerilme-şekil değiştirme denkleminin özel bir hali tanımlanır. Bu özel durum için çalışmalar yapılmış ve "standart anelastik katı" tanımlanmıştır [11,12]. Bu durumda iç sürtünme bir maksimum değere ulaşır. Kayıp açısı (ϕ_m) ile logaritmik azalmanın (δ_m) maksimum olduğu değerler arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde verilmiştir [11].

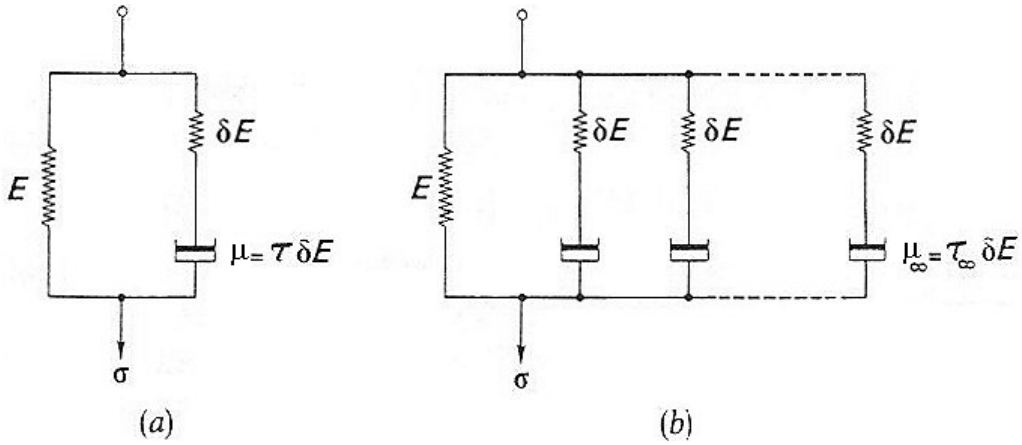
$$\tan\phi_m \doteq \phi_m = (\delta_m / \pi)[1 - (\delta_m / 2\pi) + ...] \tag{3.24}$$

3.4. Mekanik Modeller

Bir malzemenin gerilme-şekil değiştirme denklemlerine uygun davranışının gözlemlenebilmesinde mekanik modeller kullanılır. Üç bağımsız parametreyi içeren anelastikliğin gösterimi için basit diferansiyel denklemler kullanılabilir. Bu amaçla model, üç basit elemanı içerebilir (iki yay ve bir sönümleyici). Bu tür üç elemanlı model ve gösterimlerle malzeme davranışının ifadesi "standart anelastik katı" olarak adlandırılır [11,12].

Tek bir gevşeme sürecine sahip esnek eleman malzemesinin modeli Şekil 3.7a'daki gibi gösterilir. Bu durumda gerilme (σ) ile birim şekil değişimi (ε) arasındaki bağıntı (3.25)'de verildiği şekildedir. Burada gevşemiş (E_R) ve gevşememiş (E_U) elastiklik modülleri arasında fark modül kaybı (δE) olarak tanımlanır. Gevşeme zaman sabiti τ modelde verilen sönümleme elemanının viskozitesi (μ) ile modül kaybı δE'in oranına eşittir.

$$\varepsilon E_R + \dot{\varepsilon}(E_R + \delta E) = \sigma + \dot{\sigma} t$$
$$\delta E = E_U - E_R \tag{3.25}$$



Şekil 3.7. Mekanik modeller, a) Tek gevşeme sürecine sahip Maxwell Modeli, b) Genelleştirilmiş birleşik model [18]

Daha genelleştirilmiş olan birleşik modelde, bir yay elemanı sonsuz sönümleme elemanı ve ikincil bir yay ile paralel şekilde düşünülmüştür (Şekil 3.7b). Tüm yay-sönüm elemanı (Maxwell Ünitesi) çifti aynı küçük yay sabitine (δE) sahiptir. Fakat gevşeme süreleri (τ_i) birbirlerinden farklıdır [18].

Bu durum, frekanstan bağımsız sönümlemeyi modellemektedir. Maxwell üniteleri 1/τ ile orantılı bir yoğunlukta dağılmışlardır. Başka bir deyişle, Maxwell üniteleri gevşeme sürelerine göre logaritmik skalada sabit bir yoğunluğa sahiptir.

Gerilme ve şekil değişiminin açısal frekansının (ω) sinüzoidal değiştiği yaklaşımı ile denklem (3.25), denklem (3.26) formuna dönüştürülür.

$$E(\omega) = \frac{\sigma(\omega)}{\varepsilon(\omega)} = E + \delta E\left(\frac{\omega^2\tau^2}{1+\omega^2\tau^2} + \frac{i\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2}\right) \tag{3.26}$$

Denklem (3.26)'de sanal kısım genelleştirilmiş Young modülünü, kalan terimler ise frekansa bağımlı gerçel kısmı verir [18].

Anelastik esnek elemana sahip bir sarkacın frekansa bağımlı cevabı, denklem (3.26)'in denklem (3.27)'de yerine yazılmasıyla elde edilir [14].

$$c_0 = \sqrt{(Mg.E.I)}.\cos ech(\alpha L) \tag{3.27}$$

$$\alpha = \sqrt{Mg / E.I} \tag{3.28}$$

Burada "M.g" sarkaca asılı bulunan ağırlık, E elastiklik modülü, I kesit atalet momenti, L ise esnek eleman uzunluğudur [1,3,18].

$$c_0 \rightarrow c(\omega) = c_0 + \delta c\frac{i\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2} \tag{3.29}$$

$$\delta c = \frac{\delta E}{E}c_0(1+\alpha L.\coth(\alpha L) \tag{3.30}$$

Bazı ön kabuller yapılarak ($E_u \approx E$ ve $\delta E << E_u$) "logaritmik azalma" aşağıdaki gibi elde edilir. Burada ω rezonans frekansını ifade etmektedir [14].

$$\eta(\omega) = \frac{\delta c}{I\omega^2}\frac{\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2} \tag{3.31}$$

4. ESNEK ELEMANLI TERS SARKAÇ

Malzemelerdeki anelastikliğin ölçümü için bir çok deneysel düzenek ve cihaz tasarlanmış ve kullanılmıştır. Bu cihazlar çalışma frekansları göz önüne alınarak, rezonans altı, rezonans ve rezonans üstü olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. Sarkaç düzeneğinde esnek elemanın dinamik testi için rezonans metodu yaygın şekilde kullanılmaktadır. Malzemedeki iç sürtünmeler nedeniyle ortaya çıkan anelastik davranışın ölçülebilmesi için çok çeşitli sarkaç düzenekleri kullanılmıştır. Torsiyonel tip, burulmaya maruz esnek elemanlı sarkaç sistemleri en eski ve yaygın olarak kullanılan tasarımlardır. Basit sarkaç, uzun yıllar anelastiklik ölçümü amacıyla kullanılmıştır. Bu ölçüm yöntemlerinde ana prensiplerin değişmemesine karşın, ölçüm elemanı ve sarkaç tasarımı zamanla değişiklik göstermiştir. Basit, torsiyonel, ters ya da birleşik tip sarkaçlarla, X şeklinde kurulmuş sarkaçlar en yaygın olarak kullanılan türlerdir. Anelastik davranışı tespit edilecek deney numuneleri, çeşitli sarkaç düzeneklerine uygun şekilde monte edilerek dinamik ölçüm cihazları haline getirilmiştir [8,11-15,17-21,24,25,28,29].

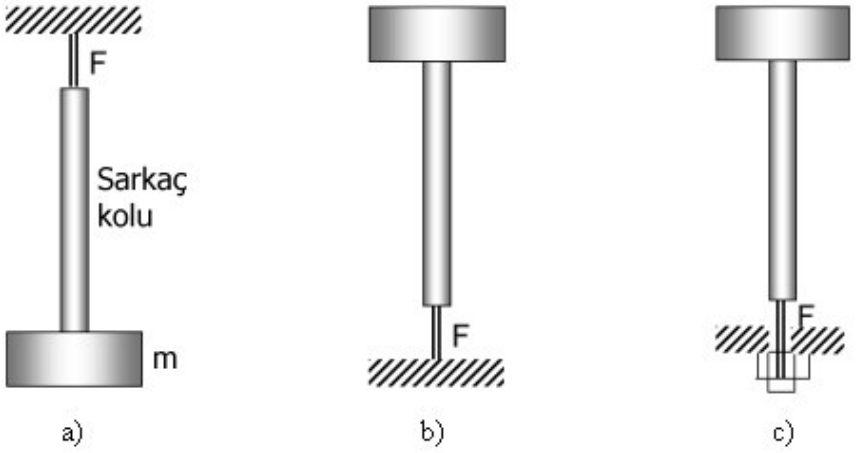
4.1. Esnek Elemanlı Sarkaçlara Genel Bir Bakış

Dış atalet nedeniyle eğilmeye zorlanan bir esnek elemana sahip sarkaç düzeneklerine esnek elemanlı sarkaçlar adı verilmektedir. Bu tip sarkaçlarda kullanılan esnek elemanlar, genelde tek serbestlik derecesine sahiptir ve eğilmeye zorlanmaktadır. Diğer sarkaç sistemlerinde burulmaya zorlanan tip elemanlar kullanılabilmektedir. Esnek elemanlı sarkaçların en genel tipi, bir ucu sabit zemine diğer ucuna da bir kütle bağlanmış şeklidir. Bu düzenekte esnek elemanın rijitliği, yerçekimi etkisiyle kütleye etkiyen kuvveti karşılayacak şekildedir. Şekil 4.1'de esnek elemanlı sarkaçların 3 tipi verilmiştir. Buna göre; basit sarkaç şeklinde bağlantıda (Şekil 4.1a) esnek eleman sistemin ağırlığını taşımaktadır. Basit sarkaçta salınım periyodu asılı kütleden bağımsız olduğundan (havanın etkisi yok kabul edilirse veya havasız bir ortamda), bu değerin deney yapmaya imkan verecek şekilde geniş bir aralıkta değiştirilebilmesi çok zordur. Basit sarkaç sisteminde, periyodun 30

saniye mertebelerine çıkartılabilmesi 20 metreye yakın bir kol uzunluğunu gerektirmektedir ki bu da ölçmeyi neredeyse imkansız kılmaktadır. Ayrıca küçük açılarda, basit sarkaçta periyot kütleden bağımsızdır [(4.1) no.lu denklem].

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \tag{4.1}$$

Burada L kol sarkaç boyunu, g ise yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.



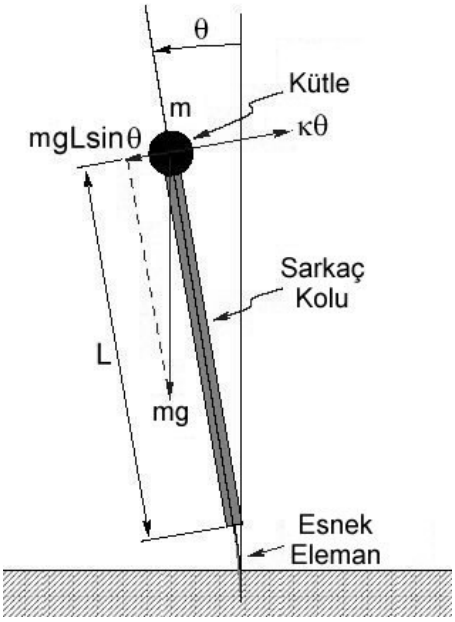
Şekil 4.1. Esnek elemanlı sarkaçlar; (a) Basit sarkaç, (b) Ters sarkaç, (c) Yeni ters sarkaç [29]

Ters sarkaçta, salınım frekansının asıldığı ağırlığa göre değişmesi, bu tür sarkaçların anelastik ölçümlerde kullanımında büyük yarar sağlamaktadır. Malzemelerdeki anelastik etkilerin ortaya konulmasında önemli bir düzenek olan ters sarkaç sistemi, geniş bir frekans aralığında çalışma imkanı tanır. Klasik ters sarkaçta esnek eleman üzerindeki ağırlığın etkisiyle basma gerilmesi altındadır (Şekil 4.1b). Esnek elemanların basma yönünde rijitlikleri pek iyi olmadığından bir çok uygulama ve test için bu yeterli bir yaklaşım değildir. Bu çalışma ile ortaya konulan ve Şekil 4.1c'de gösterilen yeni ters sarkaçta ise, esnek elemanın çekme gerilmesine maruz kalması sağlanarak sistemin periyodu kolayca ayarlanabilir hale getirilmiştir [29].

4.2. İdeal Ters Sarkaç

Şekil 4.2'deki gibi, kütlesiz rijit bir kola sahip, L mesafesinde m kütlesini taşıyan ve alt kısmından zemine κ (kuvvet x uzunluk boyutunda) yay sabitine sahip elastik bir

elemanla bağlanmış, ideal bir ters sarkaç düşünülebilir. Böyle bir sisteme dışarıdan bir test momenti N_{ext} uygulanırsa, kolun dikeyde yaptığı açı θ olmak üzere Denklem 4.2'deki hareket denklemi yazılabilir [21].



Şekil 4.2. İdeal bir test sarkacın şematik diyagramı [21]

$$I\ddot{\theta} = -\kappa\theta + mgL\sin\theta + N_{ext} \tag{4.2}$$

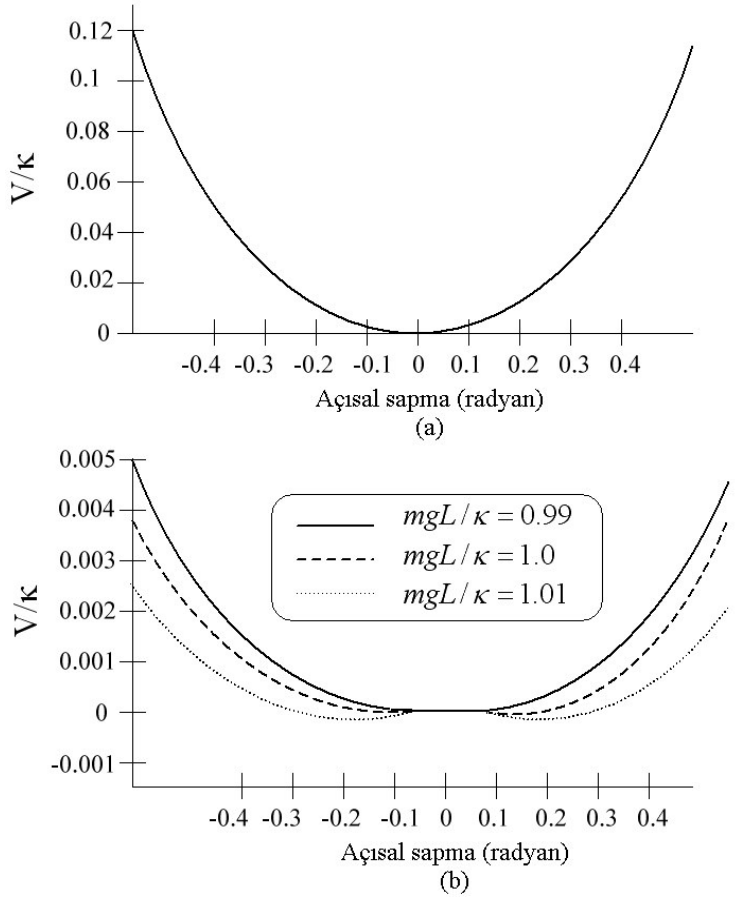
Burada esnek elemanın (elastik ya da anelastik) kolun dikeyde yaptığı θ açısını karşılayıcı şekilde yerine getirme momenti $N_{ext} = -\kappa\theta$ ile yerçekimi etkisiyle ortaya çıkan moment $N_{grav} = +mgL\sin\theta \approx +mgL\theta$ (θ'nın küçük değerleri için) arasında bir dengelenme söz konusudur. Bu durumda, yer çekimi etkisi sanki negatif bir yay gibi etki etmektedir. Dolayısıyla kola etkiyen net moment $N_{net} = -(\kappa - mgL)\theta$ şeklinde yazılabilir. Kolun L boyunun (m kütlesinin moment kolunun) veya m kütlesinin çok hassas ayarlanmasıyla net yay enerjisi, prensipte küçük bir değere veya negatife indirilebilir.

Yay için net potansiyel Denklem (4.3)'teki gibi yazılır.

$$V_{net} = V_{flex} + V_{grav} = \frac{1}{2}\kappa\theta^2 + mgL(\cos\theta - 1) \tag{4.3}$$

Sistemin potansiyel enerji fonksiyonu incelendiğinde, küçük açısal değişimler için yerçekimsel potansiyel $\frac{1}{2}\kappa L\theta^2$'dır ki bu durumda yay negatif yay sabitine sahip bir eleman gibi hareket eder. Dikkatli şekilde yerçekimsel katsayı ile elastik katsayı birbirine yakınlaştırılırsa, potansiyelin eğriliği θ=0'dan sıfıra (0) kadar azaltılabilir. Bu özellik, ters sarkaç sisteminde düşük frekansların (mili Hertz mertebelerinde) elde edilmesine imkanını tanır.

Elastik potansiyel ile yerçekimsel potansiyelin dengelenmesi çok dikkatli bir şekilde ve sadece çok dar bir aralıkta düşük frekansların elde edilmesine imkan tanır. Yerçekimsel potansiyel, Taylor serisindeki $\cos\theta - 1 = -\theta^2/2 + \theta^4/4! - \cdots$ açılımının yalnızca ilk teriminde yaklaşık quadratik bir karakteristiğe sahiptir. Anelastikliğin quadratik terimleri ve yerçekimi iyi bir şekilde eşleştirildiğinde, küçük açılarda V_{net}'in etkin olduğu görülür [21,29].



Şekil 4.3. Bir ters sarkacın normalize edilmiş potansiyel enerji fonksiyonu V/κ (mgL/κ 'ın dört değeri için); (a) mgL/κ=0, (b) mgL/κ=0.99,1.00,1.01 [21]

Şekil 4.3'de L'nin dört değeri için V_{net} gösterilmiştir. Şekil 4.3a, L=0 durumunu yani yalnızca elastik potansiyeli ifade etmektedir. Şekil 4.3b, L=0.99κ/mg durumu, daha quadratik bir formda L=κ/mg durumu ve yerçekimi potansiyelinin "cosin" fonksiyonuna bağlı yüksek terimleridir. Son olarak da; L=1.01κ/mg için V_{net}'i gösterir. θ=0'da kararsız bir durum sözkonusudur. L=κ/mg durumu ideal bir ters sarkaç için kritik bir noktadır. Bu noktanın altında sistem "kararlı simetrik geçişe" girer [17].

4.3. Anelastik Esnek Elemanlı Ters Sarkaç

İdeal ters sarkaç basit bir cihaz olmasına rağmen davranışı incelenmeye değerdir. Bu tür bir sisteme, anelastiklik özelliği gösteren bir yay elemanı yerleştirildiğinde çok daha ilginç davranış cevabı alınabilir. Sistem yay elemanın anelastik davranışından tamamen etkilenir, böylece bu yay elemanının özelliklerin incelenmesine olanak tanır.

Hooke yasası gereği yaydaki kuvvet N=-κθ olarak verilmiştir, bunun yerine anelastik yay davranışı karmaşık sayı olarak ifadesi (genelde frekansa bağımlı) yazılırsa;

$$N = -\kappa[1 + i\theta(\omega)]\theta \tag{4.4}$$

Salınım açısının küçük olması durumunda bu form kullanışlıdır ve buna göre ters sarkacın hareket denklemi;

$$I\ddot{\theta} = -\kappa[1 + i\phi(\omega)]\theta + mgL\theta + N_{ext} \tag{4.5}$$

halini alır.

Karmaşık sayı ifadesiyle yay katsayının yazıldığı bu denklem, frekans alanında transfer fonksiyonu için çözüldüğünde (θ ve N_{ext} 'in $e^{i\omega t}$ gibi değiştiğini kabül ederek)

$$\frac{\theta}{N_{ext}} = \frac{1}{\kappa - mgL - I\omega^2 + i\kappa\phi(\omega)} \tag{4.6}$$

elde edilir. Rezonans frekansı aşağıdaki şekilde verilir.

$$\omega_r^2 = \frac{\kappa - mgL}{I} \tag{4.7}$$

Denklem (4.6)'da sanal terimin paydada bulunması ve bunun yay sabitinin gerçel kısımıyla orantılı olması, sistemin yeni bir özelliği olarak karşımıza çıkar. Birbirine paralel durumundaki elastik yay elemanın transfer fonksiyonu ile ideal bir sönümleyici karşılaştırıldığında,

$$\left(\frac{\theta}{N_{ext}}\right)_{sönümleme} = \frac{1}{\kappa - mgL - I\omega^2 + ib\omega} \tag{4.8}$$

elde edilir. Burada b, sönümleyicinin dinamik sürtünme katsayısıdır.

4.4. Sarkaç Kalite Faktörü ve Hesabı

Kalite faktörü, sarkaç sistemlerinde salınım kalitesini veren bir faktör olarak tanımlanabilir ve Q ile gösterilir. Kalite faktörünün yüksek olması o sarkaçta kullanılan esnek eleman malzeme sönümlemesinin düşük olduğuna dolayısıyla sarkaç salınımlarının, düşük kalite faktörlü sarkaca göre daha uzunca devam edeceği ifade edilebilir. Bu nedenle hassas ölçüm ve düzeneklerde yüksek kalite faktörlü sarkaçlar tercih edilmektedir. Deneysel olarak bu değer, sarkaç yay elemanın iç sürtünmenin bir fonksiyonudur ve ters orantılı şekilde değişir [11,12,14,15,18,20,21,24,25,29].

Kalite faktörü, Q;

$$Q_1 = \pi / \ln(A_n / A_{n+1}) \tag{4.9}$$

olarak hesap edilmiştir.

Burada; A_n ve A_{n+1}, ardışık iki tam salınım tepe noktalarını ifade eder.

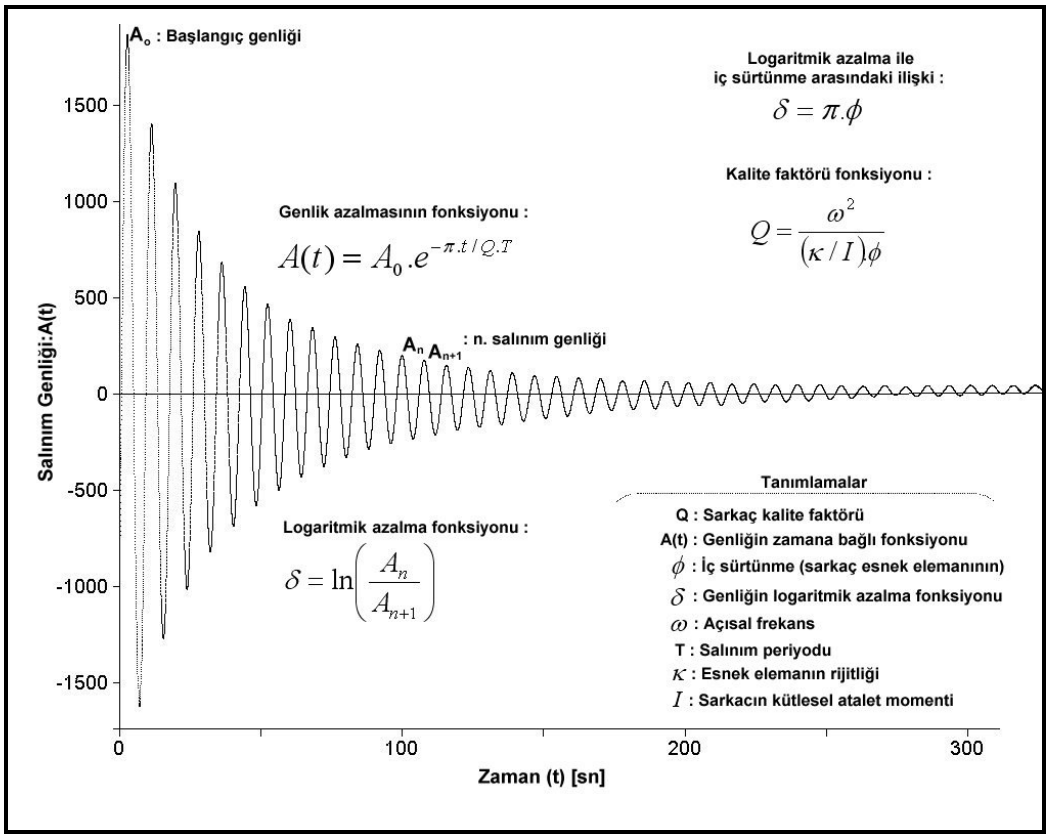
Ters sarkacın kalite faktörü, Denklem (4.8)'nin paydasındaki gerçel kısmın rezonanstaki sanal kısma oranı olarak ifade edilir. Bu faktör, yay malzemesinin iç sürtünmelerinin (ϕ) bir fonksiyonudur [21,29].

$$Q = \frac{\omega_r^2}{(\kappa / I)\phi(\omega_r)} \tag{4.10}$$

Kalite faktörü Q, sarkaç atalet momenti (I), yay malzemesinin rijitliği (k) ve salınım frekansına (ω) göre (4.10) bağıntısıyla ifade edildiği şekilde, malzeme iç sürtünmelerinin bir fonksiyonudur.

L<<κ/mg durumunda yani ters sarkaca yerçekiminin etkisi küçük ise $\omega_r \approx \sqrt{\kappa / I}$ ve $Q \approx \phi^{-1}(\omega_r)$ yazılabilir. Ne zaman ki L değeri κ/mg'ya ulaşır bu durumda ω_r, $\sqrt{\kappa / I}$ 'dan daha küçük olacaktır. Bu rejimde rezonans frekansı, kütle merkezinin yüksekliğine yani L'ye bağlı (κ/I 'ın yaklaşık sabit kaldığı düşünülürse) olacaktır. ω_r'nin değiştirilmesi için L ayarlanacaktır. Bu durumda $Q \propto \omega_r^2$ yazılabilir. Genel bir durum olarak ϕ'nın frekanstan bağımsız olduğunu söylenebilir. Burada Q değeri $\phi^{-1}(\omega_r)$'dan daha küçüktür. Ters sarkaçta bağıl modül hatası (ΔE/E) doğrudan malzeme iç sürtünmesine (ϕ) eşit alınabilir [21,29].

Sarkaç salınımlarıyla ilgili büyüklüklerin nasıl elde edildiği ve bunların birbirleriyle ilişkisi Şekil 4.4'de ayrıntılı şekilde verilmiştir.



Şekil 4.4. Zamana bağlı genlik azalma karakteristiğine genel bir bakış

Kalite faktörünün (Q) sarkaç salınım genliğinin zaman bağlı değişimden elde edilmesinde 3 temel yöntem kullanılır. Bunlardan birincisi; ardışık salınım çevrimlerinin oranı esas alınır. Bu durumda her ardışık 2 salınım için birden fazla Q değeri elde edilmiş olunur (Denklem 4.9). Elde edilen bu değerlerin ortalaması, salınım frekansındaki sarkaç kalite faktörünü verecektir [5,18]. Bu yöntem, çalışmada da uygulanan yöntemdir. İkincisi; salınım tepe noktalarının zamana göre değişim eğrisinin aşağıda verilen Denklem (4.11)'e göre uydurulması suretiyle Q'nun tayin edilmesidir [5,12]. Sonuncu yöntem ise; Denklem (4.12)'in kullanılarak Q'nun elde edildiği metottur [5,11,14,18].

$$Q_2 = A_0 . e^{-\pi . t / Q . T} \tag{4.11}$$

$$Q_3 = n.\pi / \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) \tag{4.12}$$

Burada n, tam salınımların toplam sayısıdır.

Denklem (4.8)'de ifade edilen transfer fonksiyonun faz fonksiyonu için özel bir durumu Denklem (4.13)'de verilmiştir.

$$faz\left(\frac{\theta}{N_{ext}}\right) = \arctan\frac{-\kappa\phi(\omega)}{I(\omega_r^2 - \omega^2)} \tag{4.13}$$

$\omega << \omega_r$ sınır değerlerinde ise;

$$faz\left(\frac{\theta}{N_{ext}}\right) \approx \frac{\phi(\omega)}{1 - mgL/\kappa} \tag{4.14}$$

Böylece, rezonans frekansının altında uygulanan kuvvet ile ortaya çıkan sapma arasındaki fark ölçümü, yerçekimsel ve elastik kuvvetlerin dengesinden gelen faktörlerle birlikte, doğrudan yay elemanın kayıp açısını $\phi(\omega)$ vermektedir. Ters sarkaç, uygulanan gerilme ile şekil değiştirme arasında meydana gelen faz açısını ölçmekte kolaylıkla kullanabilecek bir sistemdir [21].

5. DENEY NUMUNELERİNİN ÖZELLİKLERİ

5.1. Malzeme Özellikleri

Bakır-berilyum alaşımları % 0.6-2 Be ve %0.2-2.5 Co içerir. Çökelti sertleşmesi mekanizmasıyla sertleşebilen bu alaşımlarda, ısıl işlem ve soğuk işlemeyle 1400 MPa civarında dayanımlara ulaşılabilir ki bu, ticari bakır alaşımlarında elde edilebilecek en yüksek değerdir. Cu-Be alaşımları imalat sanayinde kullanılan sert ve kıvılcım çıkarmayan takımların yapımında kullanılır. Diğer metal ve alaşımlara oranla pahalıdır [26].

Bu tür malzemeler yüksek mukavemet (demir dışı metallere oranla), düşük anelastiklik, sürünme ve yorulmaya karşı yüksek direnç özellikleri nedenleriyle kullanılır. Genelde yay malzemesi, esnek metal borular, Bourdon tüpleri, kuvvet ölçer, körük, klips gibi elemanlarda yoğun şekilde kullanılır. Bunun yanında, yüksek aşınma direnci, kıvılcım çıkarmazlığı ve manyetik olmayışı bir çok ölçme elemanının malzemesi olarak seçilmesinde öncelikli özellikleridir. İlave olarak, çok iyi elektrik iletkenliği ve korozyon direnci nedeniyle elektrokimyasal yay elemanı, diyafram, bağlantı köprüleri ve vida olarak kullanılmasına etken olmaktadır [26].

5.2. Yüzey Etkileri

Esnek elemanların gerilme altındaki davranışlarına yüzey durumları etki eder. Numunelerin yüzey durumları ise doğrudan imalat yöntemine bağlıdır. Klasik talaşlı imalat ve aşındırma gibi yöntemler, numune yüzeylerinde gerilme oluşumuna neden olurlar. Bu durum yüzey ve matriste sertlik ölçümüyle kolayca tespit edilebilir. Artık gerilmeye maruz kalmış yüzeyin kalınlığı, imalat yöntemiyle ilgili olsa da kabaca 5 – 10 μm arasında olduğu belirtilmektedir [4,20].

Yüzey durumunun malzemenin eğilme davranışına veya daha özelde anelastik davranışına etkisi önceki çalışmalarla ortaya konulmuştur. Farklı kaplama ve yüzey durumları malzemenin gerilme altındaki dengesini etkiler. Malzeme yüzeyinin iç kısımdan farklı yapıda olması, numunenin iki farklı malzemenin biraraya

getirilmesindeki hareketine benzer davranış göstermesine neden olmaktadır [4,20,22,23].

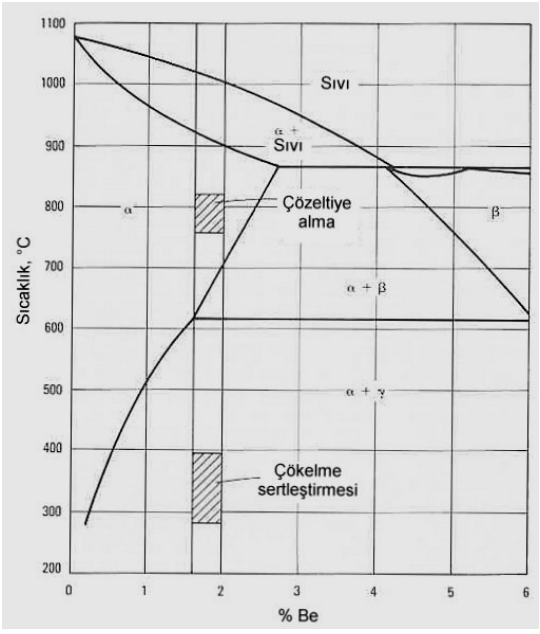
İmalattan etkilenmiş yüzey elektro-parlatma veya çeşitli kimyasal yöntemlerle numune yüzeyinden alınarak kolayca malzeme hareketine etkisi ortadan kaldırılabilir. Tel erozyon gibi klasik olmayan imalat yöntemlerinde kesme işlemi, malzemenin kesilerek değil yakarak yapıldığından, malzemenin kesme yüzeyinde herhangi bir plastik deformasyon farkı oluşturmaz. Yine de bu imalat yönteminde de yüzey ile malzeme içi arasında belirgin farklılıklar oluşur [22,30].

5.3. Isıl İşlemler

Cu-Be malzemesinin genel özellikleri bakır malzemesiyle hemen hemen aynı olmasına karşın temel fark; uygun ısıl işlemle çökelme sertleştirmesi yapılması durumunda çok iyi mekanik özelliklere kavuşturulabilmesidir [26,31].

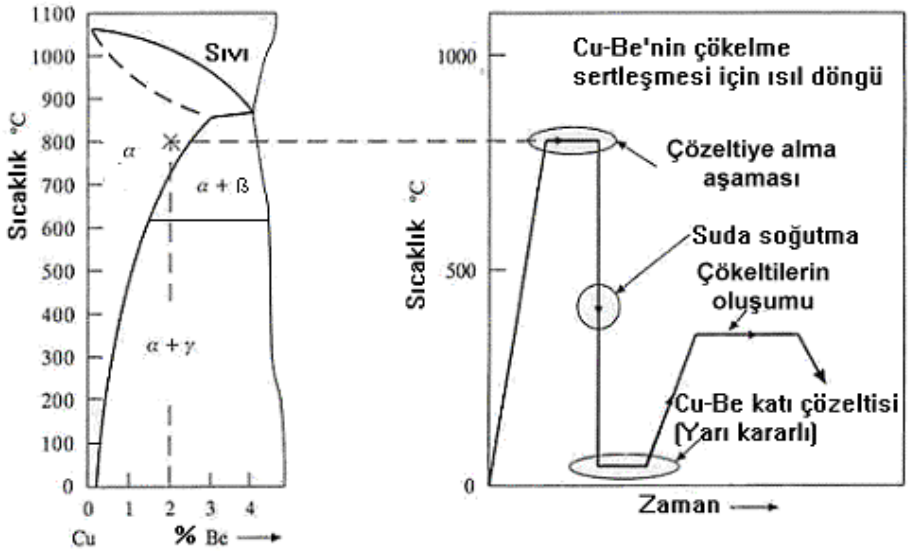
5.3.1. Çözeltiye Alma

Çözeltiye alma ısıl işlemin ilk aşamasını oluşturur. Katı fazdaki malzemenin solvüs eğrisi üzerinde bir sıcaklıkta ikinci fazın birinci faz içerisinde çözülerek tek fazlı (α) katı çözelti elde edilmesi işlemidir (Şekil 5.1) [32].



Şekil 5.1. Cu-Be malzemesinin faz diyagramı [26]

Katı çözelti, Be elementi diğer bileşiklerle beraber küçük çökelti bölgeleri halinde α fazında (matris) çökeltilmesiyle oluşmaktadır. Bu yöntemin uygulanabileceği alaşımlar sıcaklık yardımıyla aşırı doymuş katı çözelti oluşturabilen alaşımlardır. Oda sıcaklığında aşırı doymuş fazdan, zaman ve sıcaklığın ortak etkisiyle çökeltiler elde edilir. Ayrıca bu işlemde çökeltinin boyutu, aralarındaki mesafe ve kafesle olan bağdaşıklığı kontrol edilerek alaşımın sertlik seviyesi ayarlanmaya çalışılmaktadır (Şekil 5.2) [33].



Şekil 5.2. Cu-Be malzemesinin sertleştirme işlemi [26]

Çökelme sertleşmesi 3 aşamada gerçekleştirilir.

1. Çözeltiye alma,
2. Hızlı soğutma ile aşırı doymuş katı çözeltinin elde etmesi,
3. Yaşlandırma mekanizmasıyla istenen özelliklere sahip çökeltilerin elde edilmesi

Çözeltiye alınan malzemede, β fazı α matrisi içerisinde çözünerek tek fazlı bir yapı haline gelir. Bu durumdan hızla soğutulduğunda (su verme) bu faz tekrar oluşmaya zaman bulamaz ve α fazı aşırı doymuş olarak kalır. Alaşım, bu işlem sonrasında oda sıcaklığında uzun süre tutularak doğal olarak, ya da yüksek sıcaklıklarda daha kısa sürelerde tutularak yapay olarak yaşlandırılabilir [32].

5.3.2. Yaşlandırma ve Uzun Süreli Yaşlandırma

Farklı durumlardaki Cu-Be malzemesinin değişik yaşlandırma sıcaklığı ve süresine göre kazandığı mekanik özellikler Tablo 5.1'de verilmiştir [32-34].

Tablo 5.1. Cu-Be malzemesinin mekanik özellikleri (silindirik formda) [26]

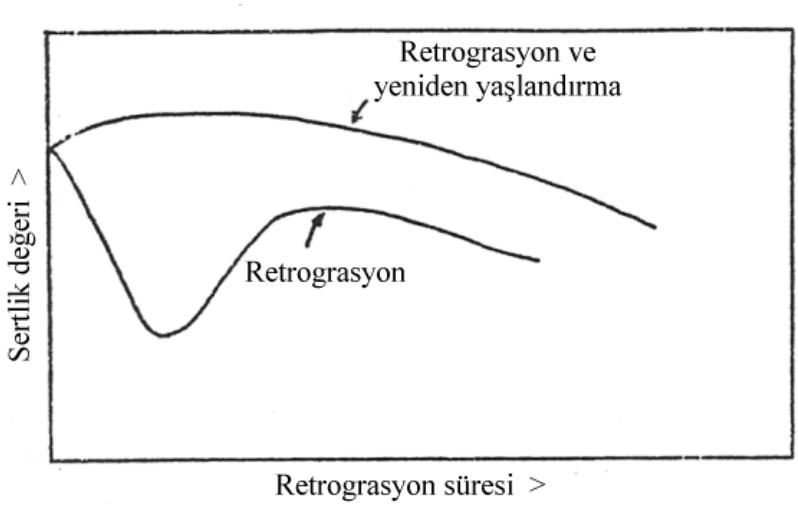
	Çökelme Sertleştirmesi İşlemi		**Mekanik Özellikler**			
Malzeme Özelliği	**Zaman [Saat]**	**Sıcaklık [° C]**	**Çekme Dayanımı [MPa]**	**% 0.2 Akma Dayanımı [MPa]**	**50 mm'de Uzama [%]**	**Sertlik [HRB-C]**
Çözeltiye alınmış	-	-	415-585	185-205	35-60	45-85 HRB
H	-	-	585-895	515-725	10-20	88-103 HRB
Çözeltiye Alınmış (*)	3	315	1140-1345	1000-1205	3-10	36-41 HRC
H (**)	2	315	1205-1550	1035-1380	2-5	39-45 HRC

(*) Optimum dayanımı veren ısıl işlem
(**) Deneylerde kullanılan numunelerin malzeme özellikleri

Yaşlandırma sırasında γ' bağdaşık çökeltileri kritik bir boyuta ulaşır ki yapı maksimum sertlik değerine ulaşır. Yaşlandırma süresinin arttırılmasıyla, çökeltilerle içyapı arasındaki bağdaşıklık kaybolur ve çökeltiler biraraya gelerek malzeme içerisindeki sayıları azalır. Uzun süreli yaşlandırılan numunelerde yapı göreceli yumuşamış bir haldedir. Bu durum malzemenin korozyon dayanımı arttırıcı bir etki yapar. Düşük sıcaklıklarda uzun süre yaşlandırılarak elde edilmiş yapılardaki sertlik değerleri, yüksek sıcaklıklarda kısa süreli yaşlandırmalara oranla daha yüksektir [33,34].

5.3.3. Retrograsyon ve Yeniden Yaşlandırma (RYY)

İlk olarak 1974 yılında Cina tarafından, "Retrograsyon ve Yeniden Yaşlandırma" olarak tanımlanan bir ısıl işlem, 7075 Aluminyum alaşımlarında korozyon direncinin arttırılması amacıyla kullanılmıştır. Yaşlandırılmış durumdaki malzeme yaşlandırma sıcaklığı ile solvüs sıcaklığı arasında bir sıcaklıkta [7075 Aluminyum alaşımı için (200 – 280 ^{0}C)] kısa bir süre ısıtıldıktan sonra malzemenin yeniden yaşlandırılır. Şekil 5.3'te bu işlem grafikte gösterilmiştir. Retrograsyon işleminde sertliğin bir anlık düştüğü kısım için süre bazen saniyeler mertebesinde olabilmektedir. Dolayısıyla bu noktayı yakalamak daha önce bu ısıl işlemin denenmediği malzemeler için çok zordur [35-39].



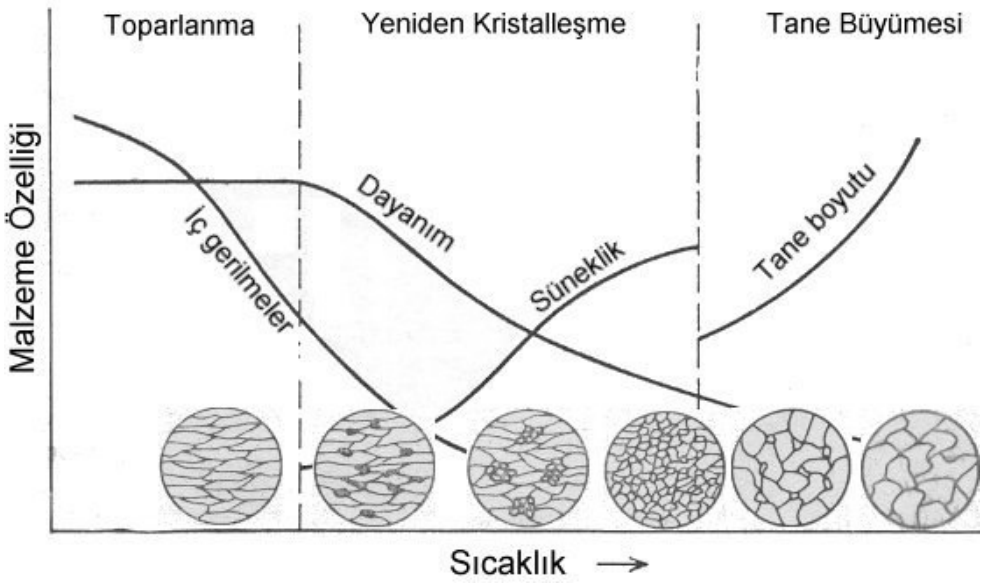
Şekil 5.3.Retrograsyon ve yeniden yaşlandırma (RYY) [35]

Retrograsyon işlemiyle malzemede dislokasyon yoğunluğu hızlı bir şekilde düşer. γ' fazında bir kabalaşma meydana gelir. Özellikle tane sınırlarında meydana gelen çökeltilerin malzemenin anelastik davranışını etkilediği bilinmektedir [12]. RYY ile tane sınırlarındaki çökelti serbest bölgenin (ÇSB) azaltılması ve böylece, tane içi ile sınırları arasındaki yapının homojen hale getirilmesiyle anelastik davranışın iyileşeceği söylenebilir [35-39].

5.3.4. Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı

Numunelerin malzemesine, çözeltiye alma ısıl işleminden sonra % 37 oranında plastik şekil verildiği için, yaşlandırma sıcaklığı civarında iç yapıda yeniden kristalleşmenin başlayıp başlamadığının teyidi için deneyler yapılmıştır. Yeniden kristalleşme sıcaklığı malzemeler için teorik olarak verilse de, malzemenin soğuk çekilme oranına ve içerisindeki elementlerin miktarına göre deneysel olarak tespit edilmesi tavsiye edilmektedir. Soğuk şekil verilmiş bir malzemede toparlanma aşamasında, önce kristal kusurların düzenlenmesi ve kısmen yok olmasıyla mevcut iç enerjide bir miktar düşme, sonra da enerji bakımından zengin dislokasyonların yoğunluğunun şekil değiştirme öncesi değerine dönmesiyle yeni tane oluşumu yani yeniden kristalleşme görülür. Malzemede, toparlanma sırasında iç gerilmeler büyük ölçüde giderilir. Bu aşamada iç yapıda gözlemlenebilir bir değişiklik olmaz. Dislokasyonlar düşük enerji seviyelerine sahip bölgelere kayar dolayısıyla dislokasyon yoğunluğu ve mekanik özelliklerde fazlaca bir değişiklik olmaz.

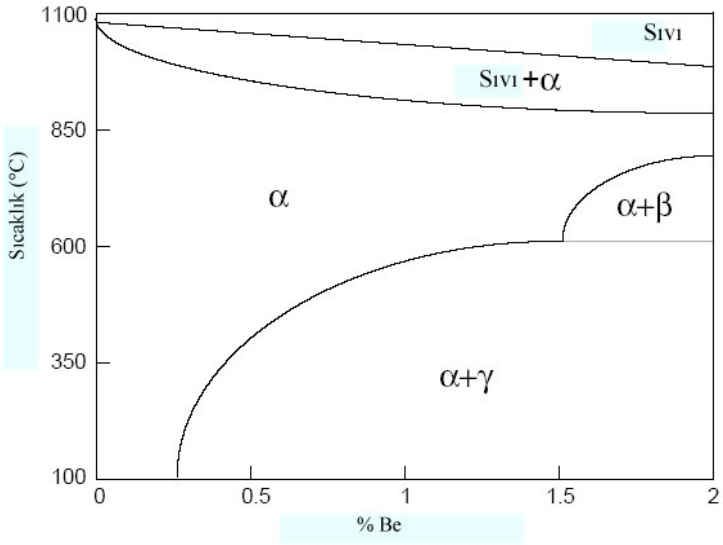
Sıcaklık etkisiyle şekil değiştirmiş yapıda yeniden kristalleşme ile çok küçük yerdeğişimleri yardımıyla gerilimsiz yeni taneler oluşur. Bu aşamada, boşyerler, dislokasyonlar gibi kafes kusurlarının şekil değiştirme sırasında oluşanları giderilir. Dislokasyon yoğunluğu başlangıç seviyesine iner. Bu nedenle sertlik, dayanım ve tokluk özelliklerinde pekleşmenin etkisi ortadan kalkar (Şekil 5.4) [32,40].



Şekil 5.4. Toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi [32]

5.4. Cu-Be Malzemesinin Mikro Yapısal Özellikleri

Cu-Be malzemesi genel olarak yüksek dayanım ve elektriksel iletkenlikleri yönüyle iki ana gruba ayrılabilir. Yüksek dayanım grubunda malzeme % 1.6 – 2.0 ağırlık oranında Be ve % 0.25 Co içerir (Şekil 5.5). Co ilavesi malzemede dökümde ince taneli yapının oluşmasına neden olur. Ayrıca ısıl işleminde tanelerin fazlaca büyümesini engeller, uzun süreli çökelme sertleştirmesinde malzemenin aniden yumuşamasını önler [33].



Şekil 5.5. Cu-Be (UNS 17200) faz diyagramı [26]

Berillit Fazı : Co içeren veya Co ve Ni'i birlikte içeren Cu-Be alaşımları bu elementleri normalde eriyik halde bulundururlar. Berilyumun bileşik yapma eğiliminin yüksekliği nedeniyle bu elementlerle bileşik meydana getirir. Katılaştırma sırasında bu bileşikler, en uzunu 10 μm büyüklüğünde olan parçacıklar olarak ayrılırlar. Bu tür parçacıkların oluştuğu metallerarası bileşiklere Berillit adı verilir. Malzemenin çözeltiye alınma işlemi sırasında kırılabilirler fakat çözülmezler [33-34,41-43].

Dökülmüş Cu-Be malzemesinde berillitler, numune yüzeyi çok iyi parlatıldığında mavi-gri Çin yazıları benzeri bir yapıda görülebilirler. İkincil berillitler ana fazın (Bakırca zengin α) katılaştırma sonrası çubuksu bir yapıda matriste görülebilir. Çekilmiş numunelerde berillitler yaklaşık küresel bir formda mavi-gri renklerde parçacıklar olarak görülebilir [34,41-43].

Beta (β) Fazı : β fazı sıvı fazdan peritektik dönüşümle meydana gelen yapılardır. Yüksek dayanım grubundaki Cu-Be alaşımlarında dökümde bakırca zengin α fazının etrafında dendiritik bir formda görülebilir. Bu yapı oda sıcaklığında ötektoid dönüşümle α ve γ fazlarına dönüştüğünden malzemede β fazı görülmez [33-34,41-43].

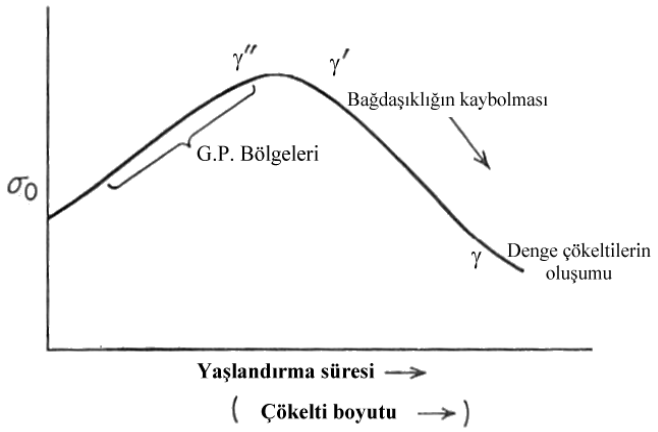
Gamma (γ) Fazı : Bu faz uzun süreli çökelme sertleştirmesi sırasında tane sınırlarından başlayarak tane içlerine kadar devam eden yarı kararlı yapılardır ve

süreksizdir. γ fazı levhalı bir halde görülebilirler. Çökelme sertleştirmesi yapılmış numunelerde tane sınırları matrisle karşılaştırıldığında yumuşak γ fazını içerirler. Yeterince parlatılmış numunelerde daha açık renkteki matrise göre koyu nodüller olarak görülebilirler [33-34,41-43].

Sertleştirme : Cu-Be malzemesine, çökelme sertleştirmesiyle çok iyi mekanik özellikler kazandırılabilir. Dengeli γ yapısından önce yarı kararlı yapılar dönüştürülebilir. Isıl işlem ve sonrasında uygun soğutma ile aşağıdaki dönüşümle çökeltme sertleştirmesi gerçekleştirilebilir [26,32].

Aşırı doymuş çözelti → Guinier-Preston (GP) Bölgeleri → γ'' → γ' → γ

GP bölgeleri (Şekil 5.6) çökelme sertleştirmesi sırasında oluşan tek katmanlı ilk çökeltilerdir ve matrisle bağdaşıktır. Bu yapı, α-matrisinin {100} düzlemine paraleldir. Çökelti ve matrisin bağdaşıklığı ile farklı kafes parametrelerine sahip matriste ve çökelti kafesinde yüksek gerilmeler ortaya çıkar. Bu bağdaşıklık nedeniyle yapı sert bir haldedir. Çökelme sertleştirmesi sıcaklığında malzeme ısıl işleme tabi tutulmaya devam edilirse ısıl aktivasyonla, matristen difüzyonla aşırı doymuş alaşım elementlerin kaybolup küçük çökeltilere dönüşmesine neden olur. Bu durumda aşırı yaşlandırma meydana gelir ve yarı kararlı GP bölgeleri daha kararlı çökeltilere dönüşür. Bu yapılar tane sınırlarında ve tanelerde süreksizdir. Bu oluşumlar malzemenin sünekliğini ve dayanımı düşüren bir faktördür. Yarı kararlı çökeltiler geçirimli elektron mikroskobunda (TEM) görülebilir [33-34,41-43].



Şekil 5.6. Yaşlandırma sırasında malzemede oluşan çökelti formları [32]

6. DENEY NUMUNELERİ VE ÖLÇÜM DÜZENEĞİ

6.1. Deney Planı

Tez çalışmasında, esnek eleman malzeme özelliklerinin anelastik davranışına etkilerinin incelenmesi amacıyla yapılan deneyler ve diğer çalışmalar aşağıdaki plan çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde kullanılacak olan numunelerin malzemeleri, hassas ölçüm ve cihazlarda yaygın şekilde kullanılan Cu-Be alaşımından seçilmiştir. Böylece elde edilen sonuçların daha önce yapılan çalışmalarla da karşılaştırılması mümkün olmuştur. Esnek elemanların içyapı özelliklerinin anelastik davranışına etkilerinin belirlenebilmesi için numunelere farklı ısıl işlemler uygulanmıştır. Toplam 8 grup olarak planlanan bu gruplar 3'er deney numunesi içermektedir. Elde edilen içyapı özellikleri optik ve geçirimli elektron mikroskobu görüntüleriyle teyit edilmiş, sertlik ve diğer mekanik özellikleri belirlenmiştir. Böylece içyapı özelliklerinin esnek eleman anelastik davranışını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Sertliğin anelastik davranışa etkisinin belirlenmesi için bazı gruplarda numuneler aynı sertlikte ama farklı içyapı özelliklerinde elde edilmiştir. Literatürde Cu-Be alaşımına uygulanan standart çökeltme sertleştirilmesine ilave olarak uzun süreli çökeltme sertleştirmesiyle, malzeme içyapısındaki çökelti formları ve özellikleri değiştirilerek anelastik davranışa etkileri incelenmiştir. Literatürde Al alaşımlarına uygulanan retrograsyon işlemi Cu-Be alaşımına da uygulanarak etkileri araştırılmıştır. Soğuk plastik şekil değiştirilerek dislokasyon yoğunluğu arttırılmış numuneler elde edilerek incelenen davranışa etkileri irdelenmiştir. Bu şekilde malzemenin içyapı özelliklerinin değiştirilerek anelastik davranışının istenilen performansta elde edilmesi amaçlanmıştır. Bazı grup numunelerde yeniden kristalleşme sıcaklık noktası araştırılmış ayrıca retrograsyon sıcaklığı ve tutuma süresi konusunda deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylece malzeme tane yapısıyla matris arasındaki homojenizasyonun anelastik davranışı etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Esnek elemanların çalıştıkları mekanizma ve cihazlarda ortaya çıkan gerilme durumunun tam olarak modellenebilmesi için periyodik yüklerin etki ettiği yeni bir düzenek tasarlanmıştır. Literatürde ters sarkaç sistemi olarak bilinen bu düzenekte daha önce uygulanmayan bir bağlantı şekliyle deney numunelerinin montajı gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, daha önceden kullanılan esnek eleman modelleri incelenerek, istenilen gerilme ve rijitlik değerlerinin elde edilebileceği şekilde tasarlanmış ve düzeneğe kolayca montajının yapılabileceği bir halde imal edilmiştir. Deney numunelerinin istenilen tolerans ve değerlerde imal edilebilmesi için araştırmalar yapılarak en uygun üretici ve imalat yöntemine karar verilmiştir.

Deneyler, sıcaklık ve nem kontrollü bir laboratuvarda gerçekleştirilmiştir. Her malzeme grubu için (8 grup) sarkaç kalite faktörüyle bağıl modül hatası belirlenmiştir. 3 malzeme grubu için ise ilave olarak anelastik limit ve gerilme sonrası toparlanma davranışı elde edilmiştir. Bu amaç için her grupta yer alan 3'er deney numunesi sarkacın 2 sn – 30 sn aralığındaki periyotlarda serbest salınıma tabi tutularak salınım genliklerinin zaman göre değişimleri elde edilmiştir. Salınım genliğinin zaman göre değişimleri kullanılarak kalite faktörü ve bağıl modül hataları hesap edilmiştir. Bazı gruplar için gerilmeye bağlı modül hatalarının değişimi incelenerek içyapı özelliklerinin bu limiti değiştirdiği ortaya konulmuştur. Ayrıca yaşlandırılmış Cu-Be alaşımı için daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen bağıl modül kayıpları karşılaştırılarak tasarlanan ve imal edilen yeni ters sarkacın bir tür doğrulaması yapılmıştır.

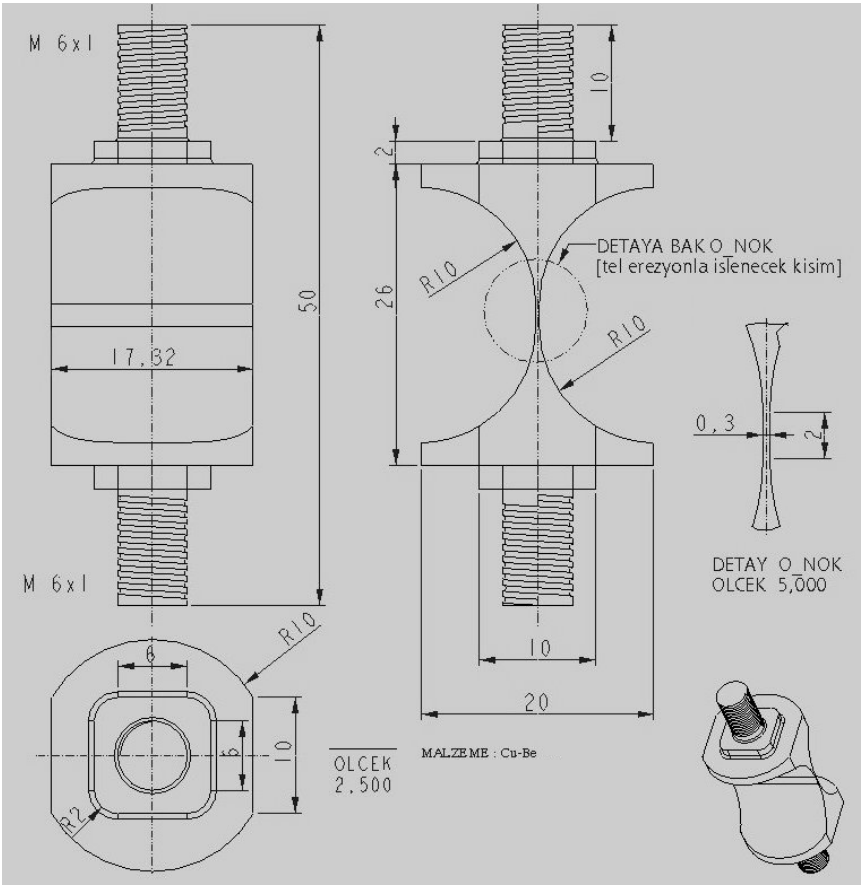
6.2. Deney Numuneleri

6.2.1. Tasarımı

Deney numuneleri esnek elemanların tasarım kriterleri dikkate alınarak, deney düzeneğinde montaj edileceği yere uygun ve simetrik olarak Cu-Be malzemeden tasarlanmıştır. Tasarlanan deney numunesinin rijit bir şekilde diğer parçalara monte edilebilmesi için kare şeklinde ucunda ve sonunda oturma yüzeyleri düşünülmüş böylece, esnek elemanın montajı sırasında inceltilmiş kesite gelebilecek momentler bu yüzeylerde karşılanmıştır. Numuneler her iki ucundan M6 somunlarla düzeneğe bağlanacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 6.1).

Numunelerin inceltilmiş kısmının kalınlığı (t) nominal 320 μ ve boyu (b) 2 mm olacak şekilde belirlenmiştir. İmalat sonrası parçalar CMM cihazıyla ölçülüp bu büyüklükler hesaplamalara katılmıştır.

Esnek elemanın, tasarımı gereğince eğilmeye maruz kalan 2 mm'lik kısmı efektif değer değildir. Çünkü Şekil 6.1'de DETAY O_NOK resminde de görüleceği üzere, kritik kesit keskin bir şekilde bitmemekte, bir miktar daha devam etmektedir. Eğilmeye maruz efektif uzunluk için bazı çalışmalarda [4] mevcut boyun % 25'i kadar ilave uzunluk eklenmiştir. Bu çalışmada CMM cihazından elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan eğrilerin türevleri esas alınmıştır. Böylece türevlerdeki ani artışların olduğu noktalara kadar efektif uzunluk devam ettirilmiştir. Bu varsayım, eğilmeye maruz esnek eleman için yapılan sonlu elemanlar analizinde ortaya çıkan şekil değişimleri grafiği ile de doğrulanmıştır. Kritik kesit formu dikdörtgen formunda tasarlanmıştır.



Şekil 6.1 Deney numunelerinin imalat resmi

6.2.2. Malzeme Özellikleri

UNS kodu C17200 olan Bakır Berilyum (Cu-Be) malzemesine ait kimyasal analiz bilgileri Tablo 6.1'de verilmiştir. Malzeme içerisindeki elementlerin analizi, UME Kimya Laboratuvarları'nda "High Resolution-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (HR-ICP-MS)" marka cihaz ve "US EPA (United States Environmental Protection Agency) METHOD 6020-INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY" metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.1 C17200 kodlu Cu-Be malzemesinin kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimi	% Be 1.92 ± 0.07, % Co 0.17 ± 0.01, % Ni 0.005, % Fe 0.33 ± 0.01, % Pb 0.37 ± 0.01, % Cu 97.2 kalan	**Üretici Firma**	Brush Wellman

6.2.3. İmalatı

Esnek elemanların imalat yöntemleri Bölüm 2'de açıklanmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler Tablo 6.2'de özellikleri verilen tel erozyon tezgahı ile imal edilmiştir. Klasik imalat yöntemleriyle bu tür bir kesim çok zor olup istenmeyen durumlar ortaya çıkarabilir. Bu imalat yönteminde, numunenin her iki tarafında da herhangi bir artık gerilme yığılması meydana gelmeyerek, inceltilmiş kısımda istenmeyen durumların ortaya çıkması engellenmiştir.

Tablo 6.2 Numunelerin imalatında kullanılan tezgahın özellikleri

Tel Erezyon Makinası Markası	SODICK (Japonya)
Modeli	AQ 325 L
Kullanılan Tel	∅ 0.25 mm pirinç tel
İlerleme Hızı	~ 3 mm/dk
Pozisyonlama Hassasiyeti	± 0.001 mm
İlerleme Doğruluğu	± 0.005 mm

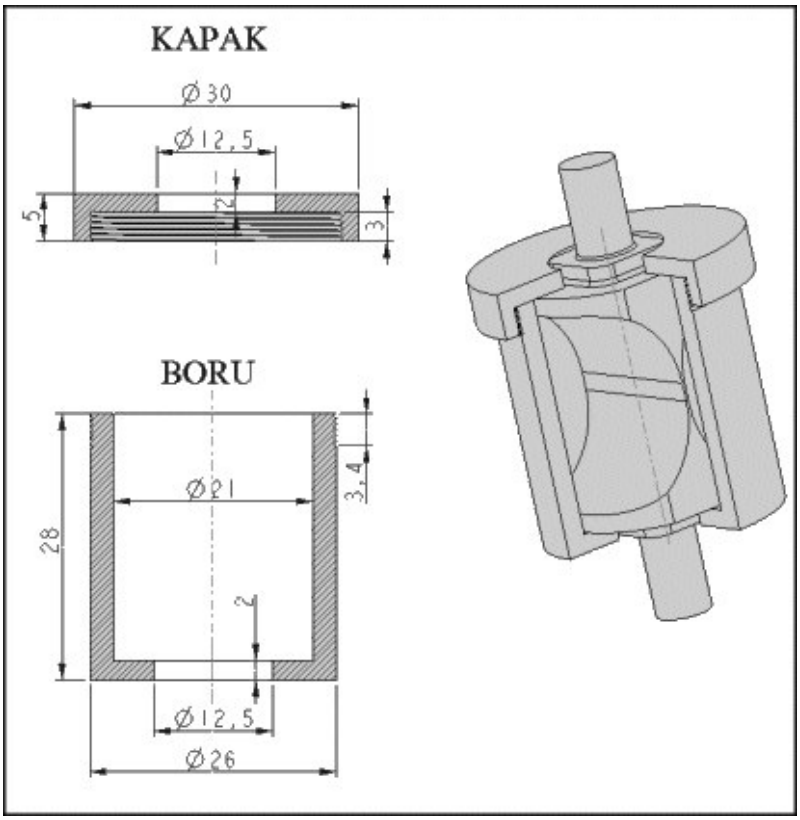
İmal edilen numuneler CMM cihazı ile ölçülmüş, böylece b ve t büyüklükleri tespit edilmiştir. Bu ölçümlerde numunelerin yeterince simetrik kesildiği açık bir şekilde görülmüştür. Bazı numunelerde kesilen her iki kısımda t uzunluklarının farklı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle hesaplamalarda inceltilmiş kesimin boyu, her iki tarafın boy ortalaması olarak alınmıştır.

Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri UME Boyutsal Laboratuvarları'nda, Mahr Perthometer Concept marka pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiş ve

ortalama R_a değeri 1.8 μm olarak ölçülmüştür. Ortalamaya katılan ölçümler üzerindeki belirsizlik ± 0.05 μm'dir. Ölçümlerde kullanılan cihazda "Stylus" uç yuvarlaklık yarıçapı 2 μm, açısı 90 ^{0} ve papuçsuz olarak gerçekleştirilmiş ve Gauss filtresi kullanılmıştır.

6.2.4. Isıl işlemler

Isıl işlemlerde, numuneler fırın içerisinde atmosferik etkilere doğrudan maruz kalmaması ve narin yapısı nedeniyle çarpılma riskine karşın Şekil 6.2'de görülen aparat içerisine yerleştirilmiştir.

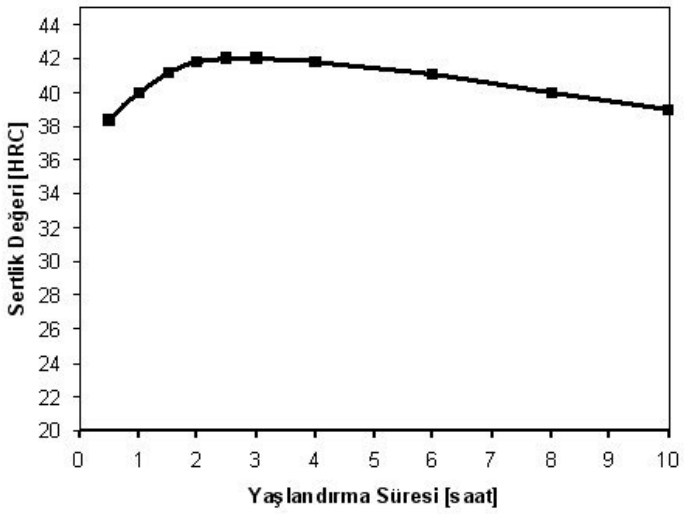


Şekil 6.2. Numunelerin ısıl işlemi için aparat

6.2.4.1. Yaşlandırma ve Uzun Süreli Yaşlandırma

Deney numuneleri çözeltiye alınmış sonra da soğuk çekilmiş halde temin edilmiştir. Numuneler daha sonra, Argon gazı ortamında, iki noktadan sıcaklığın ölçüldüğü Carbolite RHF 1400 marka ısıl işlem fırınında yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Fırında yaşlandırma sıcaklığı ve süresi malzemenin durumuna göre değişmektedir. Çekilmiş numunelerde sertleştirme sıcaklığı daha düşük değerlerdedir [26,33].

Numuneler Cu-Be malzemesi için literatürde verilen yaşlandırma sıcaklığında (315 °C'de) tutulmuştur. Tutma süresinin sertliğe etkisi Şekil 6.3'te verilmiştir. Yaşlandırma eğrisi çıkarılarak, malzeme içerisinde bağdaşık G.P bölgelerinin elde edildiği numune grubu ile bunların sertliğinde fazla bir kayıp olmadan, bu bölgelerin tanelerle çökeltiler arasında bağdaşıklığın kaybolduğu daha kararlı çökeltilere dönüşmüş farklı bir iç yapının elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuçta, 315 °C'de 2 saat tutularak yaşlandırılmış numuneler, diğer grup için de aynı sıcaklıkta 6 saat tutularak uzun süreli yaşlandırılmış olanlar elde edilmiştir.

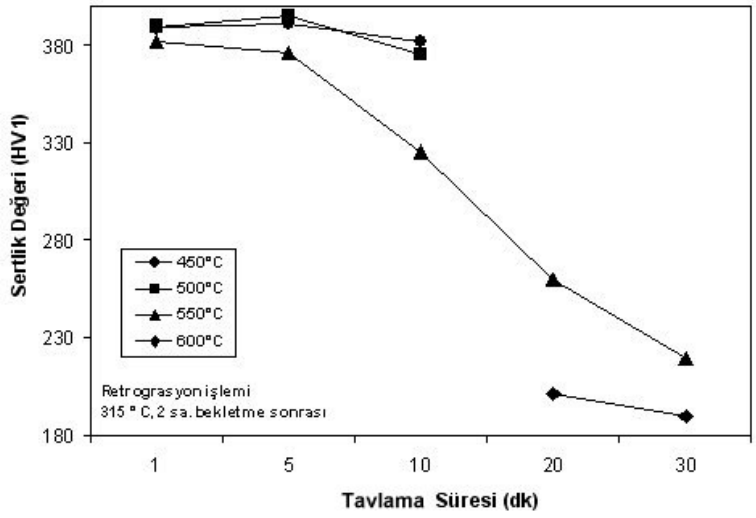


Şekil 6.3. Cu-Be malzemesi için yaşlandırma eğrisi

Farklı durumlardaki Cu-Be malzemesinin değişik yaşlandırma sıcaklığı ve süresine göre kazandığı mekanik özellikler Tablo 6.3'de verilmiştir. Deneylerde kullanılacak numunelerde yaşlandırma işlemiyle elde edilen çökeltilerin ve genel olarak iç yapı özelliklerinin anelastik davranışa etkisinin incelenmesi amacıyla 3 grup numune için farklı ısıl işlemler uygulanarak deney numunesi hazırlanmıştır. İlave olarak, farklı ısıl işlemlerle değişik iç yapı formları elde edilmiştir. Bunlardan ilk 2 grubu yaşlandırma ve uzun süreli yaşlandırma yapılmış numunelerden oluşmuştur. Numuneler yaşlandırma için 315 ^{0}C sıcaklıkta 2 saat tutularak havada soğutulmuş, uzun süreli yaşlandırma için ise 315 ^{0}C sıcaklıkta 6 saat tutma süresi uygulanmıştır. Farklı özellik ve içyapılarda toplam 8 deney numunesi grubu elde edilmiştir.

6.2.4.2. Retrograsyon ve Yeniden Yaşlandırma (RYY)

Deneylerde kullanılacak bazı grup numuneler için retrograsyon uygulanmıştır. Cu-Be malzemesi için retrograsyon sıcaklık ve süresinin literatürde belirlenmiş değerlerine ulaşılamamıştır. Konuyla ilgili yayınlarda [35-39] genelde bu işlemin aluminyum alaşımlarına uygulandığı görülmektedir. Bu işlemde uygulanacak sıcaklık ve tutma süresinin belirlemesi için farklı ısıl işlem sıcaklık ve süreleri uygulanarak numunelerin sertlik değerlerine bakılmıştır. Şekil 6.4'de verilen grafikten de görüleceği üzere, 550 ^{0}C eğrisi Şekil 5.3'deki RYY eğrisine çok benzemektedir. Bu nedenle bir grup deney numunesi için uygulanacak RYY sıcaklık ve süresi 550 ^{0}C ile 20 dk., 550 ^{0}C ile 10 dk., 500 ^{0}C ile 5 dk. olarak belirlenmiştir [44].



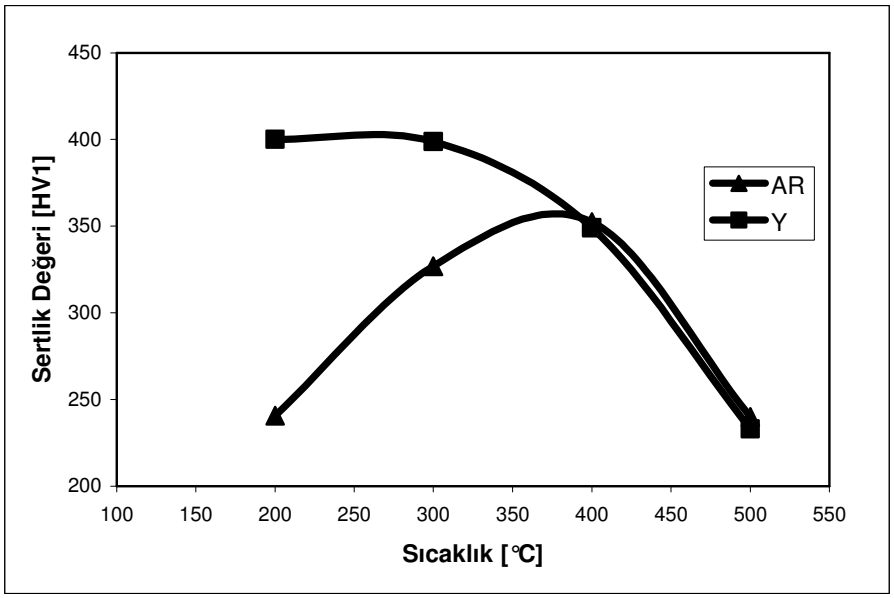
Şekil 6.4.Tavlama sıcaklığı ve süresinin numune sertliğine etkisi

6.2.4.3. Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı

Cu-Be malzemesinin, katı çözeltiye alındıktan sonra çekilmiş (TD04) ve yaşlandırma yapılmış (TH04) hallerindeki yeniden kristalleşme sıcaklığına bakılmıştır. Bu amaçla malzeme 200 °C ile 500 °C arasındaki sıcaklıklarda 1 saat süreyle tutulmuş ve sertliklerine bakılmıştır (Şekil 6.5).

Şekil 6.5'den görüleceği üzere, AR koduyla gösterilen TD04 halindeki numunelerde sertliğin ani düşüşü 350 °C'lerden sonra başlamaktadır. Yaşlandırılmış TH04 halindeki numunelerde ise bu durum 400 °C'ler civarında gerçekleşmektedir. Bu sıcaklıkların bahsedilen ısıl işlem türündeki malzemeler için yeniden kristalleşme sıcaklıkları olduğu söylenebilir. Numunelerin bu sıcaklıkların üstünde sıcaklıklarda

uzunca bir süre bekletilmelerinde ise tane büyümesi olayı meydana gelecektir. Bu durumda malzeme sertliği daha da düşerek minimum seviyelere inmektedir.



Şekil 6.5. Yaşlandırılmış (Y) ve AR kodlu numunelere uygulanan yeniden kristalleşme ısıl işlemi

6.2.5. Numunelerin Mekanik Özellikleri

Deneylere tabi tutulan malzeme gruplarının mekanik özellikleri Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3. Numunelerin mekanik özellikleri

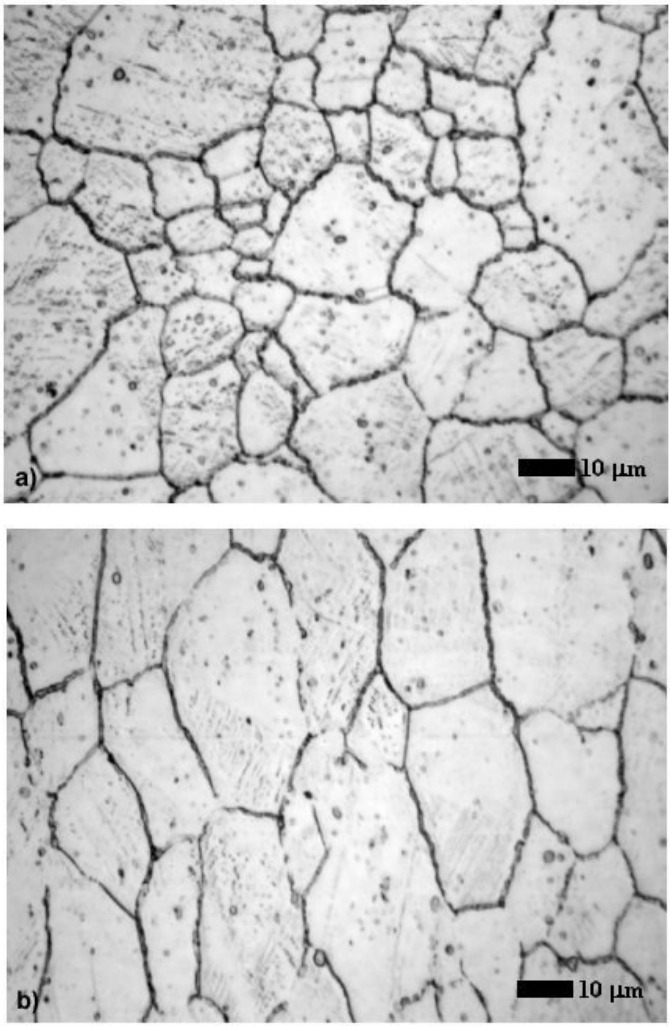
	Isıl İşlem Kodu [ASTM]	**Çekme Dayanımı [MPa]**	**% 0.2 Akma Dayanımı [MPa]**	**Kopma Uzaması [%]**	**Rockwell Sertliği [HRB/C]**	**Vickers Sertliği [HV]**
AR	TD04	680	570	18	90 HRB	187
SA	TB00	620	480	50	65 HRB	114
Y	TH04	1450	1225	3	42 HRC	412
USY	-	1310	1150	3	40 HRC	388
TB1	-	670	520	15	94 HRB	209

AR: Çözeltiye alma sonrası soğuk plastik şekil verilmiş, **SA:** Çözeltiye alınmış, **Y:**Yaşlandırılmış, **USY:** Uzun süreli yaşlandırılmış, **TB1:** Yaşlandırma sonrası tavlama yapılmış.

6.2.6. Optik Mikroskop İncelemesi

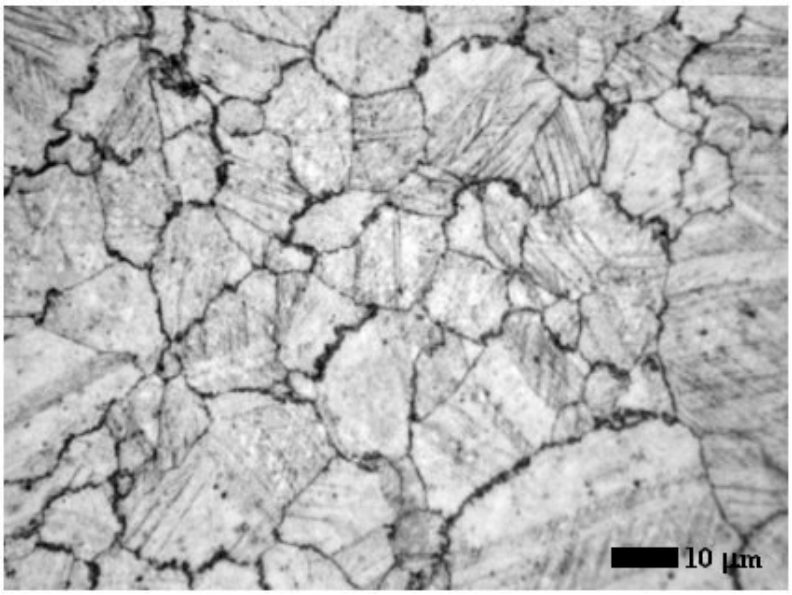
İç yapılar oluşturulmadan önce deneme numuneleriyle malzemenin mevcut durumunun tespiti için TÜBİTAK-MAM'da optik mikroskp incelemesi yapılmıştır. Numuneler, 2 g Cr03 ve 98 mL H_2O'dan meydana gelen dağlayıcı ile elektrolitik olarak dağlanmıştır. NİKON ECLİPSE L150 metalografi mikroskobu ve NİKON COOLPIX 450 dijital kamera kullanılarak görüntüler elde edilmiştir [45].

Malzeme katı çözeltiye alındıktan sonra boyuna % 37 oranında çekilmiş halde temin edilmiştir. Bu durum Şekil 6.6'da numunelerin enine ve boyuna kesitlerinin görüntüleri incelendiğinde rahatlıkla anlaşılmaktadır. İçyapıdaki kobalt berillitler tane içlerinde düzgün şekilde dağıldığı görülmektedir. α-Cu tanelerinin ortalama çapları 20-30 μm'dir (Şekil 6.6-6.7).



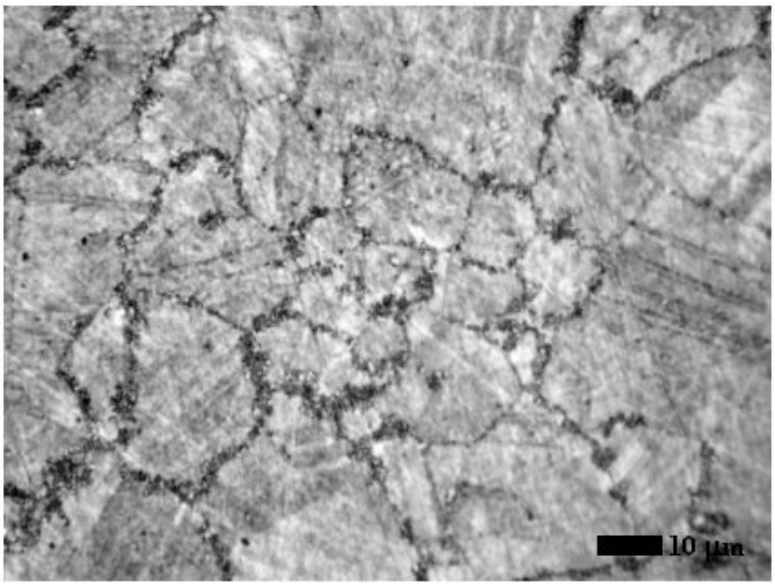
Şekil 6.6.Numunelerin enine (a) ve boyuna (b) kesit görüntüsü

Yaşlandırma işleminde numune, 315 ^{0}C'de ısıl işlem fırınında Argon gazı ortamında 2 saat süre ile tutulmuştur. Ortaya çıkan iç yapı durumu Şekil 6.7'de gösterilmiştir. İkizlenme türü plakalı bir yapı elde edilmiştir. Çökeltiler tane sınırlarında ve tane içerisinde düzgün şekilde dağılmıştır. G.P bölgeleri optik mikroskopla görülemeyen yapılardır. Bu çökelti oluşumları malzemeye sertlik (42 HRC) ve dayanım kazandırmıştır [32,44].



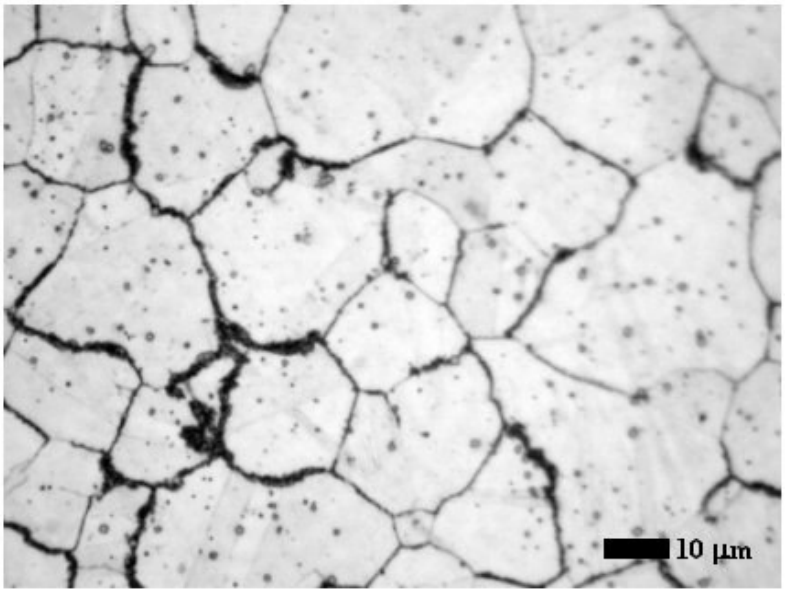
Şekil 6.7. Yaşlandırılmış numunenin iç yapısı (315 ^{0} C'de 2 sa.)

Numunelerin 315 ^{0}C'de 6 saat Argon ortamında ısıl işlem fırınında bekletilmesiyle Şekil 6.8'de gösterilen uzun süreli yaşlandırılmış içyapı meydana gelmiştir. Bu yapıda çökeltilerin özellikle tane sınırlarında bir araya gelip toparlandığı söylenebilir. Böylece çökeltilerin sayısında Şekil 5.7'teki yapıya göre azalma olduğundan malzeme sertliği bir miktar (40 HRC) düşmüştür. Ayrıca G.P bölgelerinin kısmen γ'' ve γ' fazlarına dönüşmesi de bunda etkili olmaktadır. Sertliğin fazla düşmemesinden aşırı yaşlandırmanın tamamen gerçekleşmediği ifade edilebilir. Yapıda, eş eksenli α taneleri ve tane sınırlarında γ (resimde siyah renkte görülen) çökeltileri yeralmaktadır. α taneleri içersindeki damarlı yapı, yarı kararlı çökelme oluşumlarının bir sonucudur [32,44].



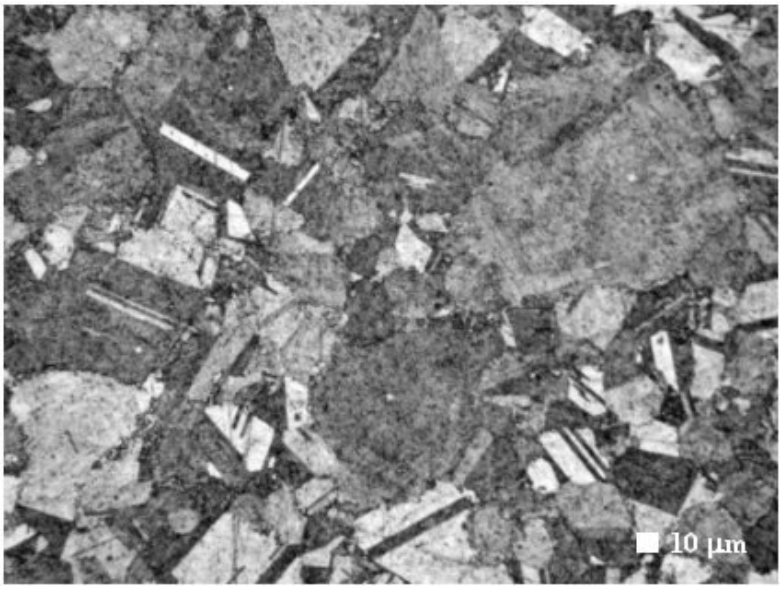
Şekil 6.8 Uzun süreli yaşlandırılmış numunenin iç yapısı (315 ^{0} C'de 6 saat)

Yaşlandırma sonrası numunelerin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde (500 °C'de 5 dk.) kısa süreli bekletilmeleri ve ardından yeninden yaşlandırma işlemi uygulanmasıyla, tanelerin büyümesine zaman bırakılmadan sert bir yapı (40 HRC) elde edilmiştir. Bu iç yapıda, çökeltilerin tane sınırlarında biraraya gelip gruplaştığı görülmektedir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Numunelerde yeniden kristalleşme başlangıcı

Numunelerin yaşlandırma sonrası yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde (550 °C'de 30 dk.) bekletilmesi ve ardından tekrar yaşlandırma işlemiyle yeniden kristalleşme ve tane büyümesi gerçekleşmiştir. Ortalama tane büyüklüğü 20-30 μm'den 40-50 μm'ye çıkmıştır. Numunelerin sertliği 94 HRB seviyelerine gerilemiştir. Bu numunenin içyapısı incelendiğinde, tavlama etkisiyle oluşan ikizlenme rahatlıkla görülebilmektedir (Şekil 6.10).

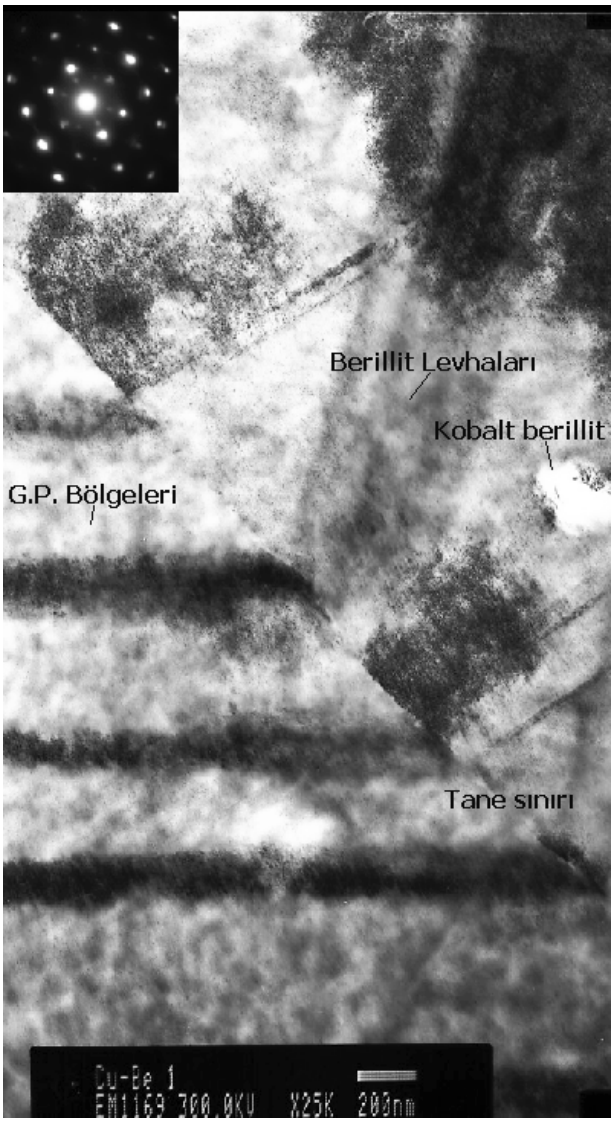


Şekil 6.10. Numunelerde tane büyümesi

6.2.7. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) İncelemesi

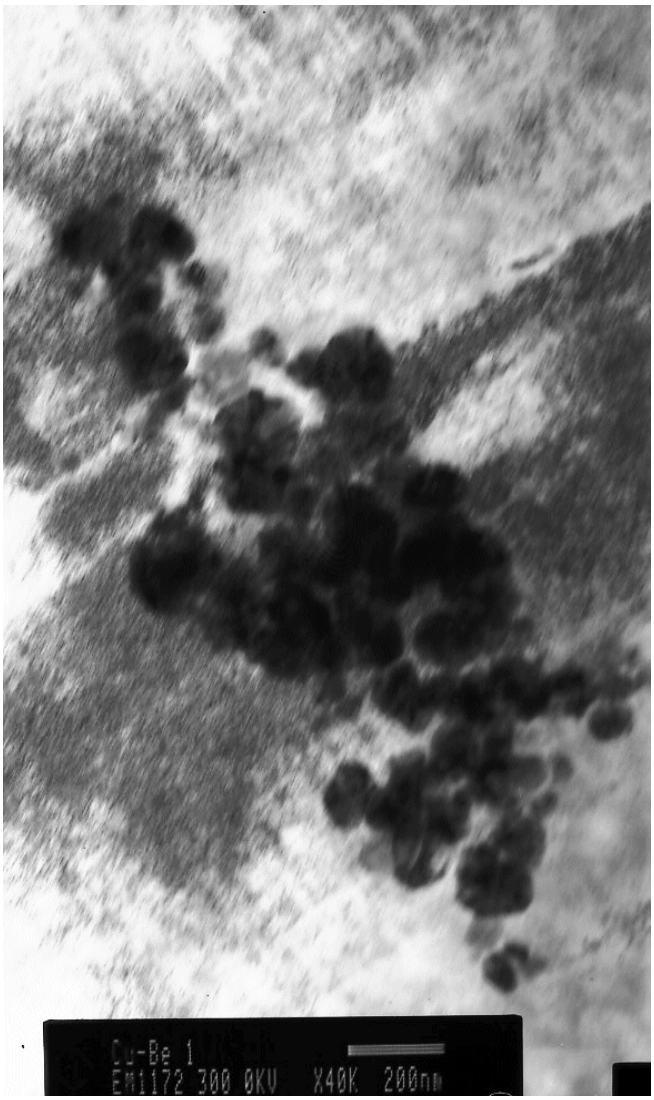
İncelemelerin yapıldığı fotoğraflar, Kırıkkale Üniversitesi Fizik Bölümü Elektron Mikroskobu Laboratuvarı'nın 300 kV hızlandırma gerilimine sahip JEOL3010 TEM, geçirimli elektron mikroskobu kullanılarak elde edilmiştir. Mikroskop için numuneler aynı laboratuvarda hazırlanmıştır.

Yapılar incelendiğinde, optik mikroskobda görülemeyen bazı oluşumlar elektron mikroskobuyla çok rahatlıkla tanımlanabilmiştir. Cu-Be malzemesinin çökeltme sertleştirmesi sırasında oluşan ve malzemenin sertliğinin ve de dayanımının artmasına neden olan G.P. bölgeleri gözlemlenmiştir (Şekil 6.11).



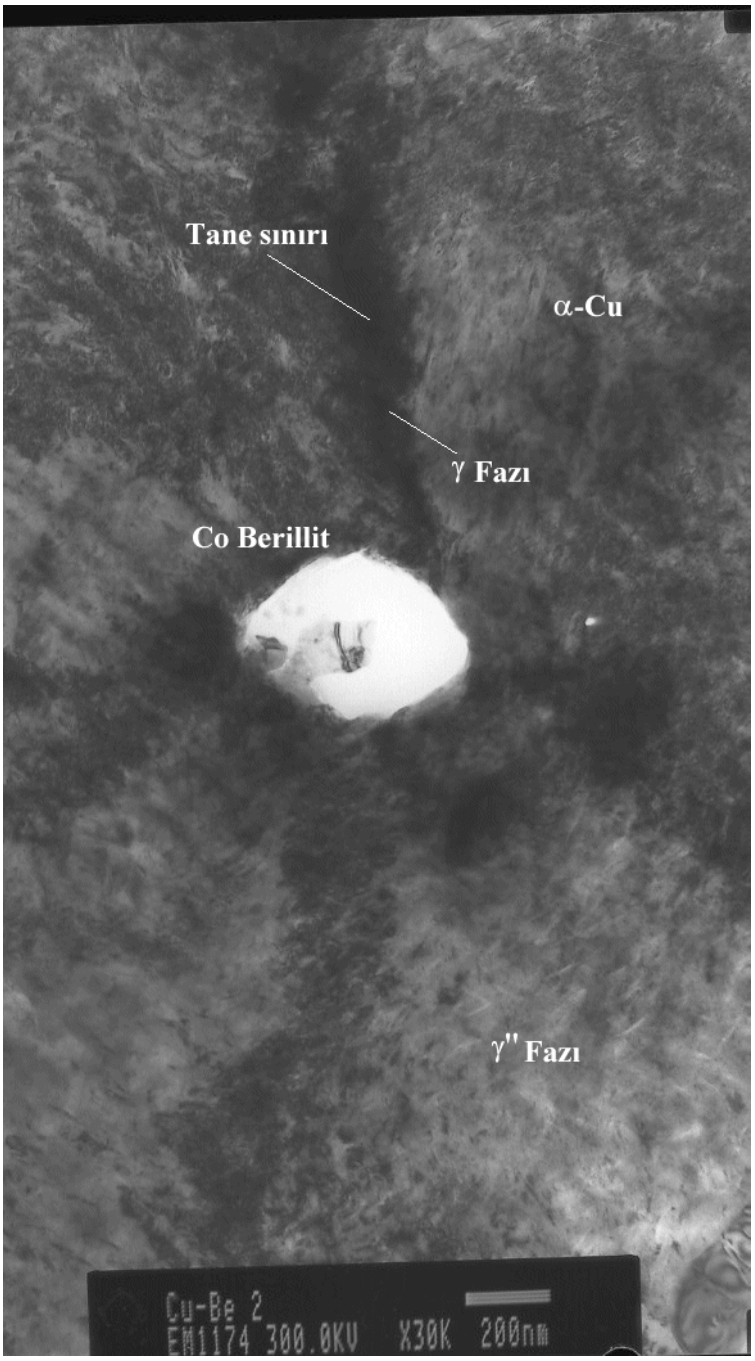
Şekil 6.11. Yaşlandırılmış numunenin elektron mikroskop görüntüsü

Yarı kararlı G.P bölgeleri, malzemenin yaşlandırılması sırasında oluşulan ve malzemeye sertlik kazandıran yapılardır. Şekil 6.11'de TEM fotoğrafında yapının tamamen dönüşmüş olduğu görülmektedir. Berillitler levhalar halindedir. Şekil 6.11'in sol üst köşesinde buradan alınan kırınım deseni görülmektedir. GP bölgeleri levhaların arasında rahatlıkla seçilebilmektedir. Bu bölgeler matris malzemesi ile bağdaşıktır. Yine kobalt berillitler küresel formda matriste dağılmıştır. Şekil 6.12'de yaşlandırma sonucunda çökeltilerin tane içlerindeki dağılımı görülmektedir. 30-50 nm çapında küresel formda ve tanede dağılmış durumdadır.



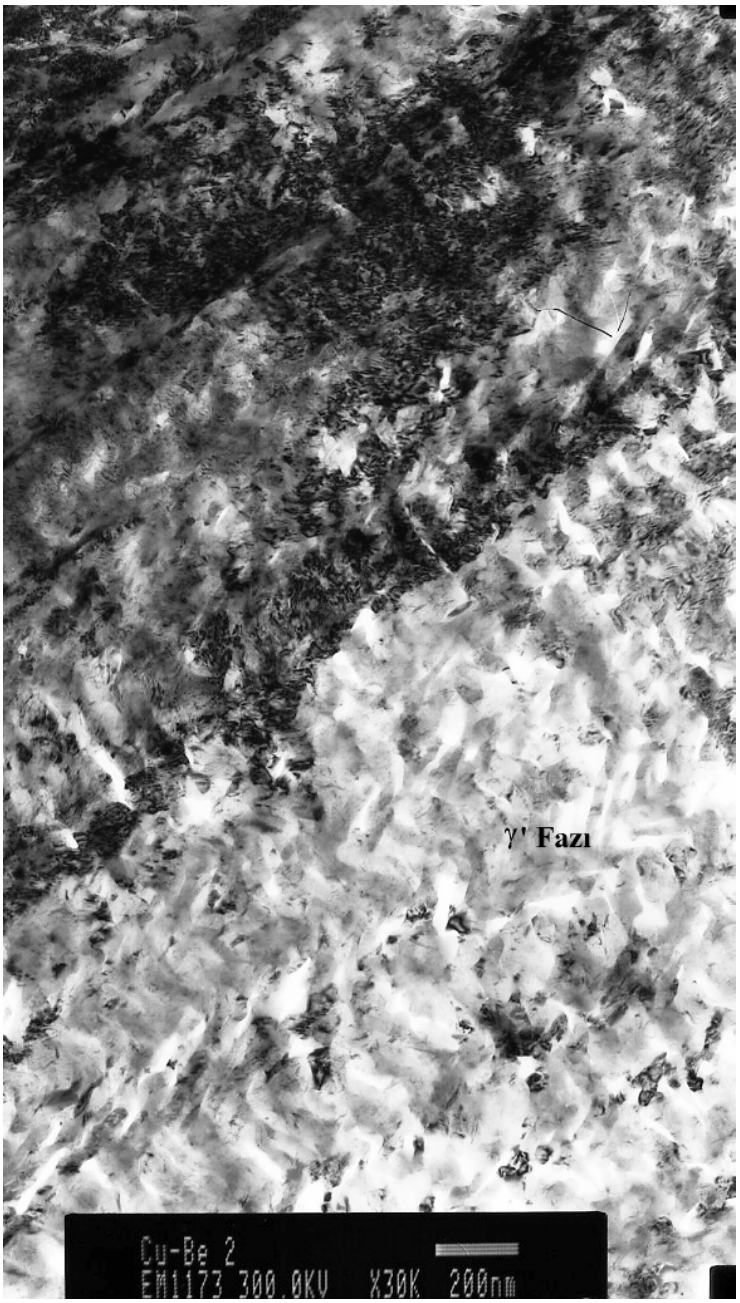
Şekil 6.12. Berillitlerin tane içerisindeki dağılımları

Uzun süreli yaşlandırma ile malzemede oluşmuş olan ve numunelerin iyi mekanik özellikler göstermesine neden olan G.P bölgeleri önce γ'' sonra γ' en sonunda da γ kararlı fazlarına dönüşmektedir. Tane sınırlarında oluşan bu faz, Şekil 6.13'de rahatlıkla görülebilmektedir. Şekil 6.13'de, tanelerin birleştiği kesişme noktasında yaşlandırma sırasında oluşan kobalt berillitlerin bir araya gelip daha büyük (200-250 nm) çaplarda küresel çökeltiler olarak yerleştiği görülmektedir. Bu durum çökelti miktarının azalmasına, bir araya gelmeleri nedeniyle büyüklüğünün artmasına dolayısıyla da sertliğin düşmesine neden olmaktadır.



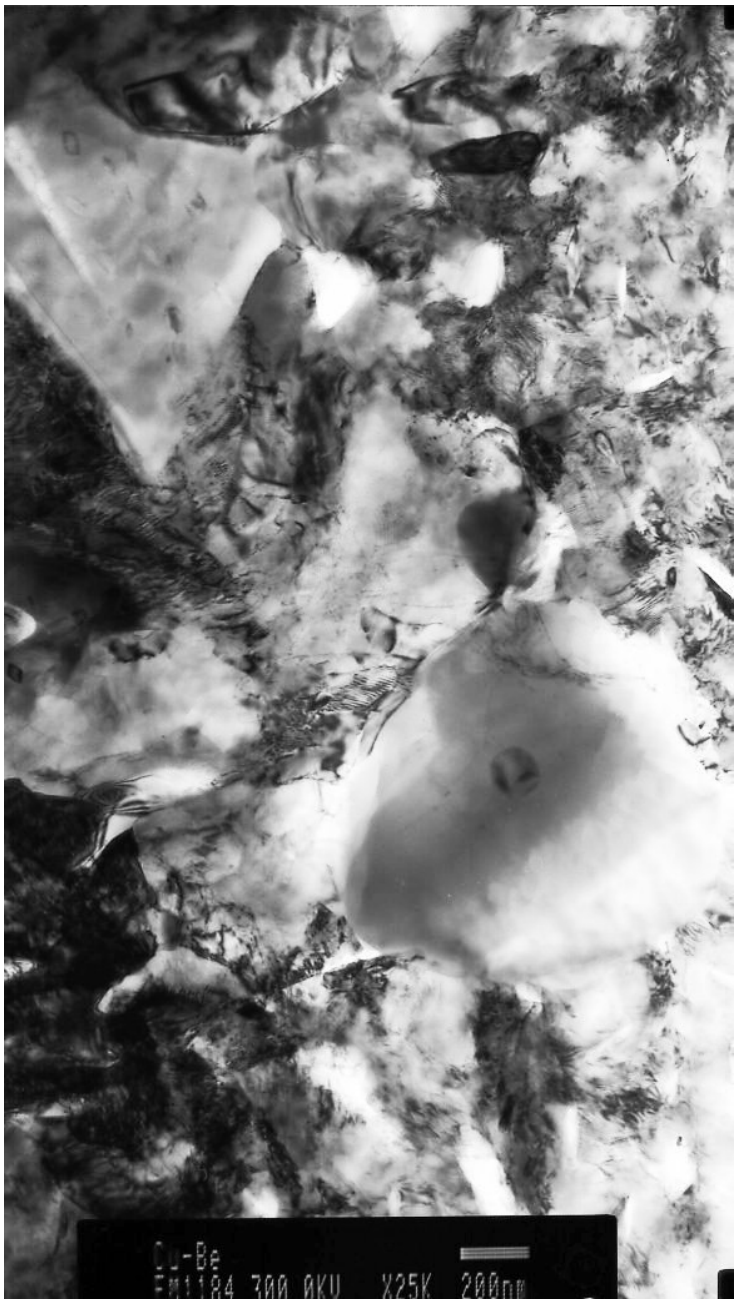
Şekil 6.13. Uzun süreli yaşlandırılmış numunenin geçirimli elektron mikroskop görüntüsü

Uzun süreli yaşlandırılmış numunelerde γ' fazının tane içlerinde Widmanstätten deseni (araç tekerlek izi benzeri) oluşturacak şekilde dağıldığı görülmektedir (Şekil 6.14) [42].



Şekil 6.14. Yapıda Widmanstätten deseni

Yaşlandırma sonrası tavlama ile (TB1) Şekil 6.14'de verilen yapı bozulmaya başlar. Tanelerdeki büyümeyle birlikte, yapıda küresel formdaki kobalt berillitlerin geometrisi değişime uğrar ve bir araya gelmeye devam ederek çökeltilerin yer yer büyümesine neden olur (400-500 nm) (Şekil 6.15).



Şekil 6.15. TB1 numunelerin TEM fotoğrafı

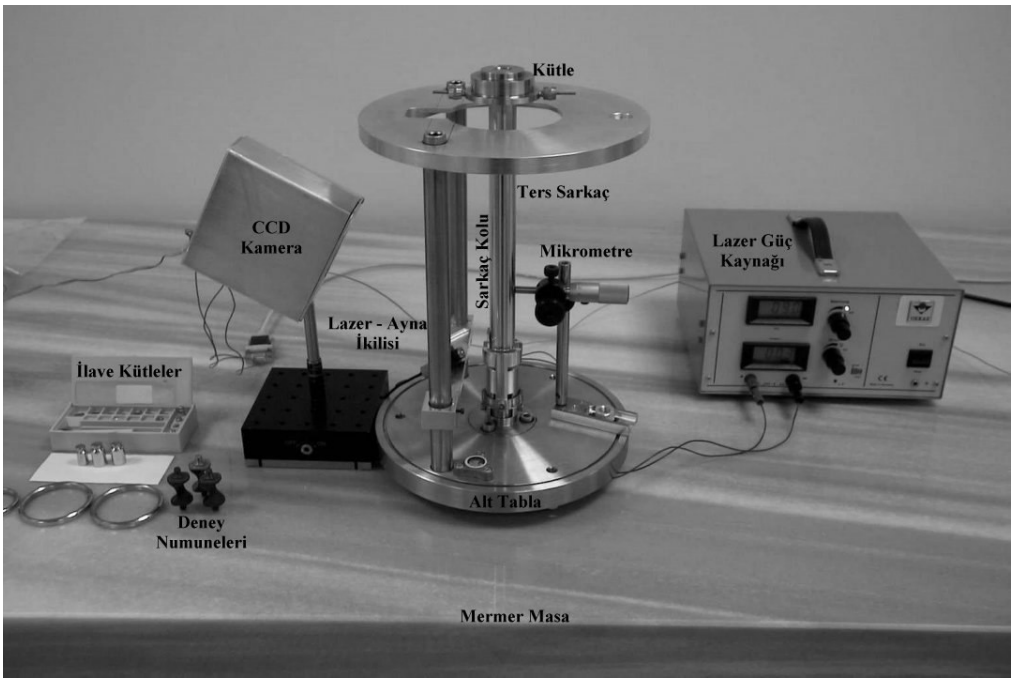
Uzun süreli yaşlandırma işlemi sonrası ortaya çıkan γ fazları, yaşlandırma sonrası tavlama işlemi uygulandığında tane içerisinde bozulur (Şekil 6.16).



Şekil 6.16. Yaşlandırma sonrası tavlama ile yapıdaki bozulma

6.3. Ölçüm Düzeneği

Ters sarkaçda salınım frekansının asıldığı ağırlığa göre değişmesi, bu tür sarkaçların anelastik ölçümlerde kullanımında büyük yarar sağlamaktadır. Tasarlanan düzenekte (Şekil 6.17) istenen frekansın ayarlanabilir ve sistemin imal edilip ölçmeyi mümkün kılması gerekmektedir. Bu amaçla tasarlanan ve imal edilen yeni ters sarkaç, istenilen periyotlardaki (2 s ~ 30 s) ölçümler için uygun bir düzenektir.

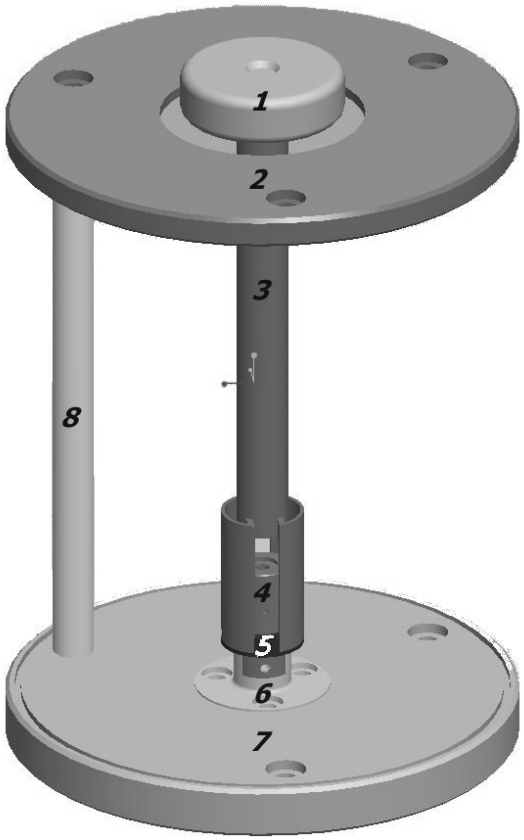


Şekil 6.17. Deney düzeneğinin fotoğrafı

6.3.1. Mekanik Tasarım

Düzeneğin mekanik kısmı "ProEngineer" CAD/CAM yazılımı kullanılarak özgün bir şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan parçalar daha sonra montaj yapılmıştır. Parçaların imalatında klasik imalat yöntemleri kullanılmıştır. Düzenekte kullanılan tüm parçalar manyetik olmayan malzemeden imal edilmiştir.

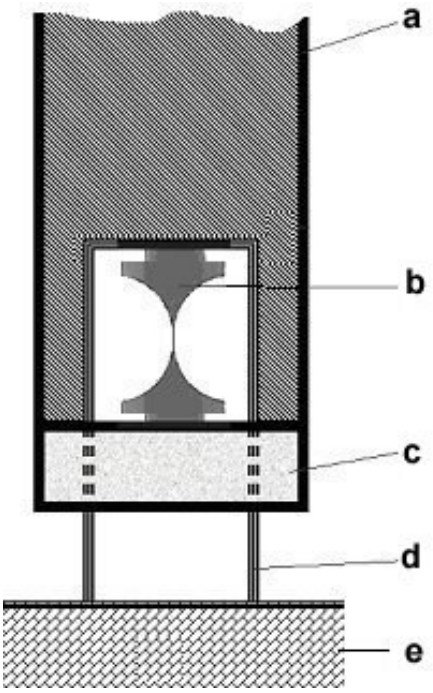
Düzeneğin sarkaç kısmındaki esnek eleman deney numunelerine istenilen gerilme büyüklüğünün verilebilmesi için, ProMechanica yazılımının sonlu elemanlar modülünde analiz ve simülasyonlar yapılmıştır. Sarkacın CAD görüntüsü Şekil 6.18'de görülmektedir. Aynı görüş açısında düzeneğin montaj halinin kesiti ise Şekil 6.20'de verilmiştir. Esnek elemanın sarkaç koluna bağlantı şekli Şekil 6.19'da gösterilmiştir.



Parça No	Parça İsmi	Malzeme	Adet
1	Kütle	Paslanmaz Çelik	1
2	Üst Tabla	Duraluminyum	1
3	Sarkaç Kolu	Duraluminyum	1
4	Tutucu	Paslanmaz Çelik	1
5	Kapak	Paslanmaz Çelik	1
6	Tutaç	Paslanmaz Çelik	1
7	Alt Tabla	Paslanmaz Çelik	1
8	Ara Parça	Paslanmaz Çelik	3

Şekil 6.18. Düzeneğin genel perspektif görüntüsü (CAD)

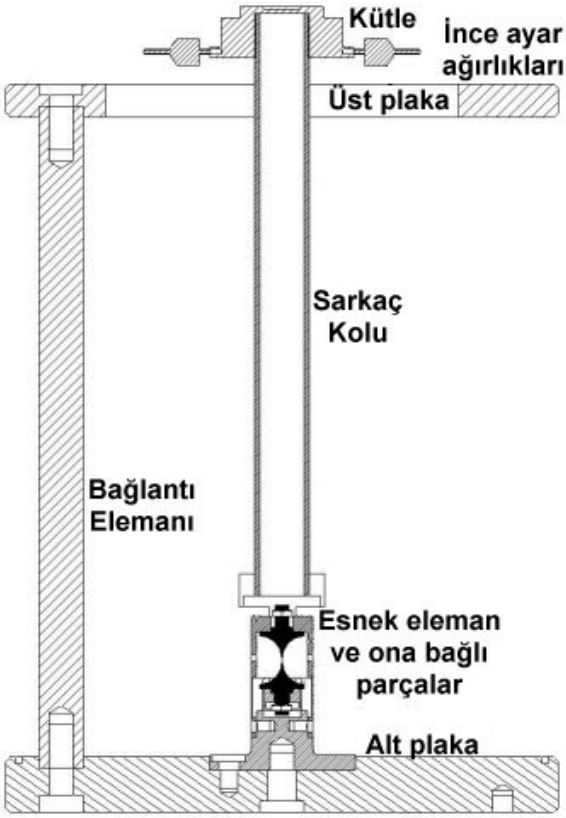
Sarkacı oluşturan parçalar ve malzemeleri Şekil 6.18'de belirtilmiştir. "7" numaralı parça 3 no.lu sarkaç kolunun salınım hareketi sırasında, yeterince rijit durması için ağır olacak şekilde tasarlanmıştır. 2 numaralı üst tabla ise sisteme yerleştirilecek ilave ekipman ve cihazlar için yapılmış ve bu nedenle de malzemesi aluminyum seçilmiştir. Sarkaç, 3 adet (Şekil 6.18'de "8" ile gösterilmiştir) çubuk ile desteklenmiştir. Tüm parçalar birbirlerine uygun civatalarla rijit şekilde bağlanmıştır.



Şekil 6.19. Esnek elemanın sarkaç koluna bağlantı şekli

Bu çalışma kapsamında tasarlanan yeni ters sarkaçta sarkaç kolunun (Şekil 6.19'da (a) ile gösterilmiştir) esnek elemana (b) bağlantısı benzer uygulamalardan [21] farklı şekilde yapılmıştır. Buna göre; esnek elemanın üst yüzeyi, ayakları alt plakaya (e) rijit şekilde bağlı tutucuya (d), kapak (c) adlı elemana hiçbir teması olmadan bağlanmıştır. Esnek elemanın diğer yüzeyi (alt kısmı), sarkaç koluna bağlı Kapak'a monte edilmiştir. Böylece esnek eleman (b) üzerinde yük nedeniyle basma gerilmesi altında kalmaktan kurtarılmıştır.

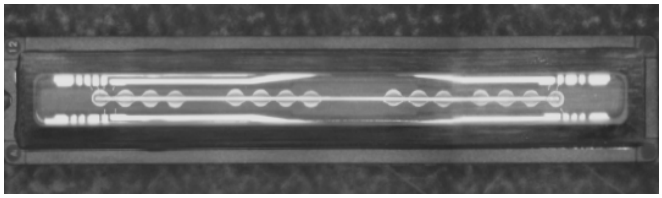
Sarkacın salınım hareketi öncesinde, tam bir merkezleme yapılabilmesi için 1 numaralı kütleye (Şekil 6.18) küçük ayar ağırlıkları monte edilmiştir. Yine aynı amaç için 7 numaralı parçanın (Şekil 6.18) altına 3 adet yükseklik ayar vidası konulmuştur. Böylece sistemin hareket öncesi tam bir merkezleme (dikey ve yatay) sağlanmıştır (Şekil 6.20).



Şekil 6.20. Ölçüm düzeneğinin kesit resmi ve parçalar

6.3.2. Optik

Ölçüm düzeneğinde, esnek elemanın bağlı olduğu 3 numaralı sarkaç kol (Şekil 6.18) hareketinin takip edilebilmesi için lazer-ayna-CCD kamera (Şekil 6.21) üçlüsü kullanılmıştır. Bu amaçla ayna sarkaç koluna yapıştırılarak tutturulmuştur. Lazer ile ayna arasındaki açı 90^{o} olacak şekilde üst ve alt tablaların birbirine tutturulduğu 3 adet çubuğun ikisine monte edilmiştir. CCD kamera da aynadan gelen lazer ışınını algılayacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 6.21. CCD kameranın aktif bölgesinin fotoğrafı

Kullanılan CCD kamera (Şekil 6.21) TÜBİTAK-UEKAE Optoelektronik Birimi'nce geliştirilmiş ve imal edilmiş olup, genel özellikleri Tablo 6.4'de verilmiştir. CCD kameranın çıkış verileri, RS-232 iletişim protokolü ile bilgisayar tarafından kaydedilmiştir.

Tablo 6.4. Düzenekte ölçüm elemanı olarak kullanılan kameranın özellikleri

Piksel sayısı	5150
Kamera tipi	Tek renkli (Monochrome)
Aktif piksel	5150×1
Piksel boyutu	$7\ \mu m \times 7\ \mu m$
Maksimum tarama	16 Mhz
Video çıkışı	8 bit ve 10 bit dijital analog yapı
Diğer özellikleri	Toplama zamanı, sinyal kayması, ışığa maruz kalma kontrolü ve senkronizasyon parametreleri cihaza özel yazılan kod ile programlanabilir.

6.3.3. Dinamik

Sistemin dinamiği denklem (4.1) ile ifade edilmektedir. Esnek elemanın potansiyel enerjisi pozitif olacak şekilde, yer çekimi etkisiyle dengelenmeye çalışılmaktadır. Sarkacın periyodu, dışarıdan herhangi bir dış eleman olmadan tamamen mekanik olarak ayarlanabilmektedir. Böylece ölçümlerde ortaya çıkan belirsizlik en aza indirilmiştir.

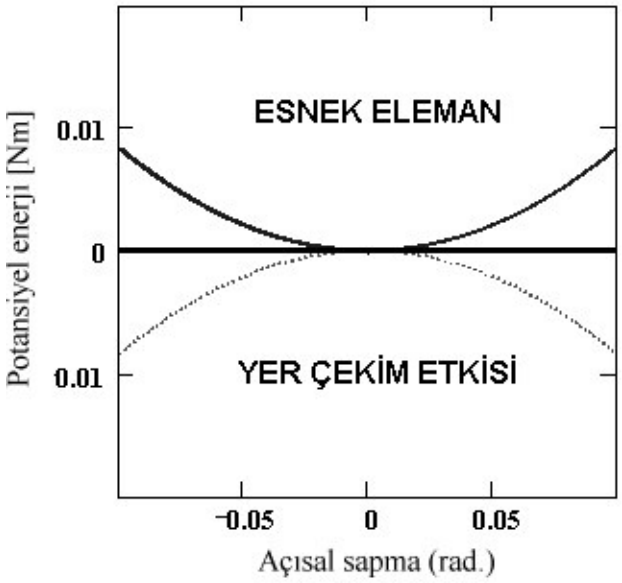
6.3.3.1. Esnek Elemanın Rijitliği

Esnek elemanın gerilme altındaki dinamiğini etkileyen ana parametrelerden biri rijitliğidir. Genel olarak, bir esnek elemana etkiyen momentin meydana getirdiği sapma açısına oranı o elemanın rijitliğini verir ve [N.m/rad] biriminde ifade edilir [2].

Denklem (2.1)'de çekme gerilmesi altında eğilmeye çalışan esnek eleman modeli [1] kullanıldığında ve 0.5 kg yük altında ve 0.2 radyan açısal sapmada tasarlanan esnek elemanların rijitlikleri (2-3) Nm/rad. aralığında değişmektedir (her numunenin boyutsal bilgileri birbirlerinde farklı olduğundan). Yine farklı kaynaktan [2] aynı şartlarda esnek elemanın rijitliği Denklem (2.11)'e göre hesap edilerek benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

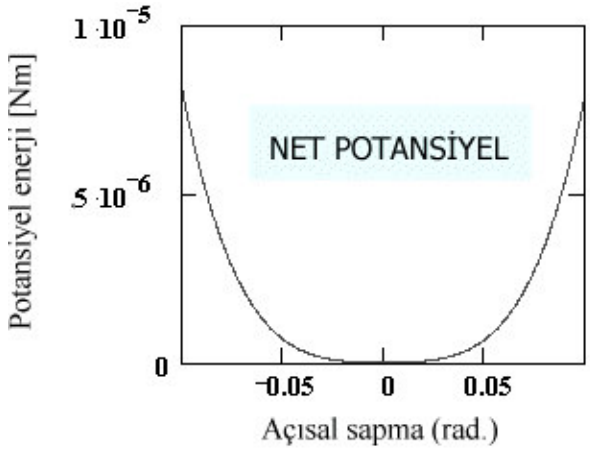
6.3.3.2. Sistemin Periyodu ve Ayarlanması

Tasarlanan sistemde, periyot (ya da frekans) tamamen mekanik olarak ayarlanabilmektedir. Ters sarkaçta frekans, Bölüm 4'de açıklanan temel kavramlar çerçevesinde çok düşük seviyelere düşürebilmektedir. Özellikle bu çalışma kapsamında incelenmek istenen 2 s ile 30 s aralığındaki periyotlar rahatlıkla elde edilebilmektedir.



Şekil 6.22. Potansiyel enerjilerin dengelenmesi

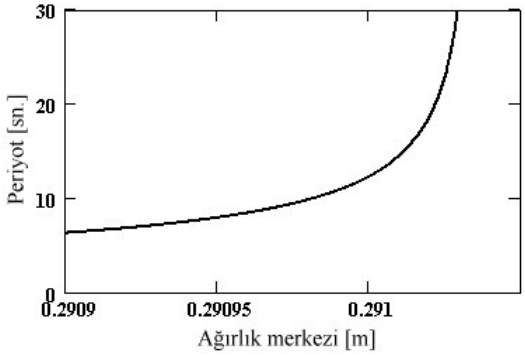
Esnek elemanın potansiyel enerjisi ile yer çekimi etkisiyle "yerine getirme" potansiyeli uygun şekilde dengelendiğinde, sistem sanki duruyor gibi hareket etmekte bu da istenilen periyotlara çıkmayı olanaklı kılmaktadır. Şekil 6.22'de görülen grafikte deney düzeneğinin potansiyel enerjilerinin sistemin açısal sapmasına göre değişimi verilmiştir. Sıfır (0) çizgisinde net potansiyel enerjisi yaklaşık düz çizgi halini almaktadır. Bu, ortaya çıkan net potansiyel enerjinin [Denklem (4.2) kullanılarak hesap edilmiştir] düşük seviyelerde olmasından kaynaklanmaktadır. Bahsedilen bölgenin ölçeği genişletilirse Şekil 6.23'deki grafik elde edilir.



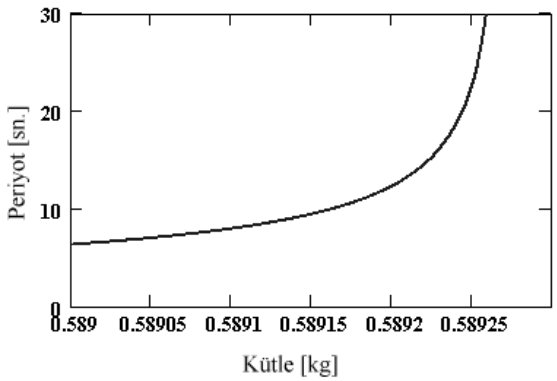
Şekil 6.23. Net potansiyel enerji

Şekil 6.23'de görüldüğü gibi net potansiyel pozitiftir ve esnek eleman yönündedir. Yani sistem, verilen açısal sapmalarda tekrar eski pozisyona gelmeye çalışacaktır. Uygun açı ve değerlerde sistem durağana yakın hareket edecek bu da yüksek periyotları (30 sn. gibi) elde etmemizi sağlayacaktır.

Sistemde periyot ayarlaması için 2 ana yöntem kullanılabilmektedir. Birincisi; salınıma tabi çubuğa asılı kütlenin ağırlık merkezinin esnek elemana göre yerinin değiştirilmesidir (Şekil 6.24). Diğeri ise, asılı kütlenin ağırlığının değiştirilmesidir. Bu iki yöntemden tasarım ve doğruluk açısından en uygun olanı; ağırlığın yerinin değiştirilmesi yöntemidir. Mekanik tasarım yönüyle düşünüldüğünde, Şekil 6.24'de ifade edilen kütlenin ağırlık merkezinin değiştirilmesi Şekil 6.25'de tarif edilen yönteme göre daha zordur. Deneyler sırasında farklı periyotlar, sarkaç kütlesinin üzerine kalibreli kütlelerin ilave edilmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 6.24. Kütle ağırlık merkezinin periyoda etkisi



Şekil 6.25. Kütle ağırlığının periyoda etkisi

Sistemin rezonans frekansı Denklem (4.7)'ye göre hesap edilir. Periyot ise bu frekansın tersidir. Sarkacın Q kalite faktörü farklı frekanslar için serbest salınım davranışı incelenerek hesap edilmiştir.

6.3.3.3. Kütlesel Atalet Momenti

Sistemin kütlesel atalet momenti, ProEngineer CAD/CAM yazılımının sonlu elemanlar analiz modülü kullanılarak hesap edilmiştir. Sistemin hareketi sırasında Bölüm 2'de bahsedildiği şekilde efektif moment noktası değişmektedir [2]. Moment noktası hesaplamalarda sabit bir nokta olarak esnek elemanın merkezi alınmıştır. Sistemin esnek elemanın merkezine göre kütlesel atalet momenti, 0.0295 $kg.mm^2$ olarak elde edilmiştir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Ters sarkaçla yapılan deneyler TÜBİTAK-Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Kütle Standartları Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarın deneyler sırasındaki ortalama çevresel şartlar Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1. Deneyler sırasındaki laboratuvar şartları

Laboratuvar Sıcaklığı	(20.0 ± 0.5) °C
Atmosfer Basıncı	(995.0 ± 5.0) mbar
Bağıl Nem	% (45.0 ± 5.0)

Çeşitli ısıl işlemlerle farklı iç yapılarda elde edilen numuneler, tamamen özgün tasarlanan ve optik ölçme sistemiyle donatılan düzenekte deneylere tabi tutulmuştur. Farklı iç yapılara sahip Cu-Be malzemesinden imal edilmiş numunelerin elastik-anelastik davranışları, gerilme uygulama sonrası anelastik davranışı (gevşeme) ve dinamik gerilme altında malzemenin elastiklik modülünde meydana gelen modül hataları (kayıp) elde edilmiştir. Ayrıca anelastik limitin tespitinde yeni bir yaklaşım sunulmuş ve bazı numune grupları için bu limit elde edilmiştir.

Numune iç yapı farklılıklarının bahsedilen davranışlara etkileri deneysel olarak tespit edilmiştir. Her malzeme grubu için 3'er adet numune kullanılmıştır. Numunelerin geometrik ölçümleri CMM cihazında gerçekleştirilmiş ve uygulanan yer değişimine göre, kritik kesitte etkiyen maksimum gerilmeler sonlu elemanlar analizi (SEA) ile hesap edilmiştir. ProMechanica yazılımında birebir tasarlanan ters sarkaçta, kolun salınımıyla ortaya çıkan şekil değişimlerine bağlı olarak numuneye etkiyen gerilmeler tespit edilmiştir. Ters sarkacın moment noktasına göre sistemin kütlesel atalet momenti de SEA ile tespit edilmiştir. Deney düzeneğinde CCD kamera konumu tüm deneylerde aynı pozisyonda tutulmuştur.

Deney numuneleri (Tablo 7.2) farklı ısıl işlemlere tabi tutulmuştur. Isıl işlemlerle malzemeye hedef içi yapı ve özellikler kazandırılmaya çalışılmıştır. Özetle; malzemenin anelastik davranışına dislokasyon yoğunluğunun, tane sınırlarının,

çökelti büyüklük, miktar ve dağılımlarının, sertliğin ve farklı faz yapıların etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

- Malzemede katı çözeltiye alınma sonrası, soğuk plastik şekil değiştirilerek dislokasyon yoğunluğu arttırılmış iç yapı, **AR** kodu ile gösterilmiştir.
- AR kodlu iç yapı özelliklerine sahip malzeme, 315 °C'de 2 saat tutularak yaşlandırma işlemi uygulanmış, böylece malzemede çökeltiler meydana getirilmiştir. Bu numuneler **Y** kodu ile gösterilmiştir.
- Yaşlandırma işleminin aynı sıcaklıkta 6 saat devam ettirilmesiyle, G.P bölgelerinin γ' ve γ fazlarına dönüşmesi sağlanarak daha dengeli bir içyapı elde edilmesi amaçlanmıştır. Uzun süreli yaşlandırma olarak adlandırılan bu işlemde sıcaklık, yaşlandırma sıcaklığı ile aynı seçilmiştir. Böylece malzeme sertliğinde fazlaca bir düşmeye neden olmadan faz yapılarının ve çökeltilerin etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu grup numuneler **USY** kodu ile gösterilmiştir.
- Numunelerin AR iç yapı özelliğinden yani plastik şekil değiştirilerek dislokasyon yoğunluğu arttırılmış malzeme, çözeltiye alınarak dislokasyon yoğunluğunun en az olduğu aşırı doymuş katı çözelti olarak elde edilmiştir. Bu iç yapıdaki numunelere yaşlandırma işlemi uygulanarak (315 °C'de 3 saat) Y kodlu numunelerde olduğu gibi çökeltili bir yapı elde edilmiştir. Bu numuneler **Y2** kodu ile gösterilmiştir.
- Y2 kodlu numunelere benzer şekilde, aynı sıcaklıkta 6 saat tutulmak suretiyle katı çözelti halinde uzun süreli yaşlandırılmış numuneler elde edilmiştir. Bu grup numuneler de **USY2** olarak gösterilmiştir.
- AR kodlu numuneler yeniden kristalleşme sıcaklığı olan 400 °C'nin üstünde bir sıcaklıkta (550 °C) 30 dk. tutularak, malzemede iri taneli yapı meydana getirilmiştir. Böylece tane sınır alanları göreceli olarak azaltılmıştır. Bu şekilde tane sınırlarının, incelenmek istenen malzeme özelliğine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu grup numuneler **TB1** kodu ile gösterilmiştir. Farklı sıcaklıklar için ise **TB2** ve **TB3** kodları kullanılmıştır. Bu grup numunelere yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde tavlama uygulandığından bir miktar çökeltinin çözündürülmüş olabileceği, bu nedenle

yeniden yaşlandırma ile bu yapının tekrar çökelme sertleştirmesine tabi tutulması amaçlanmıştır.

Tablo 7.2. Numune kodları, uygulanan ısıl işlemler ve malzeme özellikleri

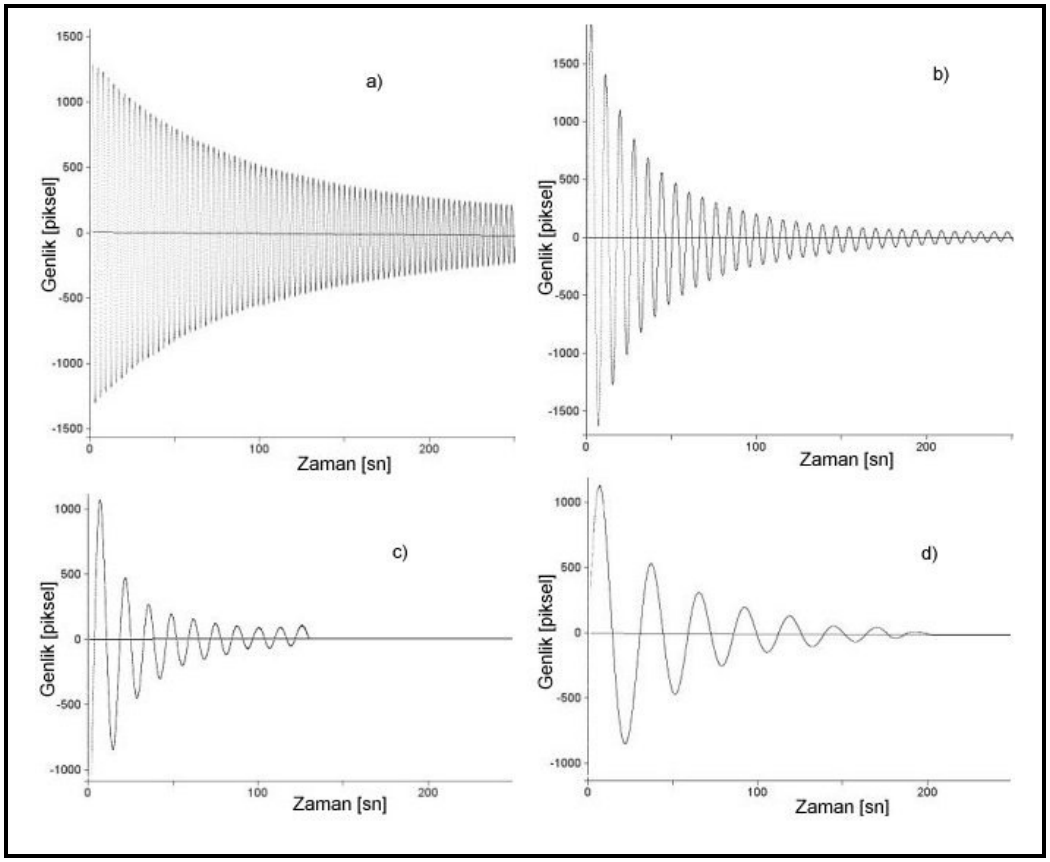
Grup	**Kod**	**Uygulanan Isıl ve Mekanik İşlem**	**Malzeme İçyapı özelliği**	**Sertlik [HRB-C] (HV)**
1	Y	KÇ+ŞD+Y	Tane sınırları ve içlerinde düzgün dağılmış çökeltiler, G.P bölgeleri	41 HRC (400 HV)
2	USY	KÇ+ŞD+USY	Biraraya gelerek miktarı göreceli azalmış çökelti formları	40 HRC (388 HV)
3	TB3	KÇ+Y+T3+Y	Düşük dislokasyon yoğunluğu,çökeltiler biraraya gelerek miktarı azalmış	40 HRC (388 HV)
4	Y2	KÇ+Y	Düşük dislokasyon yoğunluğu, düzgün dağılmış çökelti formları	38 HRC (369 HV)
5	USY2	KÇ+USY	Biraraya gelerek miktarı göreceli azalmış çökelti formları	35 HRC (340 HV)
6	TB2	KÇ+ŞD+Y+T2+Y	Bir miktar tane irileşmesi.	31 HRC (306 HV)
7	AR	KÇ+ŞD	Yüksek dislokasyon yoğunluğu	95 HRB (214 HV)
8	TB1	KÇ+ŞD+Y+T1+Y	Yeniden kristalleşme, kaba taneli yapı, göreceli düşük tane sınır alanı,tav ikizleri	94 HRB (209 HV)

KÇ : Katı çözeltiye alınmış, **ŞD** : Soğuk plastik şekil değiştirmiş (pekleşme yapılmış), **Y** : Yaşlandırma yapılmış (315 °C'de 2-3 saat), **USY** : Uzun süreli yaşlandırma yapılmış (315 °C'de 6 saat), **T1**: Tavlama (550 °C'de 30 dk), **T2** : Tavlama (500 °C'de 10 dk), **T3** : Tavlama (500 °C'de 5 dk).

7.1. Genel Sonuçlar

Tasarlanan ters sarkaç düzeneğinde, esnek eleman üzerindeki sarkaç kolunun açısal salınımları CCD kamera ile tespit edilip, zamana bağlı değişimleri bilgisayar yardımıyla kaydedilmiştir. Farklı salınım periyotlarında elde edilen bu salınımların zamana bağlı genlik azalmalarından 4 adet örnek Şekil 7.1'de verilmiştir. Şekil 7.1c ve d'de salınımların kesildiği noktalar, sarkacın düzensiz hareketlere başladığı noktalardır ve grafikte gösterilmemiştir.

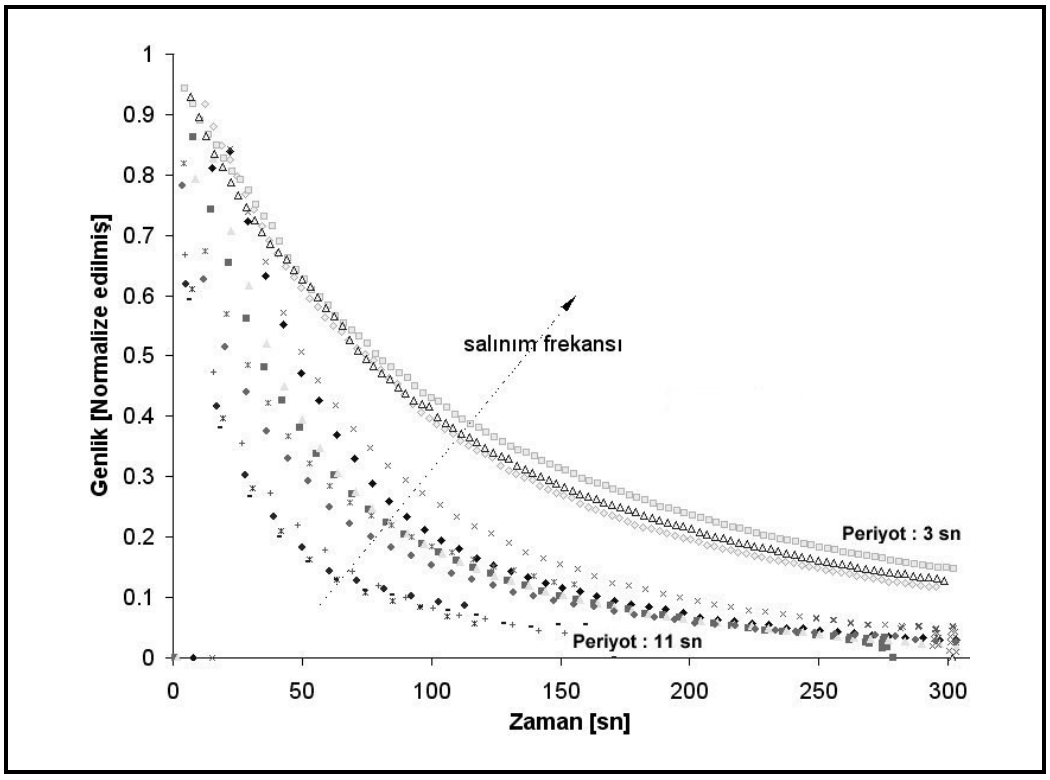
Ters sarkaç düzeneğinden elde edilen salınımlar, sarkaç kolunun bağlı olduğu esnek elemanın davranışının bir fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Bu salınımların tepe noktalarının zamana göre elde edilmesiyle, malzemenin elastik ve anelastik davranışı hakkında bilgi edinilebilir.



Şekil 7.1. Tipik bir numune için sarkacın farklı periyotlarda salınım davranışı; salınım periyotları: a) 3.1 sn, b) 7.8 sn, c) 13.1 sn, d) 27.8 sn

Her salınım çevrimi için tepe noktalarının elde edilmesiyle Şekil 7.2'de gösterilen grafik elde edilmiştir. Şekil 7.2'de numune gruplarının tümünün zamana bağlı genlik azalmaları, farklı salınım frekansları için elde edilmiştir. Salınım frekansının artması

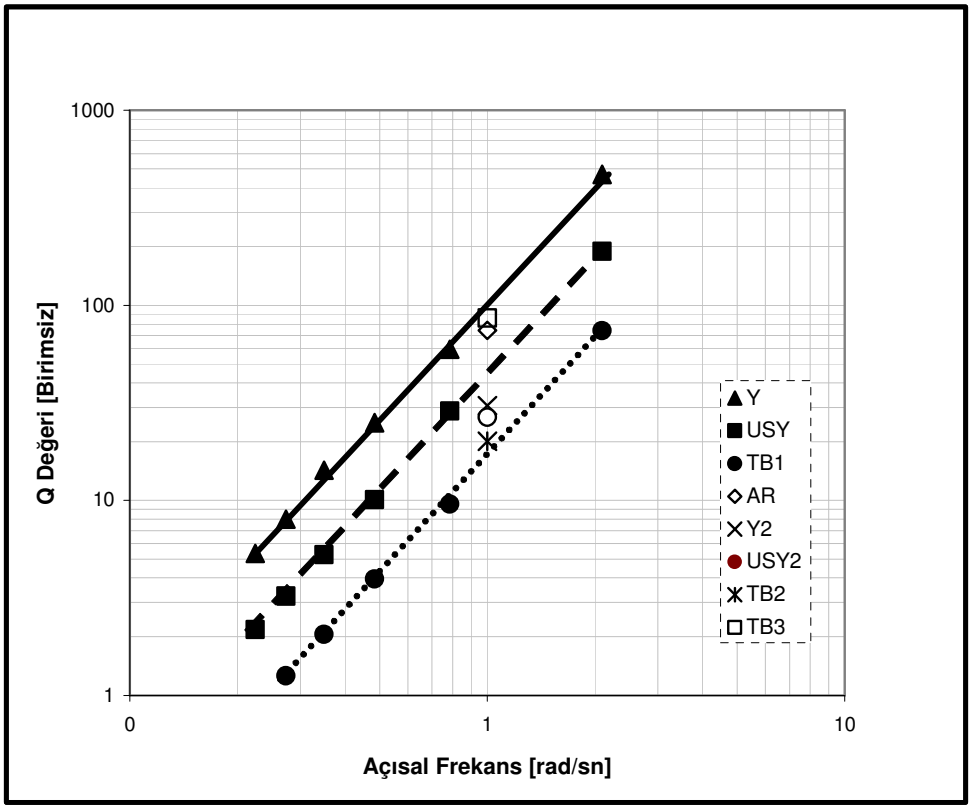
yani periyodun azalmasıyla, malzeme davranışın değiştiği açık şekilde görülmektedir. Yüksek salınım frekanslarında sönümleme daha düşüktür, böylece malzeme üzerindeki gerilmeyi (bu düzenek için titreşim denilebilir) daha uzun sürede sönümlemektedir. Bu durum, malzemenin titreşim sönümleme kabiliyetinin artan salınım frekansıyla azalmasının bir ifadesidir.



Şekil 7.2. Genlik azalmasının zamana göre değişimi

7.2. İç Yapının Sarkaç Kalite Faktörüne Etkisi

Yaşlandırılmış (Y), uzun süreli yaşlandırılmış (USY) ve kaba taneli yapıda (TB1), 3 farklı iç yapıya sahip numunenin kalite faktörlerinin sarkaç salınım frekansına göre değişimleri Şekil 7.3'de gösterilmiştir. Deneylere tabi tutulan diğer 5 grup numunenin kalite faktörü değerleri ω=1 rad/s için aynı grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7.3. Sarkaç kalite faktörünün (Q) açısal frekansla (ω) değişimi

Q değeri salınım frekansının (ω) karesiyle doğru orantılı şekilde artmaktadır. Bu sonuçlar, Bölüm 4-Denklem (4.10) ile ifade edilen bağıntının bir göstergesidir. Yine, malzeme iç yapısının o malzemeden imal edilmiş yay elemanı kullanılmış bir sarkacın kalite faktörünü doğrudan etkilediği Şekil 7.3'e bakılarak ifade edilebilir.

Denklem (4.10)'a göre numunelerin kalite faktörü (Q) ile açısal frekans arasında uygun bir eğri geçirilirse aşağıdaki denklemler (7.1a-7.1h) elde edilir.

$$Q_Y = 107.1 \times \omega^2 \tag{7.1a}$$

$$Q_{USY} = 43.2 \times \omega^2 \tag{7.1b}$$

$$Q_{TB1} = 16.9 \times \omega^2 \tag{7.1c}$$

$$Q_{AR} = 74.5 \times \omega^2 \tag{7.1d}$$

$$Q_{Y2} = 30.6 \times \omega^2 \tag{7.1e}$$

$$Q_{USY2} = 26.7 \times \omega^2 \tag{7.1f}$$

$$Q_{TB2} = 20.1 \times \omega^2 \tag{7.1g}$$

$$Q_{TB3} = 86.3 \times \omega^2 \tag{7.1h}$$

Şekil 7.3'te Y, USY ve TB1 numunelerine ait sonuçlarla diğer grupların ω=1 rad/sn'deki değerleri verilmiştir. Tablo 7.2'de ayrıntılı özellikleri verilen 8 grup deney numunesine ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 7.3'de verilmiştir.

Tablo 7.3. İç yapının Q değerine etkisi

Numune Kodu	**Sertlik Değeri [HRB-C] ve [HV]**	**Q değeri (ω=1 rad/sn için)**
Y	41 HRC (400 HV)	107.1
TB3	40 HRC (388 HV)	86.1
AR	95 HRB (214 HV)	74.5
USY	40 HRC (388 HV)	43.2
Y2	38 HRC (369 HV)	30.6
USY2	35 HRC (340 HV)	26.7
TB2	31 HRC (306 HV)	20.1
TB1	94 HRB (209 HV)	16.9

Tablo 7.3'de ω=1 rad/sn değeri için Q sonuçları her deney grubu için ölçümlerin alındığı 3'er numunenin ortalaması olarak verilmiştir. Bu numunelerin her birine ait sonuçlar ise Tablo 7.4'de verilmiştir.

Tablo 7.4. Tüm deney numunelerinin Q değerleri (ω=1 rad/sn için)

Numune Kodu/No	#1	#2	#3
Y	106.9	107.2	107.1
TB3	86.0	86.3	86.1
AR	74.5	74.6	74.5
USY	43.2	43.2	43.1
Y2	30.6	30.5	30.6
USY2	26.8	26.7	26.7
TB2	20.1	20.1	20.2
TB1	16.9	16.9	16.9

Tablo 7.3 incelendiğinde, sertlikleri hemen hemen aynı olan Y,USY ve TB3 kodlu numunelerin farklı Q değerlerine sahip olduğu görülebilir. Yine, aynı sertlikteki AR ve TB1 iç yapılı numunelerin çok farklı Q değerlerini verdikleri tespit edilmiştir. Buradan, malzeme iç yapısal özelliklerinin sarkacın kalite faktörünü doğrudan etkilediğini ve bu değerin sertliğin bir fonksiyonu olmadığı söylenebilir [22]. Ama, sert malzemelerin de iyi anelastik özellik gösterdikleri bilinen bir gerçektir [16,17].

İçerisinde çökelti formları oluşturulmamış AR kodlu numunelerin, katı çözelti sonrası yaşlandırma ve uzun süreli yaşlandırma ile sertliği arttırılmış, içerisinde uygun şekilde dağılmış çökeltilerin bulunduğu Y2 ve USY2 grubu malzemelere göre daha yüksek Q değerini sağlamıştır. Bu durum, dislokasyon yoğunluğunun malzemede anelastik özellik bakımından en etkin parametrelerden birisi olduğunun bir göstergesidir.

Yaşlandırma ile tane sınırlarında ve içlerinde uygun büyüklük, form ve dağılımda elde edilmiş çökelti formları ve G.P bölgelerinin malzemenin Q değerini yükselttiği, Y kodlu numunelerin sonucundan açıkça anlaşılabilmektedir. Uzun süreli yaşlandırma ile çökeltilerin biraraya gelerek miktarlarında göreceli azalmaları kötü etki yapmaktadır. Bu durum Y ve USY grubu numunelerin karşılaştırılmasıyla anlaşılabilir.

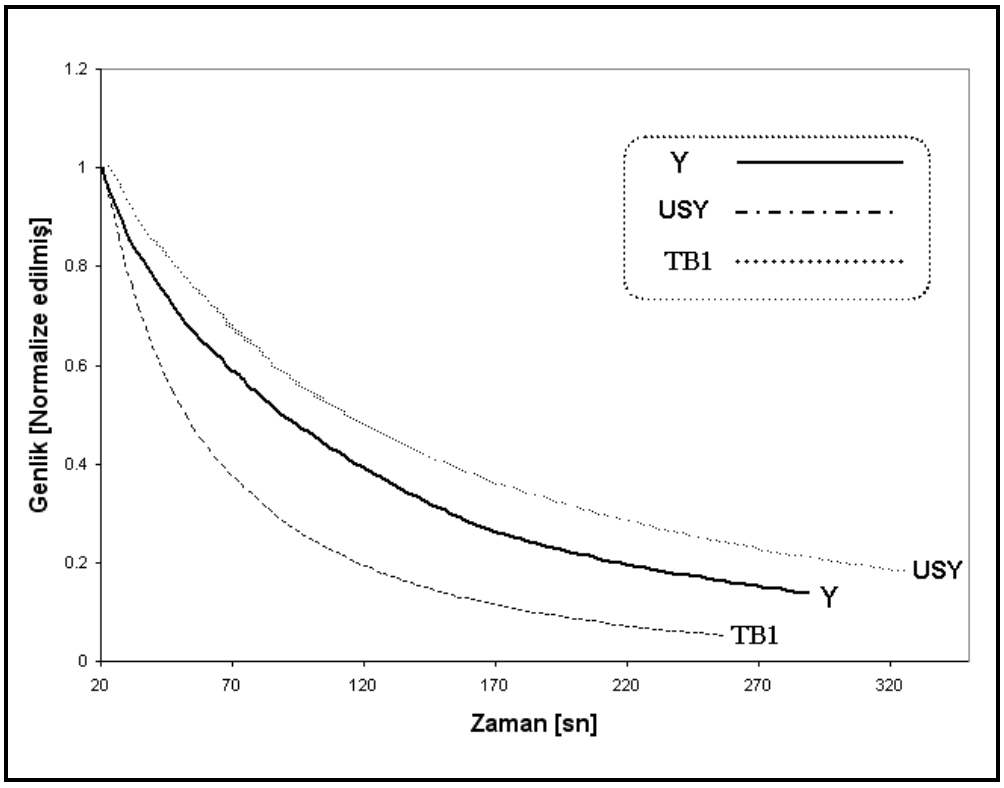
Tane sınırları, dislokasyonların kavislenmesi, yumaklaşması ve yığılması gibi mekanizmaları gerçekleştirebilmesi için engel oluşturduğundan anelastik özellik bakımından etkili yapılardır. TB1 kodlu numunelerde kaba taneli yapı Y ve USY numunelerine göre daha kötü sonuçlar vermiştir. Dislokasyonların bahsedilen mekanizmalarını gerçekleştirebilmesi için gerekli boş alanların malzeme içlerindeki varlığı anelastik özellik bakımından kötü etki etmektedir. Çökeltilerin uygun büyüklük, form ve dağılımda olmalarıyla birlikte tane sınırları da bu noktada etkilidir. Kaba taneli yapıda tane sınır alanları göreceli olarak daha düşük olduğundan, malzeme iç yapısında bahsedilen mekanizmalar için boşluklara imkan tanınmış olunmaktadır. Zaten kaba taneli yapının sertliği de diğerlerine göre daha düşük seviyelerdedir.

TB1,TB2 ve TB3 gruplarına bakılarak; yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde, sıcaklık ve tutma sürelerinin artmasıyla malzemelerin Q değerlerinin düştüğü görülebilir. Bunun nedeni olarak; yeniden kristalleşmenin ve tutma süresinin arttırılmasıyla kaba taneli bir malzeme iç yapısının etkin olduğu değerlendirilebilir.

7.3. Gerilme Sonrası Anelastik Davranış

Metalik malzemeler sabit yük altında tutulduğunda gevşemeye maruz kalırlar. Gerilmenin ortadan kaldırılmasıyla önceden uygulanan gerilmeye ve uygulanma süresine bağlı olarak elastik-anelastik veya viskoelastik davranış gösterirler. Anelastik malzemelerde (tüm metallerde), etkiyen gerilmenin kaldırılmasıyla sonlu bir zaman diliminde (malzemeden malzemeye değişir) malzeme tekrar eski haline döner. Belirli bir zaman sonraki elastik şekil değişimleriyle eski durumundaki fark, anelastik fark olarak ifade edilir. Yeterince beklenildiğinde anelastik malzemeler tamamen eski haline döner.

Esnek elemanlar, çalışma gerilmesinin maksimumunda (çalışmada kullanılan deney numuneleri için bu gerilme değeri 200 MPa'dır) 30 dakika bekletilip serbest salınıma bırakılmıştır [46]. Sonuçlar Şekil 7.4'de gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Gerilme sonrası davranışın zamana göre değişimi

Uzun süreli yaşlandırılmış numunelerin kalite faktörü değerleri, diğerlerine oranla daha düşük olmasına karşın (Şekil 7.4), gerilme altında bekletildikten sonraki davranışında daha düşük sönümleme etkisi gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak; aynı sıcaklıkta uzun süre bekletilmenin (2 saate karşın 6 saat) malzeme iç yapısına iyi yönde etki ettiğinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

Gerilme sonrası genlik azalması, zamana bağlı üstel bir fonksiyon ile değişmektedir. Her malzeme için farklı gevşeme süreleri ve zaman sabitleri söz konusudur. Deneysel verilerin aşağıdaki anelastik gevşemenin ifadesi olan denkleme uyduğu görülmüştür [12,47].

$$A(t) = A_0(1 - e^{-T/\tau}).e^{-t/\tau} \qquad (7.2)$$

Burada, A(t) zamana bağlı anelastik gevşemeyi, A_0 ise ilk genlik değerini ifade eder. Hesaplamalarda ve grafiklerde bu değer normalize edildiğinden "1" alınmıştır. Her üç grup numune için de bu denklem, deneysel verilere göre uygun bir eğri geçirilmiş ve aşağıdaki zaman sabitleri (τ) hesaplanmıştır (Tablo 7.5). Burada T, gerilmenin 30 dakika (1800 sn) uygulandığı süreyi göstermektedir.

Tablo 7.5. Gerilme sonrası anelastik davranışta zaman sabitleri

Numune	Zaman Sabiti, τ
Yaşlandırılmış (Y)	115
Uzun süreli Yaşlandırılmış (USY)	175
Kaba Taneli Yapı (TB1)	75

Elde edilen zaman sabitleri, malzemeye uygulanan gerilmenin etki ettirilme süresine göre değişmektedir. Bu değerlere bakarak; tanelerinde büyüme gerçekleşmiş numunelerin aynı sürede, diğerlerine göre daha fazla sönümleme yaptığı söylenebilir. Örneğin; aynı anelastik seviye için yaşlandırılmış numuneler 23 dakikada toparlanırken, kaba taneli yapı için bu süre % 35 düşerek 15 dakika sürmektedir. Uzun süreli yaşlandırılmış numune için bu süre ise 34 dakikadır.

7.4. Dinamik Gerilme Altında Modül Hatasının Belirlenmesi

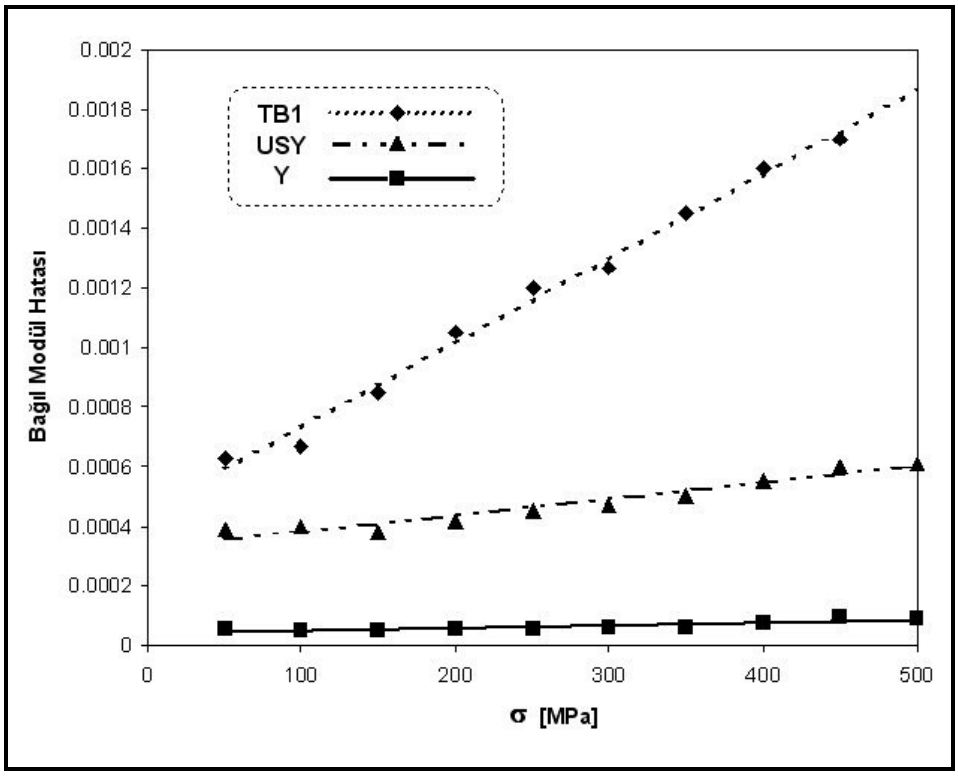
Modül kaybı malzemenin farklı gerilme seviyelerindeki elastik modülleri arasındaki fark (ΔE) olarak ifade edilir. Bölüm 3.2'de ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

Tablo 7.6'da, 8 deney grubu için farklı frekanslarda gerçekleştirilen, 3 numunenin modül hatalarının ortalamaları alınarak elde edilen değerler verilmiştir. Yaşlandırılmış numunelerin en düşük modül hatasına sahip oldukları açıkça görülebilir. Yaşlandırılmış numuneler için (Y) elde edilen değer (Tablo 7.6), aynı malzeme için (Cu-Be) daha önce elde edilen sonuçlarla yaklaşıktır [14,15,24]. Numunelerde tane büyümesinin modül hatasını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Tablo.7.6. Farklı iç yapıların modül hataları

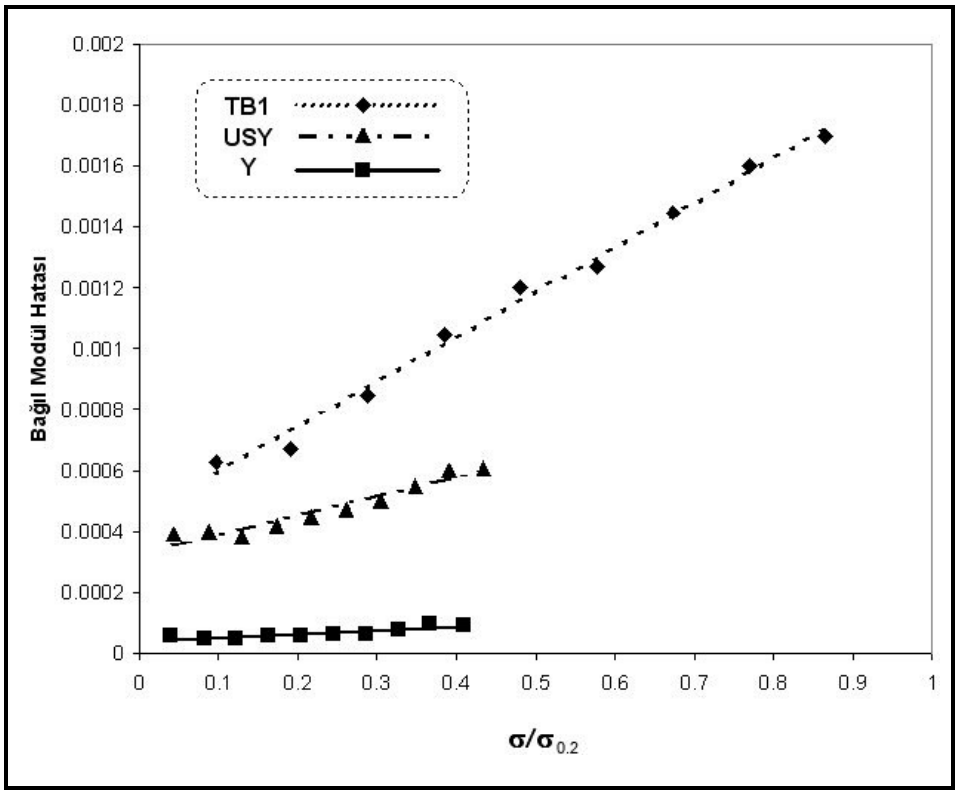
Numune Kodu	Bağıl Modül Kaybı (ΔE/E)	Modül Kaybı [MPa]
Y	4.9×10^{-5}	6
TB3	1.4×10^{-4}	18
AR	1.6×10^{-4}	21
USY	2.7×10^{-4}	36
Y2	3.9×10^{-4}	51
USY2	4.4×10^{-4}	58
TB2	5.9×10^{-4}	77
TB1	6.5×10^{-4}	85

Şekil 7.5'te, gerilmenin artmasıyla modül hatalarının arttığı gösterilmiştir. Yaşlandırılmış numunelerin gerilme bağımlılığı diğerlerine göre azdır. Bu da yaşlandırılmış numunelerin daha iyi anelastik davranış gösterdiğinin bir ifadesidir. Kaba taneli yapıda modül hataları, gerilmenin artmasıyla diğerlerine göre daha fazla büyümüştür.



Şekil 7.5. Gerilmeye bağlı olarak modül hatasının değişimi

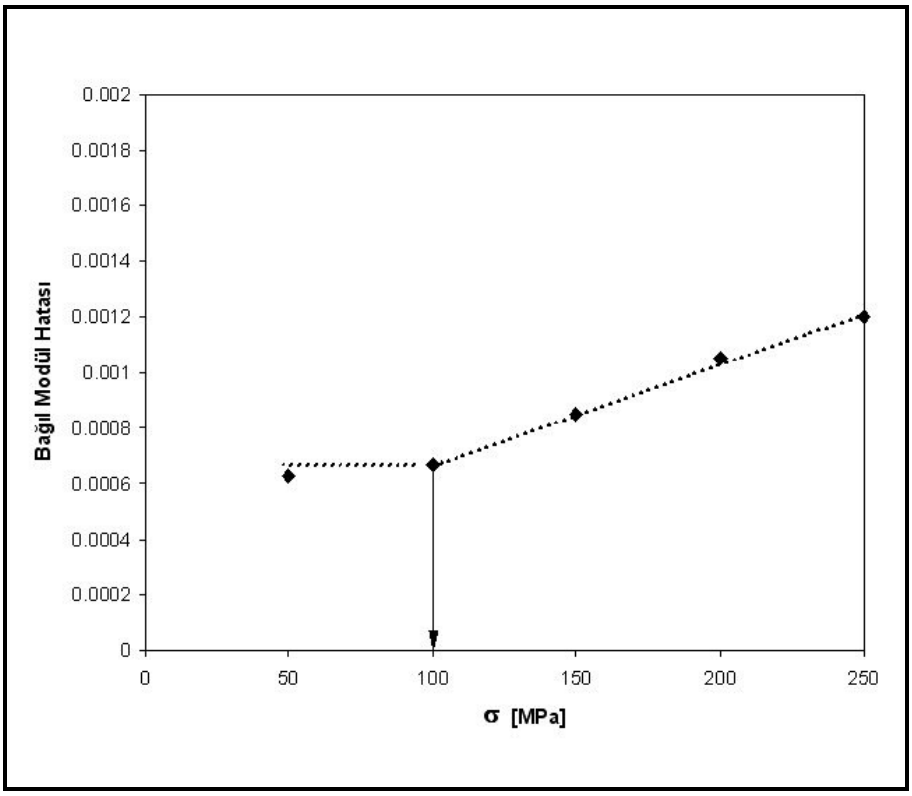
Yukarıdaki grafiğin, her numune için 0.2 akma mukavemetlerine göre normalize edilmiş hali Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



Şekil 7.6. Gerilme oranına bağlı olarak modül hatasının değişimi

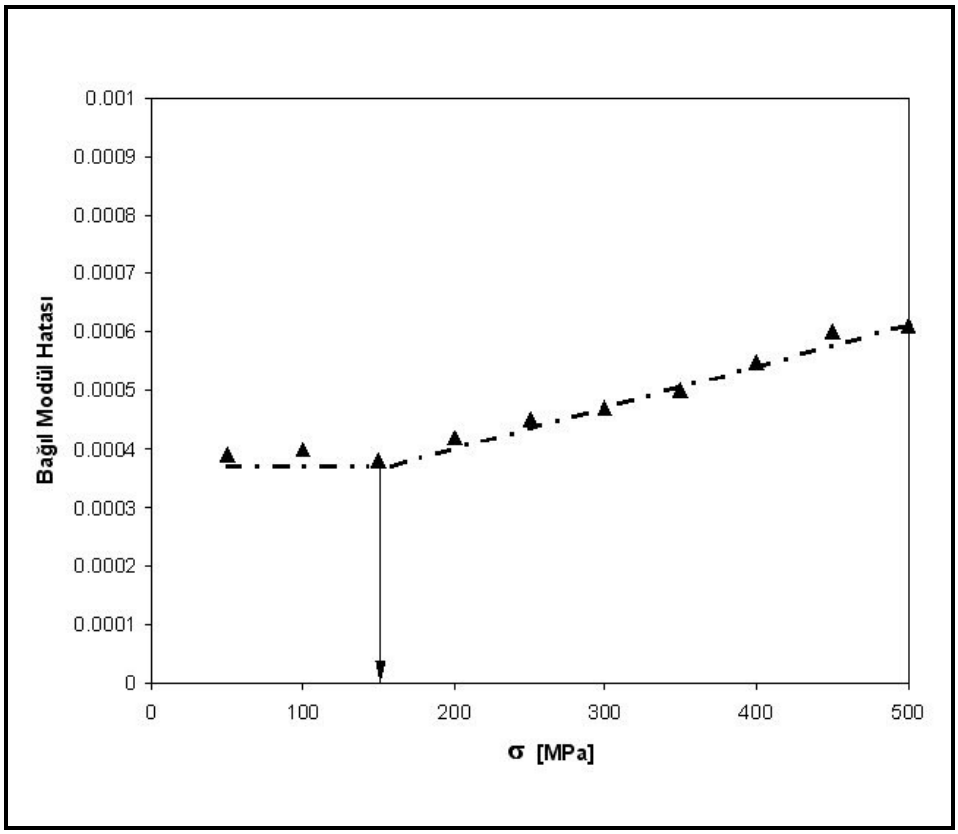
7.5. Anelastik Sınırın Belirlenmesi

Şekil 7.6'da verilen bağıl modül hatasının gerilme ile artış grafiğinin ölçeği büyütülerek, numunelerin modül hatalarının artış hızının belirli bir gerilme değerinden sonra daha da yükseldiği görülebilir. Anelastik limit olarak tanımlanan ve malzemenin bu sınır gerilme değerinin altında kapalı döngüler (histerisiz) oluşturacak şekilde davranışı çeşitli çalışmalarla ortaya konulmuştur [13]. Bu çalışmada kullanılan sarkaç düzeneği ile de bu sınırın tespit edilebileceği gösterilmiştir (Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9). Anelastik sınırın altında malzeme, gerilme yükleme ve boşaltılması sırasında kapalı döngüler oluşturacak şekilde davranır. Bu sınırın üstünde gerçekleştirilecek bir yükleme de ise bu döngüler zamana bağlı şekilde kapalıdır. Kaba taneli numuneler için anelastik sınır gerilme değeri 100 MPa seviyelerinde olup, esnek elemanların çalışma aralığındadır.



Şekil 7.7. Kaba taneli numunede anelastik sınır

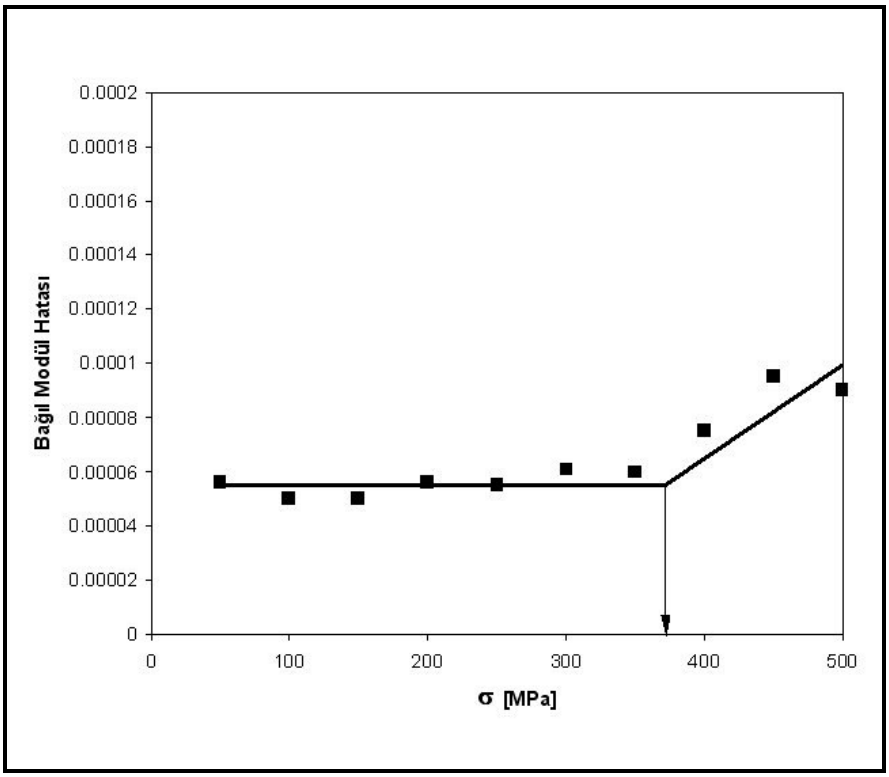
Aynı şekilde modül kaybı-gerilme ilişkisi diğer iç yapı grupları için de incelendiğinde; uzun süreli yaşlandırılmış numunelerde gerilme 150 MPa seviyelerine çıkmaktadır (Şekil 7.8). Yaşlandırılmış numunelerde ise modül kaybı diğerlerine göre düşük ve bahsedilen sınır Şekil 7.5'de belirsizdir. Yaşlandırılmış numune için modül kaybı değerleri genişletilmiş ölçekte gösterildiğinde bu sınır daha belirgin hale gelmektedir (Şekil 7.9).



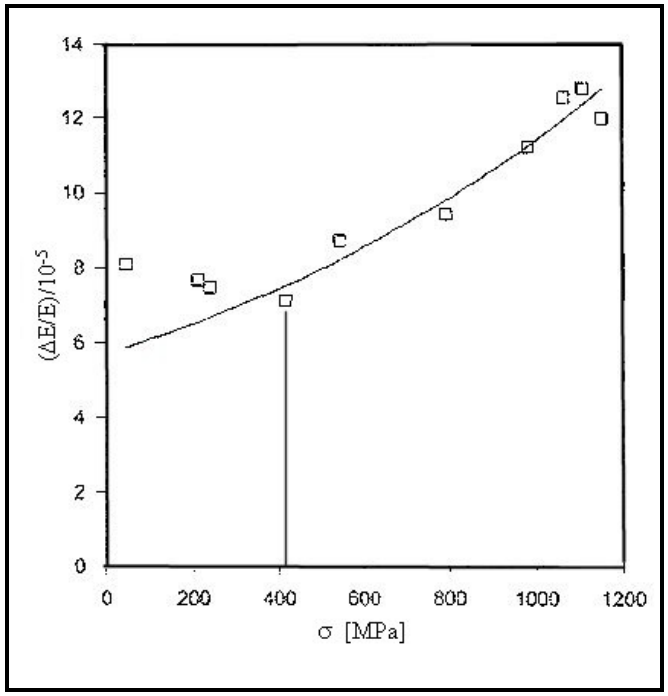
Şekil 7.8. Uzun süreli yaşlandırılmış numunede anelastik sınır

Yaşlandırılmış numunelerde anelastik sınır, 400 MPa civarındadır (Şekil 7.9). Yaşlandırılmış Cu-Be malzemesi üzerine daha önce yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 7.10) [14,15]. İlgili çalışmada modül kaybının artan gerilme ile arttığı belirtilmiş ama 400 MPa gerilme civarında bir "anelastik sınır" tanımlaması yapılmamıştır. Sonuçlar [13] çerçevesinde değerlendirildiğinde, bahsedilen gerilme değerinin yaşlandırılmış numuneler için anelastik sınır olduğu değerlendirilebilir.

Yaşlandırılmış Cu-Be malzemeleri için esnek elemanların çalışma gerilmeleri değerlerindeki arasında modül kayıpları (4.9×10^{-5}) daha önceki sonuçlarla benzerlik göstermektedir [15,25].



Şekil 7.9. Yaşlandırılmış numunede anelastik sınır



Şekil 7.10. Yaşlandırılmış Cu-Be malzemesinin önceki çalışmalara göre anelastik sınırı [15]

Bazı deney numuneleri çözeltiye alınmış ve sonradan da % 37 oranında soğuk plastik çekildiği için, iç yapıda dislokasyon yoğunluğunun yeterince yüksek seviyede olduğu varsayılabilir. Tablo 7.2'de verilen 3 grup numune (Y,USY,TB1) bu halden yaşlandırma ve diğer işlemlere tabi tutulmuştur. Çubuk boyunca çekilmiş taneler ve dislokasyon yoğunluğu sonuçları iyi yönde etkilemiştir. Bahsi geçen tabloda TB3,Y2 ve USY2 kodlarıyla gösterilen numuneler ise tekrar çözeltiye alınarak malzeme iç yapısı yeniden şekillendirilmiştir. Dolayısıyla, önceki grup malzemelerde bahsedilen çekilmiş tane ve dislokasyon yoğunluğu kaybedilmiştir. Bu durum sarkaç kalite faktörünün düşmesine ve dolayısıyla yüksek anelastik etkiye neden olmuştur.

7.6. Elde Edilen Sonuçların Güvenilirliği

Dinamik ölçümlerde sarkaç sistemleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Çeşitli sarkaç sistemleri tasarlanıp ölçümlerde kullanılmış ve sonuçları yayınlanmıştır. Bu çalışma kapsamında kurulan ters sarkaç sisteminin teorisi ve uygulaması daha önce yapılan çalışmalarla [14,18,21] aynı olmasına karşın esnek elemanın bağlantısında farklılık vardır [29]. Bu bağlantı şekli Bölüm 6'da açıklanmıştır. Bu şekilde, bilinen ters sarkaç sisteminde esnek eleman malzemesi için arzu edilen deney şartları sağlanmıştır.

Kullanılan düzenekteki sonuçların doğruluğuna etki edecek parametrelerle belirsizliğe katkısı Tablo 7.7'de verilmiştir.

Tablo 7.7. Belirsizlik Bileşenleri

Belirsizlik Kaynağı	**Katkısı [piksel]**	**Olasılık Dağılımı**	**Katsayı**	**Standart Belirsizlik**	**Birim**
CCD Kamera Çözünürlük	1	Dikdörtgen	1.730	0.578	piksel
Tekrarlanabilirlik	30	Dikdörtgen	1.730	17.341	piksel
Havanın Kaldırma Etkisi	-		-	-	
Sıcaklık	-	-	-	-	
		Birleşik Belirsizlik		17.351	piksel
		Genişletilmiş Belirsizlik*		34.701	piksel
		Genişletilmiş Belirsizlik		0.243	mm
		Bağıl Belirsizlik		7.10^{-5}	-
		% Belirsizlik		0.007	-

(*) Güvenilirlik düzeyi % 95'tir.

Tablo 7.7'de verilen ölçüm doğruluğuna etki eden bileşenlerin her birinin standart belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının karekökü alınarak birleşik belirsizlik elde edilmiştir. Her bir bileşenin standart belirsizlikleri uygun olasılık dağılımları dikkate alınarak hesap edilmiştir [48,49].

Ölçümler yapılırken ki ortalama hava yoğunluğu 1.178 ± 0.003 mg/cm^3 ve sistemin durağan haliyle hareket halindeki kütle farkı, gramlar mertebesinde olduğundan etkili bir belirsizlik kaynağı değildir (~10^{-8} seviyelerinde) [50]. Ölçülerde kullanılan CCD kamera 80 pozisyon verisi/sn hızında veri almıştır. Böylece salınımların grafiği mümkün olduğunca doğru elde edilmeye çalışılmıştır.

Hesaplanan sarkaç kalite faktörü (Q) değerlerinde ise yaklaşık % 0.3'lük bir belirsizlik söz konusudur. Bu belirsizlik, ortalaması alınan numune değerleri arasındaki farklılıktan ve uygun eğri denklemi geçirilmesi işleminden hesap edilen değerdir.

Bu çalışma kapsamında deneylerin yapıldığı Cu-Be malzemesi üzerinde, çeşitli sarkaç düzenekleriyle anelastiklik ölçümleri yapılmıştır [14,15,18,25,51]. Daha önce yaşlandırılmış Cu-Be alaşımı için elde edilen sonuçların kurulan düzenekle elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı tablosu Tablo 7.8'de verilmiştir.

Tablo 7.8. Yaşlandırılmış Cu-Be alaşımı için ΔE/E Değerleri

Ölçüm Düzeneği	**Kullanılan Ölçme Elemanı**	**ΔE/E Değeri**	**Referans**
Yeni Ters Sarkaç	CCD Kamera	4.9×10^{-5}	[29]
Birleşik Sarkaç	Mikroskop	4.1×10^{-5}	[18]
Torsiyonel Sarkaç	İnterferometre	5.0×10^{-5}	[51]
Torsiyonel Sarkaç		5.0×10^{-5}	[25]
Basit Sarkaç	Fotosel	5.0×10^{-5}	[14]
Basit Sarkaç	Fotosel	4.8×10^{-5}	[14]
Basit Sarkaç	Fotosel	5.1×10^{-5}	[14]
Torsiyonel Sarkaç	Fotosel	min. 3.4×10^{-5} maks. 5.4×10^{-5}	[14]
Torsiyonel Sarkaç	Fotosel	4.2×10^{-5}	[15]
Basit Sarkaç	Fotosel	5.6×10^{-5}	[15]

Sonuçlara bakıldığında, yaşlandırılmış Cu-Be (yaklaşık % 2 Be içeriyor) malzemesi için farklı düzenek ve ölçüm sistemleriyle yaklaşık benzer sonuçlar elde edildiği ifade edilebilir.

7.7. İç Yapı Özelliklerinin Anelastik Davranışa Etkilerinin İrdelenmesi

Mühendislikte kullanılan tüm metal malzemelerde, anelastik özellik belirli oranlarla görülmektedir. Bu etkinin kaynağı olarak dislokasyonlar ve onların çökelti formlarıyla olan etkileşimi bu çalışmanın konusu içerisinde değerlendirilebilir.

Genel olarak, anelastik etkinin düşük olduğu 2 ana malzeme grubundan sözedilebilir. Bunlardan birincisi tek kristaller, diğeri ise yoğun dislokasyon ağına sahip ve bunların gerilme altında hareketlerini önleyecek engelleri barındıran çok fazlı sistemlerdir. Cu-Be malzemesi yaşlandırma işlemi uygulandığında, ikinci grup malzemeler için iyi bir örnek olmaktadır. Ortaya çıkan çökelti formları ve iç yapı özellikleri bu malzemenin iyi anelastik özellikler göstermesini sağlamaktadır. Yüksek frekanslardaki gerilme uygulamasında dislokasyon kilitlenmesi bu malzemede çok etkili sonuçlar verir. Düşük frekanslarda (2 sn ~ 30 sn aralığında) ise bir miktar anelastik etki gözlemlenmektedir [4].

Çok kristalli metalik malzemelerde elastik/anelastik limit üzerinde fakat orantılılık sınırı altında bir bölgede malzemenin iç yapısında çökeltilerin dislokasyonlara engel olarak kilitlenme yapmasından, çökeltiler etrafında yüksek gerilme yığılması meydana gelmekte ve buralarda dislokasyonların kavislenmesi, yığılması ve yumaklaşması gibi mekanizmaların çalışması söz konusu olabilmektedir. Malzeme içerisinde çökeltilerin uygun büyüklük ve yapıda olması ve uygun şekilde dağılması bu mekanizmaların devreye girmesini engelleyici bir rol oynamaktadır. Isıl işlemlerle malzeme iç yapısı, anelastik özellik bakımından en uygun yapıya sokulabilmektedir. [17,52-54].

Anelastik şekil değişimlerinin nedeni, dislokasyonların esneyerek kavislenmesi, bu harekete direnç gösteren dislokasyon yığılmaları ve dislokasyon etkileşimleri olarak değerlendirilmektedir. Tane içerisinde çökelti sayısının artmasıyla, dislokasyonların kavislenme ve yığılma gibi hareketler yapabileceği alanlar dolduğundan düşük anelastik etkilere neden olabileceği ifade edilmektedir [17,52-54].

Ayrıca, malzemede dislokasyon yoğunluğunun yüksek olması ve ana faz ile bağdaşık G.P bölgelerinin varolması, gerilme altında malzemenin düşük histeresiz ve anelastik şekil değişimi göstermesine neden olmaktadır [17,53].

Malzemeye akma gerilmesinin altında elastik bölgede dışardan bir yük uygulandığında ortaya çıkan elastik şekil değişimi yanında dislokasyonlar tarafından

oluşturulan ve dislokasyonlara bağlı şekil değişimi olarak adlandırılan ilave bir mekanizmayı da devreye sokmaktadır. Bu şekil değişimi genelde frekans bağımlı bir mekanizma ile ortaya çıkmaktadır [52].

Anelastik şekil değişiminin zamana bağlı davranışı, dislokasyon hareketine direnç gösteren iç sürtünmelerin varlığının bir göstergesidir [16,17].

Yaşlandırma yapılmış malzemelerde, oluşan çökeltilerle dislokasyonların etkileşimi iç sürtünmelere, dolayısıyla modül kaybına neden olmaktadır. Dislokasyonların miktarı ve dağılımı, ısıl işlem parametrelerine ve soğuk şekil verme miktarına bağlıdır. Çökeltilerin tipi, miktarı, büyüklüğü ve dağılımı, yaşlandırma ısıl işlem sıcaklığı ve süresiyle değişiklik gösterir. Dolayısıyla ısıl işlem parametreleriyle dislokasyonlar ve çökeltilerle etkileşimi değiştirilebilir [16,17,32].

Genel olarak; dislokasyon hareketine engel teşkil edebilecek her etki (yoğun dislokasyonlar, artan tane sınır alanı, uygun büyüklük, yapı ve dağılımda çökeltiler) anelastiklik etki nedeniyle ortaya çıkan modül kaybını düşürecektir [16,17].

G.P bölgelerinin iç yapıda matrisle bağdaşık durumda olması, dislokasyonların yumaklaşma ve yığılma hareketleri yapması için gerekli boşluğun azalmasına neden olduğundan düşük anelastik etkilerin nedeni olarak görülür [17]. Bu çalışmada, G.P bölgelere sahip yaşlandırılmış numunelerde en düşük anelastik etkiler gözlemlenmiştir [29].

Malzemenin şekil değişim enerjisini depolama seviyesi dislokasyon boyu ile orantılıdır. Artan gerilme genliği ile de malzemenin dinamik modülündeki kayıplar artacaktır. Bu durumu ifade eden ve Cu-Be iç yapı özelliklerinin makro davranışa etkisini modelleyen bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{b}{l}\frac{\sigma/\sigma_k}{1-\sigma/\sigma_k} \tag{7.3}$$

Bu denklemde, σ_k dislokasyon engel noktaları için kritik gerilmeyi, b; l boyundaki dislokasyon için Burger vektörü değerini, σ ise uygulanan gerilmeyi ifade etmektedir [18,25].

Çökelti boyutlarının küçük olması, dislokasyonların yumaklaşmasına neden olduğundan, çökeltilerin büyük olduğu içyapılara göre gerilme sonrası daha fazla gevşeme sürelerine neden olmaktadır [18]. Bu durum, Şekil 7.4'de etkisini

göstermiştir. Şöyle ki; çökelti boyutlarına göre gerilme sonrası toparlanma, çökeltilerin büyük olduğu uzun süreli yaşlandırılmış numunelerde artmış, tane büyümesi yapılmış numunelerde azalmıştır.

Yaşlandırılmış numunelerde çökeltiler tane sınırları ve tane içerisinde düzgün şekilde dağılmış durumdadır (Şekil 6.7 ve Şekil 6.11). G.P bölgeleri malzemenin sertliğinin dolayısıyla mukavemetinin artmasına neden olur. Sertliğin anelastik etki ile doğrudan bir ilişkisi bulunmamakla birlikte, G.P bölgelerin yapısı ve ortaya çıkan çökelti türleri malzemenin anelastik özelliğini iyileştirir [22].

Uzun süreli yaşlandırma işlemiyle çökeltiler biraraya gelip, çökelti sayısının göreceli azalmasıyla daha büyük çökeltiler meydana gelmektedir (Şekil 6.8 ve Şekil 6.13). Bu durum malzemede modül kayıplarının artmasına neden olmaktadır ki Tablo 7.6 ve Şekil 7.5'te gösterilmiştir.

Retrograsyon ve ardından uygulanan yeniden yaşlandırma işleminin, tane sınırlarında çökelti serbest alanı azaltılarak, tane sınırlarıyla tane içini çökeltilerin dağılımı bakımından homojen bir hale getirmesi ve tane sınırı çökeltilerinin azalmasına neden olduğundan, yaşlandırılmış numuneye göre daha iyi modül kararlılığını vereceği değerlendirilebilir. Cu-Be malzemesi için retrograsyon işleminin daha önce uygulandığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu durum Cu-Be malzemesinin regrograsyon işlemi sıcaklık ve süresinin belirlenmesini güçleştirmiştir. Deneylerde kullanılacak bazı numuneler için Retrograsyon işlemi uygulanmış ama başarılı olunamamıştır.

7.8. Elde Edilen Sonuçların Genel Özeti

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Malzemelerinin dinamik olarak test edilebileceği bir ters sarkaç düzeneği tasarlanıp imal edilmiştir.
2. Esnek eleman malzemelerinin anelastik davranışlarının ters sarkaç düzeneği ile tespit edilebileceği gösterilmiştir.
3. Ters sarkaç sisteminde salınım hareketlerinin tespiti için kullanılan CCD kameranın, benzer amaçlar için kullanılabilecek ölçüm sistemlerine göre daha ucuz ve taşınabilir olması avantaj olarak değerlendirilebilir. Uygun

özelliklerdeki CCD kameraların metrolojik amaçlı ölçümlerde rahatlıkla kullanılabileceğini ifade etmek mümkündür.

4. Yaşlandırma ısıl işlemiyle Cu-Be malzemesinin düşük anelastik davranış gösterdiği bu çalışma ile yeni olarak tasarlanan ters sarkaç ile de teyit edilmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış Cu-Be malzemesinin anelastik sınır gerilme değeri 400 MPa civarında tespit edilmiştir. Bu sınır gerilme değerinin altında bağıl modül kaybı sabit ve değeri 4.9×10^{-5} 'dir. Sınır gerilme değerinin üzerinde ise, artan gerilme ile bağıl modül kaybı artmaktadır.
5. Yaşlandırılmış Cu-Be malzemesinin kullanıldığı ters sarkaçta kalite faktörü, 2 s ile 30 s arasındaki periyotlarda, ortalama 10 ile 380 arasında değişmektedir.
6. İncelenen iç yapılar arasında, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış Cu-Be'un, esnek elaman imalatı için, bu malzeme içerisinde en uygun iç yapı özelliği olduğu görülmüştür.
7. Dislokasyonlar ve onların çökeltilerle olan etkileşiminin malzemenin anelastik davranışında etkin bir parametre olduğu ifade edilebilir.
8. Sertlik ile anelastik davranışın iyileşmesi arasında doğru bir orantı olmadığı ama sert malzemelerin de düşük anelastik etki gösterdiği ifade edilebilir.
9. Malzemede çökelti sayısı ve tane sınır alanlarının artmasıyla anelastik özellik iyileşmektedir.

7.9. Öneriler

Bu çalışmada tasarlanan ve imal edilen ters sarkacın daha da iyi bir hale getirilmesi, elde edilen sonuçların doğruluğunu arttırılacaktır. Özellikle, deney numunelerinin düzeneğe montajı, cıvatalı bağlantı yerine daha uygun yöntemler kullanılarak yapılması, numunenin bağlanmasını kolaylaştıracaktır.

Deney numunelerinin imalatının kolay bir yöntemle yapılması maliyetleri düşürecektir. Yine, imalat yönteminin deney numunesine etkisinin en az olduğu yöntemlerden örneğin kimyasal işleme uygun bir çözüm olabilir.

Metalik malzemeden imal edilecek sensör elemanlarının malzeme içyapısı doğrudan o cihazla yapılacak ölçümlerin doğruluğunu etkileyecektir. Bu nedenle tüm sensör

malzemeleri uygun iç yapılar kazandırılarak imal edilmelidir. Yaşlandırılmış numuneler gibi, içerisinde çökeltiler barındıran sistemler ile dislokasyon yoğunluğunun yüksek olduğu malzemeler iyi anelastik özellik göstermektedir. Yine, tek kristal malzemeler de bu özellik açısından dikkate alınması ve üzerinde çalışılması gereken malzemelerdir. Tek kristallerin imalat zorluğu ve maliyetler düşünüldüğünde, ticari olmasa da birincil seviye ölçümlerin yapıldığı alanlarda uygun bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Martenzitik, beynitik içyapıya sahip ve çökelme sertleştirmesi yapılabilen çelik malzemeler için deneyler tekrarlanabilir. Özellikle beynitik iç yapıya sahip çelik malzemelerinin ölçüm elemanı olarak kullanıldıklarında iyi histerisiz özellikleri gösterdikleri bilinmektedir.

Retrograsyon ve yeniden yaşlandırma işlemiyle Cu-Be malzemesinin anelastik özelliklerinin daha da iyi bir hale getirilebileceği değerlendirilebilir.

Farklı soğuk plastik şekil verme oranlarının anelastik davranışa etkisi incelenebilir.

Farklı malzeme türleri (Camsı metaller, nano-faz metaller ve aşırı plastik şekil değiştirmiş malzemeler gibi) ve sıcaklığın bu çalışmada ele alınan davranışlara etkisi, ileride yapılabilecek başka bir çalışmaya konu olabileceği değerlendirilmektedir. Yine, sarkacın vakum altında (hava etkisi olmadan) çalıştırılması elde edilen sonuçların doğruluğuna etki edebilir.

Benzer deney düzeneğinde, salınımın serbest değil de zorlanmış şekilde uygulanarak, malzemede meydana gelen şekil değişimleri ve uygulanan gerilme ile arasındaki faz farkı ölçülebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Eastman F S**., 1937. The Design of Flexure Pivots", University of Washington, *J Aer Sci*,16-21.

[2] **Smith S T.,** 2000. Flexures: Elements of Elastic Mechanisms, Gordon Breach Science Publishers.

[3] **Speake C C.,** 1987. Fundamental Limits To Mass Comparison By Means Of A Beam Balance, *Proceedings Of The Royal Society Of London Series A-Mathematical Physical And Engineering Sciences***,** 414 (**1847**): 333-358.

[4] **Quinn T.J.,** 1992. The Beam Balance as an Instrument for very Precise Weighing, *Measurement Science and Technology* **3**,141-159.

[5] **Bertolini A.**, 2001. High Sensivity Accelerometers for Gravity Experiments, *PhD Tezi*, LIGO.

[6] **Sydenham P.H.,** 1984. Elastic Design of Fine Mechanism in Instruments, *The Institute of Physics*.

[7] **Noll T.,** 2002. Three Axis Rotational Flexure Joints of High Axial Stiffness, *Precision Engineering, Journal of the Int. Societies for Pre.Eng. and Nanotechnology*, **26**, 460-465.

[8] **Ju L.,Blair D.G.,Taniwaki M. ve Andrew R**., 1999. The Quality Factor of Nibium Flexure Pendulums, *Physics Letters A* **254**, 239-244.

[9] **Zelenika S. ve De Bona F.,** 2002. Analytical and Experimental Characterisation of High-Precision Flexural Pivots Subjected to Lateral Loads, *Precision Engineering, Journal of the Int. Societies for Pre.Eng. and Nanotechnology*, **26**, 381-388.

[10] **Smith S T.,** 1992. Foundations of Ultra-Precision Mechanism Design (Developments in Nanotechnology).

[11] **Zener C.,** 1960. Elasticity and Anelasticity of Metals, The University of Chicago Press, Chicago, Ilinois.

[12] **Nowick A.S. ve Berry B.S.**, 1972. Anelastic Relaxation in Crystalline Solids, Academic Press, New York ve London.

[13] **Alexopoulos P. S., Cho C.W.,Hu C.P. ve LI C.Y.,** 1980. Determination of The Anelastic Modulus For Several Metals, *Acta Metallurgical*, Vol **29**, pp 569-537.

[14] **Quinn TJ, Speake CC, Davis RS ve Tew W**., 1995. Stress-dependent Damping in Cu-Be Torsion and Flexure Suspensions at Stresses up to 1.1 GPa, *Physics Letters A* **197**.

[15] **Quinn TJ, Davis RS, Speake CC ve Brown LM**, 1997. The Restoring Torque and Damping in wide Cu-Be Torsion Strips, *Physics Letters A* **228.**

[16] **Fank S.,** 2002. Kuvvet Dönüştürücülerinde Yay Elemanı Malzemesi Özelliklerinin Performans Üzerindeki Etkisi, *Doktora tezi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

[17] **Allgeier T**., 1994. Factors Influence The Mechanical hysteresis in Stainless Steel Load Cells, *PhD Thesis*, Glamorgan University, England.

[18] **Quinn T.J.,Speake C.C. ve Brown L.M.,** 1992. Materials Problems in the Construction of Long-Period Pendulums, *Philosophical Magazine*, Vol.**65**, No.2, 261-276.

[19] **Weinstein W D.,** 1969. Microperformance of Metals.

[20] **Quinn T.J.,Speake C.C. ve Davis R.S.,** 1986. A 1 kg Mass Comparator Using Flexure-Strip Suspensions: Preliminary Results, *Metrologia* **23**,87-100.

[21] **Saulson P R.**, 1993. The inverted pendulum as a probe of anelasticity, *Phys. Rev*. D **42,** 2437.

[22] **Sgobba S., Künzi H. ve Ilschner B.,** 1995. The Influence Thermal and Surface Teatments on The Anelastic Creep of Al-Zn and Al-Cu Alloys, *Acta Metall Mater,* Vol. **43,** No.3,pp 1171-1181.

[23] **Sgobba S.,** 1994. Étude Du Fluage Anélastique de Matériaux Métalliques et Composites Mesuré par Interférométrie Laser, École Polytechiquw Fédérale de Lausanne, *Thése* No :1215.

[24] **Yuki K., Marton M.A, Kanda N. ve Kuroda K.,** 1996. Measuring the Anelasiticy of Cu-Be film under Tensile Stress using the X-Pendulum, *Phsics Letters A* **223**, 149-154, 2 December.

[25] **Speake C C, Quinn T J, Davis R S ve Richman S J**, 1999. Experimental and Theory in Anelasticity, *Meas.Sci. Tech.* **10**, 430-434.

[26] **Guide to Beryllium Copper,** 2004. Brush Wellman, ABD.

[27] **Yağmur L., Gülmez T.,** 2005. Bakır Berilyum (Cu-Be) Alaşımının Malzeme Özellikleri, *Metal Dünyası,* **176,** 123-125.

[28] **Richman SJ, Quinn TJ, Speake CC ve RS Davis**, 1999. Preliminary Determination of G using the BIPM Torsion Strip Balance, *Meas. Sci. Tech*. **10**,460-466.

[29] **Yağmur L., Gülmez T., Hacızade F. ve Kaçmaz S.,** 2005. A New Inverted Pendulum to Determine Anelastic Behaviour of Metals: Design and Characterisation, *Review of Scientific Instrument,* **76,** 093903.

[30] **ASM International,** 2000. Handbook Volume 16: Machining, ASM International

[31] **Crone W.C**., 2000. Compositional Variation and Precipitate Structures of Copper-Beryllium Single Crystal Grown by the Bridgman Technique, *Journal of Crystal Growth* **218**,381-389.

[32] **Dieter G.E.,** 1986. Mechanical Metallurgy,Third Edition, Mc Graw Hill

[33] **Chandler H.,** 1996. Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Nonferrous Alloys, ASM.

[34] **ASM International,** 2000. Handbook Volume 7: Metallography and Microstructures, ASM International

[35] **Ardell A.J. ve Park J.K.,** 1984. Effect of Retrogression and Reaging Treatments on the Microstructure of Al-7075-T651. *Metallurgical Transactions A*, Volume **15A**

[36] **Talianker M. ve Cina B.**, 1989. Retrogression and Reaging and the Rle of Dislocations in the Stress Corrosion of 7000-Type Aluminium Alloys. *Metallurgical Transactions A*, Volume **20A**.

[37] **Cui Q.,Araki I. ve Kanno M**., 1994. Precipitation behaviour of 7000 alloys during retrogression and reaging treatment. *Materials Science and Technology* Vol. **10.**

[38] **Hall M.H. ve Martin J.W**., 1994. The Effect of Retrogression Temperature on the Properties of an RRA (Retrogressed and Re-aged) 7150 Aluminium Alloy. *Z. Metall.* **85.**

[39] **Komisarov V.,Talianker M. ve Cina B.,** 1998. Effect of retrogression and reaging on the precipitates in an 8090 Al-Li alloy. *Materials Science and Engineering* **A242**.

[40] **Bargel H J. ve Schulze G.,** 1993. Malzeme Bilgisi:Cilt I, Çev: Güleç Ş., Aran A., İTÜ Makina Fakültesi.

[41] **Phillips V.A ve Tanner L.E**., 1973. High Resolution Electron Microscope Observations On G.P. Zones in An Aged Cu-1.97 w.t. % Be Crystal, *Acta Metallurgica,* Vol.**21**, April.

[42] **Djurić B. ve Jovanović M**., 1980. A Study of Precipitation in Cu-Be Alloys, *Metallography* **13**:235-247.

[43] **Rioja R.J. ve Laughlin D.E**., 1980. The Sequence of Precipitation in Cu-2% Be Alloys, *Acta Metallurgica*, Vol **28**, pp 1301-1313.

[44] **Rapor**, 2004. TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, 2004. Ölçüm Raporu, Rapor No:2004.MST.038, Rapor Tarihi:20.04.2004.

[45] **Rapor**, 2004. TÜBİTAK Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Analiz Raporu, Rapor No:B.02.1.BAK.5.01.55.00/306 4444, Rapor Tarihi:22 Mart 2004.

[46] **Sgobba S., Parrini L. ve Künzi H.Ü.,** 1994. Analysis of the anelastic creep of Al and two Al-Cu alloys. *Journal of Alloys and Compounds*,211/212

[47] **Nipperus F G.,** 1981. Equipment for the measurement of elastic after-effect on flexure in metal foils, suited for irradiation experiments, *J.Phys E:Scientific Instruments*,1981 Vol.**14**

[48] **ISO-GUM**, 1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, *International Organization for Standardization*, İsviçre.

[49] **EA-4/02**, 1999. Expression of the Unvertainity of Measurement in Calibration, *European co-operation for Accreditation*, Fransa.

[50] **Kochsiek M.ve Glaser M**., 2000. Comprehensive Mass Metrology, Wiley-Vch

[51] **Cagnoli G., Gammaitoni L., Kovalik J., Marchesoni F. ve Punturo M.,** 1999 Low-frequency internal friction in clamped-free thin wires, Physics Letters A, 255, 230-235

[52] **Granato A. ve Lücke K.,** 1956. Theory of Mechanical Damping Due to Dislocation, Journal of Applied Phyics, V **27**, No 6, June.

[53] **Granato A. ve Lücke K.,** 1956. Application of Dislocation Theory to Internal Friction Phenomena at High Frequencies, *Journal of Applied Phyics*, V **27**, No 7, July.

[54] **Zhang J., Perez R.J. ve Wong C.R.,** 1994. Effects of secondary phases on the damping behaviour of metals, alloys and metal matrix composites, *Materials Sceince and Engineering*, **R13**, 325-390.

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Çorum'un Alaca ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini aynı yerde tamamladı. 1990 yılında K.T.Ü Makina Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 1994 yılında Konstrüksiyon ve İmalat programından mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü Makina Fakültesi'nde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. İ.T.Ü'de 1 yıl İngilizce hazırlık okuduktan sonra 1996 yılında İ.T.Ü Makina Fakültesi, Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1997 yılında İmalat programından "Yüksek Mühendis" olarak mezun oldu. 1997 yılında İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Konstrüksiyon ve İmalat programında Doktora öğrenimine başladı. 1998 yılında 261. dönem olarak askere gitti. Görevini, 4 ayı İzmir Gaziemir Ulaştırma Okulu'nda, kalan 12 ayı da M.S.B. ARGE Dairesi'nde asteğmenlik olmak üzere toplam 16 ayda tamamladı.

2000 yılında İ.T.Ü. Makina Fakültesi'ndeki görevinden istifa ederek TÜBİTAK-UME Basınç Laboratuvarında "Araştırmacı" olarak göreve başladı. 2002 yılına kadar ilgili laboratuvarda çalışmalarına devam etti. Bu yıllarda, birincil basınç standartlarında malzemede meydana gelen şekil değişimlerine bağlı olarak elde edilen büyüklüklerin Sonlu Elemanlar Analizi ile tespit edilmesine yönelik devam eden "Euromet 463" adlı uluslararası projede Türkiye'yi temsil etti. 2002 yılı Eylül ayı itibarıyla çalışmalarına TÜBİTAK-UME Kütle Standartları Laboratuvarı'nda devam etti. Halen aynı laboratuvarda görevini sürdürmekte olup, 2002 yılından bu yana da evlidir.