

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

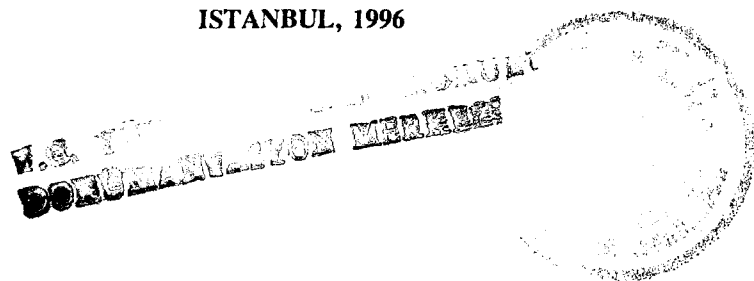
**UZUNLUK BİRİMİNİN BİRİNCİL ULUSAL
REFERANS STANDARDINDAN SÂNAYİYE
TRANSFERİ VE ÇİFT FREKANS LAZER
ENTERFEROMETRESİ İLE ÖLÇÜ
LOKMAALARININ KALİBRASYONUNUN
METODİK ÇÖZÜMÜ**

Mak.Yük.Müh. Şakir BAYTAROĞLU
F.B.E. Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr.Ahmet EKERİM

İSTANBUL, 1996



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
İÇİNDEKİLER	iii
SEMBOL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xv
KISALTMALAR LİSTESİ	xvii
TEŞEKKÜR	xviii
ÖZET	xix
SUMMARY	xx
BÖLÜM I	1
1. GİRİŞ	1
BÖLÜM II	7
2. UZUNLUK ÖLÇÜM SİSTEMLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	7
2.1 Giriş	7
2.2 İzlenebilirlik ve Uzunluk Biriminin, Birincil Seviye Laboratuvarlardan	
Sanayiye İzlenebilirliğin Sağlanması	7
2.2.1 Referans Standart Kavramı	8
2.2.2 Kalibrasyon Zinciri	8
2.2.3 İzlenebilirlik Prensipleri	8
2.2.4 Metrolojide Ölçü Lokmalarının Kalibrasyonunun Önemi	9
2.2.5 Ölçü Lokmalarının Kalibrasyon Metodları ve Hiyerarşisi	10
2.3 Uzunluk Birimi	11
2.3.1 Uzunluk Referans Standardı He- Ne/ ¹²⁷ I ₂ Stabilize Lazer	11
2.3.2 Kullanılan Lazer'lerin Kalibrasyonu ve Doğruluğunun Tespiti	21
2.4 Mutlak Ölçüm Metodları	24
2.4.1. Enterferometreler	28
2.4.1.1 Zeiss Jena Enterferometresi	30
2.4.1.2 Tusugami Enterferometresi	30
2.4.1.3 Metrik Zeiss-Kösters Enterferometresi	31
2.4.1.4 Çift Frekans Lazer Enterferometresi	32
2.5 Karşılaştırma Ölçüm Metodu	35
2.6 Mutlak ve Karşılaştırmalı Ölçümlerde Ölçmeyi Etkiyen Faktörler	35



2.6.1 Havanın Kırılma İndisi Enterferometrik Ölçümler Üzerindeki Etkisi	36
2.6.1.1 Karbondioksit (CO ₂) Miktarının Kırılma İndisi Üzerindeki Etkisi	37
2.6.1.2 Su Buhar Basıncının Etkisi	37
2.6.1.3 Referans Optik Düzlem Etkisi	37
2.6.1.4 Ölçü Lokmalarının Konum Etkisi	37
2.6.2 Ortam Sıcaklığının Etkisi ve Stabilizasyon Süresi	41
2.6.3 Sıcaklık Değişiminin Ölçü Lokmasının Uzama Katsayısının Üzerindeki Etkisi	41
2.6.4 Ölçü Lokmalarının Yüzey Durumu ve Yüzey Kalitesi	46
2.7 Ölçüm Belirsizliği	49
2.7.1 Enterferometrik Ölçümlerde Ortam Sıcaklığının Ölçülmesi ve Belirsizliğin Hesaplanması	49
2.7.2 Ölçü Lokmalarının Belirsizliği	55
2.7.2.1 Referans Uzunluk Standardının Belirsizliğin Katkısı	57
2.7.2.2 Çift Frekans Lazerin Belirsizliğinin Katkısı	57
2.7.2.3 Referans ve Kalibre Edilen Ölçü Lokmaları Arasındaki Farkın Belirsizliğinin Katkısı	58
2.7.2.4 Ölçü Lokmalarının Uzama Katsayısının Farklılığından Dolayı Kaynaklanan Belirsizliğinin Katkısı	58
2.7.2.5 Ölçü Lokmalarının Sıcaklık Farkından Dolayı Kaynaklanan Belirsizlik	59
2.7.2.6 Ölçü Lokmalarının Genişletilmiş Belirsizlik Değeri	60
2.8 Uzunluk ve Boyutsal Metroloji Laboratuvarlarının Ortam Şartları	61
BÖLÜM III	64
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	64
3.1 Giriş	64
3.1.1 Ölçü Lokmalarının Kalibrasyonunda Kullanılan Çift Frekans Lazerin Kalibrasyonu	64
3.1.2 Deney Prosedürü ve Sonuçları	66
3.2 Ölçü Lokmalarının Kalibrasyonu	70
3.2.1 Ölçüm Sonuçlarının Düzeltilmesi	74
3.2.2 Sıcaklık Düzeltmesi	74
3.2.3 Ölçüm Sonuçları	75
3.2.4 Ölçüm Belirsizliği	75
3.2.5 Kalibrasyon Periyodu	83
BÖLÜM IV	85
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	85
KAYNAKLAR	90

EK-1 Dökümante İzlenebilirliğinin Akış Diyagramı	99
EK-2 Ölçü Lokmalarının Kalibrasyon Hiyerarşik Seviyesi	100
EK-3 ISO 3650'e Göre Ölçü Lokmalarının Nominal Boyutun Değişim Aralığı ve Müsaade Edilen Tolerans Değerleri	101
EK-4 BIPM 7 ve BIPM 4 Karşılaştırma Sonuçları	103
EK-5 Elektro-mekanik Ölçü Lokma Komparatörü ve Ölçü Lokmaları İle İlgili Terimler	105
EK-6 Ölçü Lokmalarının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrileri	108
EK-7 Forsythe Polinomu İle İlgili Sonuçlar	113
EK-8 T Tipi Isılçiftlerin Kalibrasyon Sonuçları	115
EK-9 Laboratuvar İklimlendirme Sisteminin Şematik Gösterimi	118
EK-10 UME'de ve INM'de Yapılan Ç.F. Lazer Kalibrasyon Sonuçları	119
EK-11 Ölçü Lokmalarının Kalibrasyon Sonuçları	157
EK-12 Kalibrasyon Periyodunun Belirlenmesi İle İlgili Sonuçlar	163
EK-13 Titreşim Ölçümleri	168
EK-14 Deneylerde Kullanılmış Olan Teçhizatların Listesi	169
ÖZGEÇMİŞ	173



SEMBOLLER LİSTESİ

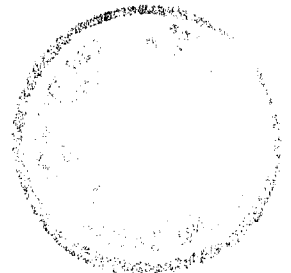
A	: Anod
Å	: Åmstrong
B	: Belirsizlik Tipi
B	: Matris
C	: Katod
E	: Young Elastik Modülü
I	: Işık Şiddeti
J	: J Tipi Isılçift
K	: K Tipi Isılçift
L	: Lazerin Rezonans Kavitesinin Uzunluğu
L	: Lazerin Rezonans Kavitesinin Uzunluğu
L	: Ölçü Lokmasının Nominal Değeri
P	: Uygulanan Kuvvet
P	: Superpozisyon Noktası
R	: Bağlı Nem
S	: Ölçü Lokmasının Ölçme Yüzeyinin Alanı
T	: Titreşim Periyodu
T	: T Tipi Isıl Çift
U	: Titreşim Genliği
V	: Volt
X	: Yer Değiştirme
Φ	: Faz Farkı
σ	: Standart Sapma
B^T	: Transpose Matris
Cs	: Sezyum Atomu
CO	: Karbonmonoksit
He	: Helyum
HT	: Yüksek Voltaj
Ne	: Neon
Pa	: Paskal
Re	: Reel
RF	: Radyo Frekans

Rh	: Bağıl Nem
$V(\Phi)$	: Varyans
$S(\alpha)$	: Uzama Katsayısının Standart Sapma Değeri
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
K	: Kelvin
Ir	: İridyum
Pt	: Platinyum
dB	: Desibel
CCD	: Tv Kamera
Cos	: Kosinus
MHz	: Mega Hertz
THz	: Tera Hertz
PZT1	: Piezo Kristal 1
PZT2	: Piezo Kristal 2
D_1	: Birinci Detektör
D_2	: İkinci Detektör
D_1	: Birinci Cismin Yarı Çapı
D_2	: İkinci Cismin Yarı Çapı
D_i	: Düzeltme Faktörü
E_n	: Normalize Hata
E_n	: Girişim Saçaklarının Nominal "Artık Oran" (Excedent Fractionnaire) Değeri
E_m	: Ölçüm Sonucu Elde Edilen Girişim Saçaklarının " Artık Oran "Değeri
E_1	: Lazerin Dikey Polarizasyonun Elektrik Alanı
E_2	: Lazerin Yatay Polarizasyonun Elektrik Alanı
F_0	: Referans Lazer'in Modulasyon Frekansı
L_m	: Ölçü Lokmasının Ölçüm Sonucundaki Değeri
L_R	: Referans Lazer
L_t	: t Sıcaklığında Ölçü Lokmasının Boyutu
$L_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$	: 20 $^{\circ}\text{C}$ Sıcaklıkta Ölçü Lokmasının Boyutu
H_p	: Horizontal Polarizasyon
N_n	: Girişim Saçaklarının Tam Sayısı
N_m	: Ölçüm Sonucu Elde Edilen Girişim Saçaklarının Tam sayısı
O_2	: Oksijen

R_a	: Yüzey Kalitesi
U_{lab}	: Laboratuvar Belirsizlik Değeri
U_{ref}	: Referansın Belirsizlik Değeri
U_T	: Toplam Belirsizlik
V_R	: Bağlı Varyans
X_0	: Başlangıç Yer Değiştirme Değeri
x_i	: Deney Noktaları
y_i	: Deney Noktaları
τ_1	: Birinci Cismin Poisson Katsayısı
τ_1	: İkinci Cismin Poisson Katsayısı
CO_2	: Karbondioksit
$P_i(x)$	: Polinom
$W(t_{90})$	: ITS 90 Göre Isılçiftlerin Sıcaklık-Mv Değerleri
W_{ref}	: ITS 90 Uygun Isılçiftlerin Sabit Sıcaklık Noktalarına Göre Sıcaklık-Mv Değerleri
H_2S	: Hidrosülfür
L_{ab}	: Lazerin Göstergesinde Okunan Kalibre Edilecek Ölçü Lokmasının Sol Yüzeyinin Değeri
L_{an}	: Lazerin Göstergesinde Okunan Kalibre Edilecek Ölçü Lokmasının Sağ Yüzeyinin Değeri
L_{ab}	: Lazerin Göstergesinde Okunan Referans Ölçü Lokmasının Sol Yüzeyinin Değeri
L_{an}	: Lazerin Göstergesinde Okunan Referans Ölçü Lokmasının Sağ Yüzeyinin Değeri
$LAB_{sonuç}$	: Kalibrasyon Laboratuvarının Beyan Ettiği Sonuç
$Ref_{değer}$	: Referans Laboratuvarının Beyan Ettiği Sonuç
c	: Işık Hızı
e	: e sayısı
f	: Kullanılan Işık Kaynağının Frekansı
g	: Yer Çekim Kuvveti
g	: Uzunluk Referans Standardının Soğurma Çizgisi
i	: Kompleks Sayı
i	: Uzunluk Referans Standardının Soğurma Çizgisi
j	: Uzunluk Referans Standardının Soğurma Çizgisi
k	: Tam Sayı
h	: Plank Sabiti
n	: Ölçüm Sayısı
n	: Tam Sayı

n	: Ortamın Kırılma Indisi
p	: Ortam Basınç Değeri
u	: Kompleks Genlik
t	: Ortam sıcaklığı
t	: Zaman
t	: Student Dağılımının Katsayısı
t	: Zaman
z	: Z Hareket Doğrultusu
α	: Uzama Katsayısı
ϵ	: Foton Enerjisi
λ	: Işık Kaynağının Dalga Boyu
ν	: Dönüşüm Frekans Farkı
π	: pi
q	: Boyut Deformasyon Değeri
α	: Temas Deformasyon Değeri
$\underline{\sigma}$	: Standart Sapma
$\bar{u}$	: Poisson Katsayısı
$\underline{\sigma}$	: Bağlı Standard Sapma
$\underline{\sigma}^2$	: Varyans
$\underline{\sigma}^2$	: Bağlı Varyans
Ψ	: Harmonik Distorsyon
τ	: Ölçüm Süresi
ϵ_i	: i Fotonların Yüksek Enerji Seviyesi
ϵ_j	: j Fotonların Alçak Enerji Seviyesi
ϵ_1	: Lazerin Dikey Polarizasyonunun Başlangıç Elektrik Alan Değeri
ϵ_2	: Lazerin Yatay Polarizasyonunun Başlangıç Elektrik Alan Değeri
ϵ_s	: Sistematik Hata
f_0	: Referans Uyarma Frekansı
f_s	: Ölçü Lokmasının Sapma Değeri
f_u	: Ölçü Lokmasının Sapma Değeri
f_o	: Ölçü Lokmasının Sapma Değeri
l	: Referans Ölçü Lokmasının Gerçek Değeri (Sertifika Değeri)
l	: Kalibre Edilecek Ölçü Lokmasının Tespit Edilmesi İstenilen Değeri

t_{90}	: ITS 90 Göre Sıcaklık Değeri
Φ_j	: Forsythe Polinomunun Katsayıları
$\Phi(t)$	: Faz
ϕ_1	: Birinci Dalganın Fazı
ϕ_2	: İkinci Dalganın Fazı
λ_a	: Havadaki Dalga Boyu
λ_v	: Vakum Ortamında Dalga Boyu
λ_r	: Referans Dalga Boyu
α_k	: Ortogonal Polinomunun Katsayıları
β_k	: Ortogonal Polinomunun Katsayıları
Δ_i	: Sistematik Hata
δ_i	: Rastgele Hata
σ_y^2	: Allan Varyansı
$\nu(t)$	: Anlık Frekans Değeri
ν_{ij}	: Frekans Farkı
ω_0	: Titreşim Genliği
$y(t)$	: Bağlı Anlık Frekans Değişimi
χ	: Havadaki CO ₂ miktarı
fm	: Fetometre
mA	: Miliamper
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
dt	: Zaman Aralığı
μm	: Mikrometre
μT	: Microtesla
$\partial \nu$	: Referans Frekans
δF	: Birim Kuvvet Değeri
δl	: Birim Uzunluk Değeri
δl	: Ölçü Lokmasındaki Boyut Farkı
ϵ_s	: Sistematik Hata
∂L	: Rezonans Kavite Uzunluğunun Değişimi
ν_1^0	: Fark Frekans
$\delta \lambda$	: Spektral Genişlik



$\Delta\lambda$	: Spektral Genişlik
$\delta\Phi$	: Faz Değişimi
emf	: Elektromotor Kuvvet
kHz	: Kilohertz
$^{127}\text{I}_2$	: İyod 127 İzotopu
δt_i	: Sıcaklık Artışları
$2S_1$	: Helyum Atomunun Enerji Seviyesi
$2S_3$	: Helyum Atomunun Enerji Seviyesi
$3S_2$	: Neon Atomunun Enerji Seviyesi
$2S_2$	: Neon Atomunun Enerji Seviyesi
$3p_4$	: Neon Atomunun Enerji Seviyesi
$2p_4$	: Neon Atomunun Enerji Seviyesi
$2p_{10}$	: Kripton Atomunun Enerji Seviyesi
$5d_5$	: Kripton Atomunun Enerji Seviyesi
ν_r	: Referans Frekans Değişimi
δl_a	: Referans Ölçü Lokmasının Boyut Sapma Değeri
δl_u	: Kalibre Edilecek Ölçü Lokmasının Boyut Sapma Değeri

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Eski Metre Prototipi	3
Şekil 2.3.1.1	He-Ne Lazerinin Şematik Gösterimi	13
Şekil 2.3.2.2	He-Ne Lazerinin Enerji Geçiş Seviyeleri	14
Şekil 2.3.1.3	Lazerin Spektral Profil Genişliği	16
Şekil 2.3.1.4	Lazerin Kazanç Eğrisi ve İyodun Soğurma Çizgileri	17
Şekil 2.3.1.5	He-Ne/ ¹²⁷ I ₂ Stabilize Lazerin Soğurma Çizgileri	18
Şekil 2.3.4.6	Frekansta Stabilize Lazerin Blok Diyagramı	20
Şekil 2.3.2.1	Uzunluk Referans Standartlarının Kalibrasyon Düzeneği	22
Şekil 2.4.1	Oransal Artık Değeri	29
Şekil 2.4.1.1.1	Zeiss Jena Enterferometresi	30
Şekil 2.4.1.2.1	Tusugami Enterferometresi	31
Şekil 2.4.1.3.1	Metrik Zeiss- Kösters Enterferometresi	32
Şekil 2.4.1.4.1	Çift Frekans Lazerin Şematik Gösterimi	33
Şekil 2.6.1.4.1	Ölçü Lokmasında Kendi Ağırlığının Etkisi ile Oluşan Deformasyon	38
Şekil 2.6.1.4.2	Ölçme Probenin, Ölçü Lokması Yüzeyine Oluşturduğu Temas Deformasyon	40
Şekil 2.6.4.1	Ölçme Probenin, Ölçü Lokması Yüzeyine Zamanla Oluşturduğu Temas Deformasyonunun İzi	46
Şekil 2.6.4.2	İyi Temizlenmemiş ve Ortam Koşullarından Dolayı Oluşan Korozyon İzleri	47
Şekil 2.6.4.3	Temizlik Malzemelerinin Oluşturduğu Leke ve Korozyon İzleri	47
Şekil 2.6.4.4	Ölçü Lokması Yüzeyinde Kötü Kullanımdan Dolayı Oluşmuş Çizikler	48
Şekil 3.1.1.1	ÇF Lazerin, Ulusal Uzunluk Referansı ile Kalibrasyonu İçin Laboratuvarda Kurulan Deney Düzeneği	65
Şekil 3.1.1.2	ÇF Lazerin, Ulusal Uzunluk Referansı ile Kalibrasyonu İçin Laboratuvarda Kurulan Deney Düzeneği	65
Şekil 3.1.2.1	INM'de Kalibre Edilen ÇF Lazerin Bağlı Kararlılığı	67
Şekil 3.1.2.2	UME'de Kalibre Edilen Aynı Tip ÇF Lazerin Bağlı Kararlılığı	67
Şekil 3.1.2.3	"J" Soğurma Çizgisinde Stabilize Edilmiş Referans Lazerin ve Ç.F. Lazerin Dikey Polarize Modu Arasındaki Girişim	68
Şekil 3.1.2.4	"J" Soğurma Çizgisinde Stabilize Edilmiş Referans Lazerin ve Ç.F. Lazerin Yatay Polarize Modu Arasındaki Girişim	68

Şekil 3.1.2.5	İNM'de Kalibre Edilmiş Ç.F. Lazerin Dikey ve Yatay Polarizasyonlarının Girişimi	69
Şekil 3.1.2.6	UME'de Kalibre Edilmiş Ç.F. Lazerin Dikey ve Yatay Polarizasyonlarının Girişimi	69
Şekil 3.2.1	Ölçü Lokmalarının Ölçme Düzeneginin Şematik Gösterimi	73
Şekil 3.2.2	Ölçü Lokmalarının Kalibrasyonu İçin Laboratuvarda Kurulmuş Olan Ölçme Düzenegi	74
Şekil 3.2.3.1.1	Normlaştırılmış Hata Değerleri	84
Şekil 4.1.2	Ölçü Lokmalarının Pratik Seçim Metodu	88
Şekil 4.1.2	100 mm'ye Kadar Olan Ölçü Lokmalarının İzlenebilirlik Zinciri	89
Şekil E 1	Dökümante İzlenebilirliğinin Akış Diyagramı	99
Şekil E 5.1	Elektro-Mekanik Ölçü Lokma Komparatörü	105
Şekil E 5.2	Ölçü Lokmalarının Ölçümünde Kullanılan Terimlerin Gösterimi	106
Şekil E 5.3	Elektro-Mekanik Komparatör İle Yapılan Ölçümlerde, Ölçme Noktalarının Şematik Gösterimi	107
Şekil E 6.1	15 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi	108
Şekil E 6.2	20 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi	108
Şekil E 6.3	25 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi	109
Şekil E 6.4	50 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi	109
Şekil E 6.5	100 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi	110
Şekil E 6.6	200 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi	110
Şekil E 6.7	300 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi	111
Şekil E 6.8	500 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi	111
Şekil E 6.9	1000 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi	112
Şekil E 8.1	1.ci T Tipi Isılçiftin Kalibrasyon Eğrisi	115
Şekil E 8.2	2.ci T Tipi Isılçiftin Kalibrasyon Eğrisi	115
Şekil E 8.3	Isılçiftlerin Kalibrasyon Düzenegi	117
Şekil E 9.1	UME Laboratuvarlarında Kullanılan İklimlendirme Sisteminin Şematik Gösterimi	118
Şekil E 10.1	Ana Program	133
Şekil E 10.2	Veri Toplama Programı	134
Şekil E 10.3	Veri İşleme Programı	135
Şekil E 10.4	Ç.F Lazerin Bağlı Kararlılık Eğrisi	156

Şekil E 12.1	Ölçü Lokmalarının 1988-1994 Aralığında Boyut Değişimi	163
Şekil E 12.2	Ölçü Lokmalarının Sonuçları Üzerindeki Birinci Farklar	163
Şekil E 12.3	Ölçü Lokmalarının Sonuçları Üzerindeki İkinci Farklar	164
Şekil E 12.4	Ölçü Lokmalarının Sonuçları Üzerindeki Üçüncü Farklar	164
Şekil E 13.1	Ölçümlerin yapıldığı Masanın Titreşim Seviyeleri (Hafta İçi)	168
Şekil E 13.2	Ölçümlerin Yapıldığı Masanın Titreşim Seviyeleri (Hafta Sonu)	168



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.3.1.1	Lazerin Stabilizasyon Parametreleri ve Yöntemleri	20
Tablo 2.6.1.4.1	Metrolojide Kullanılan Bazı Malzemelerin Özellikleri	40
Tablo 2.6.3.1	Çeşitli Malzemelerden Yapılmış Ölçü Lokmalarının Uzama Katsayıları	42
Tablo 2.7.1.1	Suyun Üçlü Noktasının Belirsizlik Bütçesi	52
Tablo 2.7.1.2	Galyum Sabit Sıcaklık Noktasının Belirsizlik Bütçesi	53
Tablo 2.7.1.3	Referans Sıcaklık Banyosunun Belirsizlik Bütçesi	54
Tablo 2.8.1	Uzunluk ve Boyutsal Metroloji Laboratuvarlarının Ortam Koşulları	62
Tablo 3.1.2.1	Fark Frekans Ölçüm Sonuçları	66
Tablo 3.2.3.1.1	50 mm'lik Ölçüm Lokmasının Belirsizlik Bütçesi	76
Tablo 3.2.3.1.2	25 mm'lik Ölçüm Lokmasının Belirsizlik Bütçesi	77
Tablo 3.2.3.1.3	20 mm'lik Ölçüm Lokmasının Belirsizlik Bütçesi	78
Tablo 3.2.3.1.4	15 mm'lik Ölçüm Lokmasının Belirsizlik Bütçesi	79
Tablo 3.2.3.1.5	10 mm'lik Ölçüm Lokmasının Belirsizlik Bütçesi	80
Tablo 3.2.3.1.6	5 mm'lik Ölçüm Lokmasının Belirsizlik Bütçesi	81
Tablo 3.2.3.1.7	Belirsizlik Değerleri	82
Tablo 3.2.3.1.8	Ölçüm Sonuçları	82
Tablo 3.2.3.1.9	Normlaştırılmış Hata Değerleri	83
Tablo 3.2.5.1	Ölçü Lokmalarının Yıllara Göre Nominal Boyut (L_N) Değişimi	84
Tablo 4.1	Klasik, Ç.F Lazer Enterferometresi ve Elektro-Mekanik Komparatör İle Ölçülmüş Olan 860703 Nr.lı Ölçü lokmalarının Ölçüm Sonuçları	85
Tablo 4.2	Ç.F. Lazerlerin Kalibrasyon Sonuçları	86
Tablo E 2.1	Ölçü Lokmalarının Kalibrasyon Hiyerarşik Seviyesi	100
Tablo E 3.1	ISO 3650'e Göre Ölçü Lokmalarının Nominal Boyutun Değişim Aralığı	101
Tablo E 3.2	ISO 3650'e Göre Ölçü Lokmalarının Müsaade Edilen Tolerans Değerleri	102
Tablo E 4.1	BIPM 7 ve BIPM 4 Karşılaştırma Sonuçları	103
Tablo E 4.2	BIPM 7 ve BIPM 4 Karşılaştırma Sonuçları	104
Tablo E 7.1	500 mm 'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklıkla Boyut Değişimi	113
Tablo E 7.2	Forstythe Polinomunun Katsayıları	114
Tablo E 7.3	Forstythe Polinomu İle Hesaplanan Standard Sapma Değerleri	114
Tablo E 8.1	1.ci ve 2.ci T Tipi Isıl Çiftlerin Kalibrasyon Sonuçları	116



Tablo E 11.1	50 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu	157
Tablo E 11.2	25 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu	158
Tablo E 11.3	20 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu	159
Tablo E 11.4	15 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu	160
Tablo E 11.5	10 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu	161
Tablo E 11.6	5 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu	162



KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AGMC	: Air Force Guidance Metrology Center
AID	: Aide for Industry Development
BIPM	: Le Bureau International Des Poids Et Mesure
BNM	: Bureau National De Metrologie
CGPM	: Conferance General Des Poids et Mesure
CNAM	: Conservatoire National Des Artes Et Meties
Ç.F.	: Çift Frekans Lazer
EIPT 90	: L'Echelle International Pratique de Temperature
ITS 90	: International Temperature Scale
ISO	: International Standard Office
INM	: Institut National de Metrologii
LNE	: Laboratoire National D'Essais
MAM	: Marmara Araştırma Merkezi
MFÖSM	: Milli Fizik ve Teknik Ölçme Standartları Merkezi
NBS	: National Bureau of Standarts
TSE	: Türk Standartlar Enstitüsü
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
UNIDO	: United Nations Industrial Development Organization
UNDP	: United Nations Development Programme
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı

TEŞEKKÜR

Doktora tezimi yöneten ve öneriler ile destekleyen sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet EKERİM'e, YILDIZ Üniversitesi Fizik-Kimya Mühendislik Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Ahmet TOPUZ'a ve Metalurji Bölümü'nün Öğretim üyeleri Prof. Dr. Ali TOPBAŞ, Bölüm desteği ve çalışmamı bilimsel olarak yönlendiren TÜBİTAK- Ulusal Metroloji Enstitüsü Başkanlarından Doç. Dr.A. Birol ALTAN'a, Dr.Temel YALÇIN'a ve BIPM'de Uzunluk Laboratuvarı Şefi Fizikçi J.M. CHARTIER, INM'den Uzunluk laboratuvarı sorumlusu Fizikçi Y.MILLARIEUX ve deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen TÜBİTAK araştırmacıları, Adnan BUMİN, Engin KONUR, Belgin BUMİN, Araştırma Teknisyenleri Sefa OGAN ve Mehmet M.ARSUNAR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Doktora Yapmama izin veren TÜBİTAK - Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Merkezi Müdürlüğüne teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Istanbul, 1996

Şakir BAYTAROĞLU



ÖZET

Metroloji ve ölçme referans standartları, ülkelerin ölçme birliğini temin eden ve sistemleştiren unsurlar olup aynı zamanda uluslararası ölçü birliğinin oluşmasını sağlar. Kalite kontrol açısından bakıldığında metroloji ülkelerin ürün ve mamulleri kalitesini yükseltmeye ve rekabet gücünü artırmaya yönelik önemli bir adım oluşturmaktadır. Son yıllarda dünyada oluşan yeni kalite anlayışı, ölçme ve kalibrasyonun önemini daha da artırmıştır. Bu yeni kalite sistemi, üretilen her türlü mamülün kalitesinin tesbitinde kullanılan teçhizatları bir ölçme zinciri içerisinde kalibreli ve izlenebilir olmasını şart koşar. Bu gereksinim kalibrasyon taleplerini artmasına yol açmakta genelde Metroloji, özelde uzunluk ve boyutsal metroloji konusunda organize bir ölçme sistemine olan ihtiyaç için gerekçe oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, uzunluk ve boyutsal metroloji konusunda ulusal ölçme sisteminin oluşturulması, sürdürülmesi, ülke içinde yaygınlaştırılması aşamalarında, özellikle uzunluk biriminin birincil seviyeden sanayiye iletilmesinde karşılaşılan sorunlar incelenmiştir. Bu çerçevede, uzunluk biriminin referans standardı olan He-Ne/I₂ stabilize lazerin gerçekleştirilmesi konusunda yapılmış çalışmalar temel alınarak, referans standardı boyutsal metrolojide boyut ölçümlerinde kullanılan Ç.F. LAZER boyut ölçüm sistemlerinin kalibrasyonu gerçekleştirilmiş ve bu Ç.F. Lazer sistem kullanılarak sanayide referans ve çalışma standardı olarak kullanılan ölçü lokmalarının kalibrasyonu, ölçme yöntemleri, izlenebilirlik, ölçümleri etkileyen faktörler, ortam şartları ve ölçü lokmalarının ölçümlerindeki belirsizlikler ele alınmıştır. Bunun yanı sıra uzunluk ve boyutsal metroloji alanında hiyerarşik sistem tanımlanmış ve sanayimizdeki durum incelenmiştir.

Bir yenilik olarak, uygulamada henüz kullanılmayan bir yöntem olan, ölçü lokmalarının Çift Frekans lazer yardımı ile kalibre edilebilirlik konusu araştırılmış, ölçme metodu ve kalibrasyon aralığının tespiti ile ilgili bir model geliştirilmiştir.

Metodun uygulamasında ölçmeyi etkileyebilecek faktörler dikkate alınmıştır. Sonuçta, bu metod ile elde edilen veriler diğer metodlarla elde edilenlerle karşılaştırılmak suretiyle değerlendirilmiştir.

Geliştirilmiş olan bu metod kullanılarak, ölçü lokmalarının yüksek doğrulukla kalibrasyonlarının yapılabilmesi ve boyutsal izlenebilirliğinin en üst referanstan, sanayiye kadar olan kalibrasyon zinciri içerisinde bu araştırma sonuçlarına uygulanabileceği anlaşılmıştır.



SUMMARY

Metrology and measurement reference standards are the main physical structures which establish the measurement hierarchy of a country and make their measurement services organized. The other benefit is that these measurement standards constitute the connection between national and international measurement services and activities. Regarding to the contribution to the trade and production of a country, metrology is considered as an unavoidable infrastructure for quality control systems and its applications to assure the quality of the products and goods and compete in the international market. In the last few decades, the new worldwide trade of quality increased the importance of calibration and measurement. This new quality system stipulates for the equipment that is used to determine the quality of the goods and production, to be calibrated within the chain providing traceability. This requirement increased the demands for calibration and justified the needs to a well organized measurement system.

In this study, in the course of establishment, maintainability, dissemination of the national measurement system the problems experienced concerning the transferring of the national standards of length have been researched. In the frame, a laser system used for dimensional measurements has been calibrated based on the national length standard that is a He-Ne/I₂ stabilized laser realized nationally. By using this calibrated laser system as a transfer standard, calibration of the gauge block used as working standards in the industry has been performed taking the measurement methods, traceability, factors effecting, environmental conditions, uncertainty into account. Besides that the measurement hierarchy for the length and dimensional metrology issues has been defined and the situation of Turkish industry also has been investigated. As a new idea, the subject of capability of double frequency laser to calibrate the gauge blocks has been searched. For this purpose a mathematical model has been developed for the measurement and calibration methods and determination of recalibration period.

The factors which would effect the measurement during in experimental period of the methods are considered as effecting parameters.

In conclusion, the results obtained by this method have been evaluated by comparing with the results from other methods.

Finally it is discussed that the high accurate calibration of the gauge blocks is possible and the traceability within the calibration chain from the primary standard to the industrial standards comply with the result of this method.

BÖLÜM I

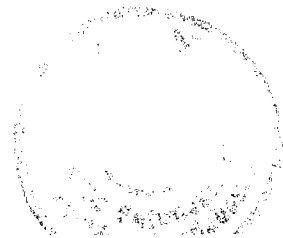
1. GİRİŞ

Metroloji, kelime anlamı olarak ölçme bilimidir ve SI birimler sisteminin temel birimleri olan metre, kilogram, saniye, termodinamik sıcaklık, amper, ışık şiddeti (kandela) ve madde miktarı (mol)'nı tanımlayıp, bunlardan türetilmiş diğer fiziksel birimlerle birlikte, bilim ve teknoloji için temel oluşturmaktır. Teknolojinin hızla geliştiği günümüzde; hassas, doğru ve güvenilir ölçümler ile çalışmak bilim, sanayi, sağlık alanlarında ve günlük yaşamda, hemen her aşamada kaçınılmaz bir gereksinim olup, aynı zamanda ülkelerin gelişmişlik seviyesini belirleyen temel unsurlardan birisidir. Toplumun kullanımına sunulan yüksek teknoloji mamülleri ve bunların ekonomik olabilmelerini sağlayan seri üretimin gereği olarak, bu mamülleri oluşturan yüzlerce parça, belirli toleranslar dahilinde ve hassas olarak aynı özelliklerde üretilmek zorundadır. Bu ise, boyut, sıcaklık, ağırlık, güç, empedans, akım, basınç ve diğer fiziksel, mekanik ve elektriksel özelliklerin doğru olarak ölçülmesi ile mümkün olabilmektedir. Ancak, günümüzde nihai ürünün oluşturacak olan bu yüzlerce parçanın yan sanayi kuruluşlarınca farklı yerlerde üretildikleri gözönüne alındığında farklı yerlerde yapılan benzeri ölçümlerin doğruluğu ve eşdeğerliğinin sağlanması, kalite ve rekabet gücü gibi öncelikler açısından bir gerekliliktir ve organize bir metroloji sistemi gerektirmektedir.

Sanayi devriminin dünya ticaret hacminde yarattığı artış, sanayide, proses, kalite kontrol gibi konuları gündeme getirmiş ve ölçme bilimi bu alanları da kapsamına alarak hızla gelişmiştir. Ölçme biliminin bugün sanayileşme sürecinin hayati bir parametresi olarak düşünülmesinin yegane sebebi, sanayi mamüllerinin kalitesinin teminine yönelik bir titizlik değildir. Karakteristikleri kesinlikle belirlenmiş bir referans sistemine göre yapılacak **Metrolojik** ölçümler, üretim prosesinin başarıya ulaşabilmesi için gereklidir. Sanayileşmiş ülkelerde metroloji; tıpkı ulaşım, iletişim, enerji v.s gibi temel altyapı sistemlerinden biri olarak görülmektedir. Hızla gelişen üretim teknolojileri, **Metroloji ve Kalibrasyona** ilişkin akreditasyon, izlenebilirlik, ölçme ortam koşulları gibi önemli mefhumları üretim süreci kapsamına getirmiştir. Ölçmenin güvenilirliği, ölçme cihazlarının ve donanımlarının teknik ihtiyaçlara cevap verecek seviyede kalibre edilmesi ile sağlanır. Bu sebeple kaliteyi elde etmek için, kalite kontrol uygulamaları içinde ölçme cihazlarının ve donanımlarının metodik kullanılmaları, bakımları ve bir üst referansa göre periyodik kalibrasyonları kaçınılmazdır. Doğru ölçme yapılmaksızın ne ürünün kalitesine, ne de üretim teknolojisinin teknik zorluklarına çözüm getirilemez (Agaletski,1974;Altan,1987;Barbato,1994;Kramer,1988;Quinn¹,1994;Selivanov 1992).

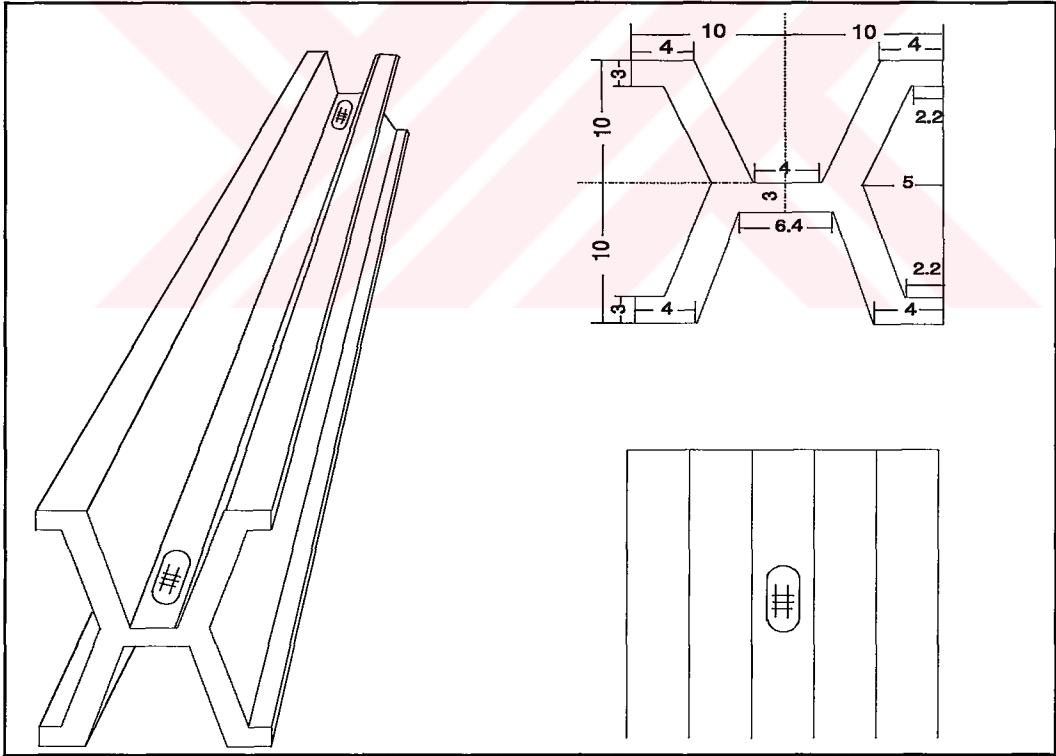
Sanayileşmiş ülkeler bu gerekliliği hissederek sanayileşmeye paralel olarak ulusal ölçme sistemlerinin temelini teşkil edecek altyapıyı 18. yüzyılın sonlarında kurmuşlardır; Örneğin Almanya'da Physikalisch Technische Richsanstalt (PTR) SIMENS firmasının İngiltere'ye ihraç edeceği mamullere bir teknik garanti

garanti sağlayacak şekilde ve bu amaca yönelik olarak 1854'de kurulmuştur (CNAM, 1989; EN 29000-1,1994; Priel,1993; Puttock,1984). Ülkemizde, metroloji ile ilgili ihtiyaçlar 1960'lı yıllarda gündeme gelmiştir. Bu dönemde sanayileşme düzeyimizin büyük kısmı emek yoğun, düşük ve orta düzey teknolojilerden oluşmaktaydı. Sanayi ürünlerinin ihracatımızdaki payı ise çok düşüktü. Buna mukabil 1970 ve 1980'li yıllarındaki sanayileşme çabaları neticesinde, sanayi üretimi tarımsal üretimin önüne geçmiştir. Bu gelişmeler, kalite kontrol sorunlarını, dolayısıyla ölçme sistemlerinin doğruluk seviyeleri, güvenilirliği ve izlenebilirliği gibi sorunlarını belirgin bir hale getirmiştir. Bu aşamada ülkemizde bu eksikliği giderecek çalışmaları metodik olarak başlatmış. Sürekli olarak izleyerek üretilen bilgi ve teknolojik gereçlerin güvenilirliğinin sağlanması için, hammaddesinden başlayıp, imalatın her safhasında, kaliteyi güvence altına alınabilmesi için bir çok tedbir almışlardır . Standardlaştırmayı bu tedbirlerden biri olarak sayabiliriz. Standartlaştırma ile, kalitenin güvence altına alınması ve imalatı, kaynakların daha ekonomik ve tasarruflu olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Ürün kalitesinin güvence altına alınması, tasarım, üretim, üretim sonrası gibi aşamalarda yapılan kontrollerle gerçekleşmekte ve bu kontroller daha çok fiziksel ölçümlere dayanmaktadır. Fiziksel bir niceliğin ölçülmesi, bu niceliğin uygun bir fiziksel birimle karşılaştırılması demektir. Standartlaştırma, kontrol ve kalite güvence kavramları birbirlerini tamamlayan bir bütünün unsurlarını teşkil etmektedir (Seino,1980). Günümüz teknolojik uygulamalarında uzunluk ve boyutsal ölçümler, kullanılan teknolojinin gereği oldukça geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Ölçme ve ölçme standardı oluşturma çalışmalarının, insanlık tarihi ile beraber başladığı söylenebilir. Tarihçilerin bu konuda yaptıkları araştırmalarda ölçme ve ölçme standartları oluşturulması ile ilgili ilk çalışmalar, önce Babil'lilerde, daha sonra Eski Mısır ve Roma'lılarda yapıldığı tespit edilmiştir. Farklı uygarlıkların birbirlerinden bağımsız geliştirdikleri ölçme referanslarının, sonuçları bakımından birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Örneğin İbrani kubit ile Mısır kubit arasındaki fark sadece 1 milimetre'dir. Toplumlar arası ilişkilerin sıklaşması ile birlikte, özellikle ağırlık ve uzunluk birimlerini karşılaştıracak ve bu konuda birliği sağlayacak bir ölçme sistemine ihtiyaç duyulmaya ve daha bilimsel bir yaklaşım aranmaya başlanmıştır. 1581 yılında Galile'nin sarkacı bulması, 1665 yılında Huyghens'in sarkacı zamanı kaydetmek için kullanması ve 1671 yılında Picard'ın, sarkacı uzunluk standardı için önermesi, bu konuda yapılan ilk bilimsel çalışmalardır. Ancak Picard'ın önerisi, yerçekim ivmesinin coğrafik konuma bağlı olmasından dolayı, kabul edilmedi. XVII. yüzyılın ortalarında Fransa'da uzunluk ve ağırlık birimleri ile ilgili referans ölçme sistemi oluşturmaya yönelik çalışmalar başlatılmıştır. 1791 yılında Fransız meclisi, uzunluk birimini, çeyrek meridyenin on milyonda biri olarak tanımlayan ve " METRE " olarak isimlendirilen bir yasayı onaylanmıştır. 1792 ile 1798 yılları arasında Paris boylamının, Dunkerque-Paris-Barselona hattında üçgen metodu ile ölçümü sonucu, 1 " Metre ", 3 ayak ve 11.296 çizgi olarak tanımlanmıştır. Fransız bilim adamı Talleyrand başkanlığında toplanan



uluslararası bir komisyon, astronomlar tarafından bulunan bu değeri onaylamışlardır . 1799'da, dikdörtgen kesitli ve bir yüzü üzerinde bulunan iki çizgi arasındaki uzaklığı bir metre'ye eşit olan ve halen Fransız Ulusal Arşivi'nde prototip olarak muhafaza edilen "ARŞİV METRE" imal edilmiş. 1829 yılında Fransız bilimadamı J.Babinet uzunluk biriminin referans standardını taşıyan bir büyüklüğün, doğada aranmasını önermiş ve uzunluk biriminin, boşlukta değişmeyen monokromatik ışığın dalga boyu cinsinden ifade edilemesini teklif etmiştir. Ancak bu fikir 1892 yılına kadar kabul görmemiştir (CNAM,1989).

Ölçme standartları konusunda evrensel birliği sağlamaya yönelik en önemli gelişme 25 Mayıs 1875 yılında Paris'te toplanan "Metre Konvansiyonu" ile sağlanmıştır. Bu konferansta Metre ve Kilogram'ın tanımları yapılmış ve üye ülkelere bu tanımlara uygun olarak, her ülkenin referans standardını oluşturacak olan Metre ve Kilogram prototiplerinden birer örnek verilmesi karara bağlanmıştır. Bu konferansta ayrıca alınan bir karar doğrultusunda; "X" TRESCA kesitli Platin - İridyum (Pt-Ir) alaşımından yapılmış ve 20°C sıcaklıkta iki çizgi arasında 1 metreyi muhafaza eden bir çubuk, "METRE " olarak tanımlanmıştır (Şekil 1.1) (BIPM,1975).



Şekil 1.1 : Eski Metre Prototipi

Metre konvansiyonu sonrası, 1887 yılında Amerikalı bilim adamı A.A.Michelson uzunluk ölçümlerinde enterferometrik tekniklerin kullanılmasını önermiş ve 1893 yılında kendi adını taşıyan enterferometrenin yardımıyla, metreyi, Kadmiyum tayfındaki kırmızı dalga boyu yardımıyla ifade etmiştir. Bu sonuçlar, Febri ve Perot enterferometresi kullanılarak Benoit, Febri ve Perot tarafından yapılan ölçümlerle doğrulanmıştır. 1921 ile 1936 yılları arasında ilk defa uluslararası düzeyde ulusal prototipler ile uluslararası metre prototipi arasında mukayeseli ölçümler yapılarak, prototiplerinin birbirlerine göre farkları ve sistematik hataları tespit edilmiştir (BIPM,1975). Bu süreç içerisinde, bilim adamları yürürlükte olan metre prototipi yerine, uzunluk referansı olacak yeni bir prototip arayışlarını sürdürmüşler ve bunun neticesinde 1957 yılında "Uluslararası Ölçüler ve Ağırlıklar Konferansı"nın "Metre" tanımı için toplanan danışma komitesi (CCDM), J.Babinet tarafından 1829 yılında önerilen ve Pt-Ir alaşımından yapılmış metre prototipine göre değişimi daha az olan, "ışığın dalga boyu" kullanılarak bir "METRE" tanımlanması için karar almıştır. Bu çalışmaların ışığı altında 14 Ekim 1960 yılında yapılan 11. Ölçüler ve Ağırlıklar Genel Konferansında (CGPM), uzunluk birimi; Kripton 86 atomunun $2p_{10}$ ve $5d_5$ enerji seviyeleri arasındaki geçişi sırasında oluşan ışımanın dalga boyunun 1,650,783.73 katı olarak tanımlanmıştır (BIPM¹,1984; Genceli,1994; Giacomo,1979; Quinn²,1994). Gelişen teknolojiler ve buna bağlı olarak uzunluk biriminin daha yüksek hassasiyetle endüstri'ye transferi, bilim adamlarını yeni arayışlara sevk etmiştir. 1960 yılından sonra lazer teknolojisindeki gelişmelerin sonucu bilim adamları, CGPM kararlarına uygun olarak, Metre tanımı için, vakumda ışığın hız değeri ile aynı özelliklere (dalga boyu ve frekans) sahip Helyum-Neon (He-Ne) Lazer kaynağını önerdiler. Bugün, BIPM ve diğer ülkelerin Ulusal Metroloji Merkezleri, bir fiziki ölçüt olarak primer seviyeden uzunluk referansı standardı için, He-Ne/I₂ stabilize Lazer kaynağı kullanmaktadırlar. 1983 yılında PARIS'te toplanan "Ölçüler ve Ağırlıklar Genel Konferansı"nda (CGPM), "Metre Tanımı için Danışma Komitesi "(CCDM)'nce önerilen ve uzunluk standardının, saniyenin 'ı 1/299,792,458.00 kadar bir zaman aralığı içinde elektromagnetik dalganın vakumda aldığı yol uzunluğu olarak tanımlayan teklifi onaylamıştır. Yeni metre tanımında zaman ve uzunluk arasındaki bağıntı, saniyede 299,792,458.00 metre olarak sabit bir değer şeklinde tanımlanmış olan ışık hızıdır. Bu değer aynı zamanda evrensel bir sabittir (BIPM³,1984). Dolayısıyla yeni tanımın farkı, Kripton'a ve Lazer'e dayanan metre standardından uzaklaşarak bunun yerine bir " Zaman Standardının " kullanılmasıdır. Yüksek doğrulukla metre örneği çoğaltılmak istendiğinde, dayanak olarak yine yüksek doğrulukta bir atom saati kullanılacaktır. Günümüzde uzunluk biriminin en doğru ve güvenilir şekilde alt seviye standartlarına transferi, enterferometrik teknikler kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Akimoto,1973 ;Layer H.P.; Robertsson et al.,1991; Rowley¹,1973; Schatz,1981; Titov¹ et al,1995).

Türkiye'de ölçme altyapısı ile ilgili ilk çalışmalar Osmanlı döneminde başlatıldığı ve ölçü birimlerinin birliğine ve bunların doğruluğuna büyük önem verildiği bilinmektedir. Bu dönemde ölçü birimleri ile ilgili

denetim ve bu birimlerin korumaları ise Loncalar ve Ahilik kurumları tarafından sağlanmaktaydı. Osmanlı döneminde kullanılan çeşitli ölçü birimlerine örnek olarak, uzunluk alanında : Ağaç, Arpa, Arşın, Zira, Eriş, Çubuk, Endaze, Fersah Hat, Kadem, gibi. Ağırlık alanında ise : Bağdat tağı, Balya, Besil, Buğday, Çeki, Dirhem, Hilal, Kantar, Okka, Vezne'yi sayabiliriz.

Yine bu dönemde ölçme konusu resmi olarak ele alınmış ve ilk ciddi adım olarak 1875 yılında PARİS'te toplanan metre konvansiyonuna bir delege gönderilmiş ve bu konvansiyonun kararları Osmanlı Devletince imzalanmak suretiyle kabul edilmiştir. **Miralay Hüsnü Bey**, metre konvansiyonuna Osmanlı devleti adına katılarak, kurucu devletler arasında Osmanlı devletinin temsil etmiştir. Metre konvansiyonu sonrası en önemli gelişme, Cumhuriyet döneminde, 26 Mayıs 1931 yılında 1782 sayılı Ölçüler ve Ağırlıklar kanununun kabul edilmesiyle gerçekleşmiştir. Bu kanunla ülkemizde metrik sistemin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. 21 Mayıs 1955 tarihinde güncelleştirilen bu kanun, daha çok kullanılması zorunlu ölçü birimlerini ve bunların hukuki düzenlemelerini tanımlamaktadır. Ancak işin teknik yönünü kapsayan metroloji ile ilgili en bilinçli ve belli sonuçlara varmış etkinlikler ise 1960 sonrası, ülkemizde gözlenen sanayi hamlesi ile başlamıştır. Daha sonra 1972 yılında Türk Standartlar Enstitüsü (TSE) nün koordinatörlüğünde Amerika'nın birincil ulusal metroloji merkezi olan "National Institute of Standards and Technology (NIST)" ile yapılan çalışmalarla devam eden süreç içerisinde, Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), Ulusal Kalite Kontrol Projesi başlatılmıştır (Altan,1983). 1979 yılında " Bir Primer Kalibrasyon Merkezinin Karakteristiklerinin Tesbiti " için bir fizibilite çalışması başlatılmış ve bu amaçla ilgili kurum ve kuruluşlardan oluşan bir çalışma grubu görevlendirilmiştir. 1981 yılında ise Başbakanlık tarafından kamu ve özel sektörün ihtiyaçlarına topluca cevap verecek, birincil seviyede ve ulusal ölçekte bir metroloji merkezinin kurulmasına karar verilmiş ve fizibilitesinin yapılması için Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) görevlendirilmiştir (TSE,1987; Ekerim,1988). Hazırlanan bu fizibilite raporu uygun bulunarak bir " Ulusal Metroloji Enstitüsü" (UME) kurulmasına karar verilmiş ve projenin yürütülmesi için TÜBİTAK' görevlendirilmiştir. Enstitü kuruluş çalışmaları 1985 yılında başlatılmış ve UME'nin nüvesini teşkil edecek ilk metroloji laboratuvarı Ağustos 1986 yılında tamamlanmış ve projenin başarılı olması üzerine projenin geliştirilmesine karar verilmiş ve özel teçhizat niteliğindeki Enstitü bina inşaatı 1990 yılında başlatılmış ve Mayıs 1994 yılında tamamlanarak hizmete girmiştir.

Bu çalışmada, bilimsel tanıma uygun olarak özel koşullarda gerçekleştirilemiş olan birincil uzunluk referansından, sanayinin, metroloji ve kalite kontrol laboratuvarlarının referansı olan ölçü lokmalarına ve bu laboratuvarlarda kullanılan boyutsal ölçüm teçhizatlarına uzunluk biriminin, transferi, izlenebilirliğin sağlanması ve ölçme sisteminin doğruluk seviyesinin ve ölçmeyi etkileyen parametrelerin tespiti ile bu parametrelerin sonuç üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca ölçü lokmalarının kullanım

şartlarına göre kalibrasyon aralıklarının belirlenmesi, enterferometrik yöntemle ölçü lokmalarının nominal değerlerinin, ışığın dalga boyuna bağlanması, kalibrasyonunun yapılması ve ölçü lokmalarının enterferometrik kalibrasyon yöntemi ile ilgili bir matematik modelinin çıkarılması ve ulusal uzunluk ölçme sisteminin hiyerarşik yapısının tanımlanarak, ülkemiz ile diğer gelişmiş ülkeler arasındaki bütünlüğü sağlayacak ölçme sisteminin tanımlamayı amaçlanmıştır.

Bu amaca yönelik, 1983 yılında Paris'te yapılan XI. CGPM konferansında (BIPM,1983) yeniden tanımlanmış olan uzunluk birimi bu tanıma uygun olarak gerçekleştirilmiş olan Ulusal Referans Standardı olan He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ stabilize lazer prototipi kullanılarak bu referanstan, fark ölçüm metodu ile Ç.F lazere transfer edilmiş ve Ç.F. lazer yardımı ile ölçü lokmalarının kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma Türkiye'de ilk defa gerçekleştirilmiş bir çalışma olup ülke içindeki izlenebilirliği sağlanması için bir basamak teşkil etmiştir.

Bu çalışmanın bir diğer önemli yönü de, kullanılan ölçme yöntemidir. Boyutsal Metrolojide kullanılan klasik ölçme yöntemi ile enterferometrik olarak kalibre edilen ölçü lokmaları, bu çalışmada kullanılan yöntem ile alternatif bir çözüm teklif edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmak suretiyle yöntemin doğruluğu ve güvenilirliği teyid edilmiştir. Bir diğer değişle klasik enterferometrenin ölçüm "düzenegi", çok daha az maliyetli ve operasyon gereksinimleri daha sadeleştirilmiş bir sistem ile karşılaştırılmış, sonuçta bu çalışmada kullanılan yöntem ile avantajlar temin edilmiştir.



BÖLÜM II

2. UZUNLUK ÖLÇÜM SİSTEMLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

2.1 Giriş

Boyutsal Metroloji ile ilgili Uzunluk Ölçüm sistemlerinin açıklandığı bu bölümde uzunluk referans standardının gerçekleştirilmesi, transfer yöntemleri ve bu yöntemleri ve sistemleri etkileyen parametrelerin tanımı ve bunlarla ilgili detaylı incelemeler yer almaktadır.

Ancak öncelikle vurgulanması gereken husus bu sistemlerin kullanım gayelerinin tartışılması gereğidir. Bütün amaç en son kullanıcının ölçüm doğruluğunun izlenebilmesini sağlamaktır. Yani izlenebilirlik teminidir. İzlenebilirlik kavramı öncelikle bu bölümde detaylı olarak ele alınacaktır.

2.2 İzlenebilirlik ve Uzunluk Biriminin, Birincil Seviye Laboratuvar dan Sanayiye İzlenebilirliğinin Sağlanması

Bilimde, sanayide, ticarete, iletişim, enerji gibi faaliyetlerde ölçme, hayati bir rol oynamaktadır. Günümüz teknolojilerinin gereği, her ülke, yapılan tüm ölçümlerin doğruluğunu sağlamak için Uluslararası Birimler Sistemi (SI) içersinde bir ölçme zinciri dahilinde izlenebilirliği gerçekleştirmek durumundadır. Kalibrasyon işleminde kullanılan teçhizatların ve etalonların; kesintisiz ve ardaşık bir ölçme zinciri içersinde çalışma referansından ulusal referansa kadar izlenebilirliği, bir ulusal ölçme sistemi dahilinde teminat altında tutulmalıdır. Aynı zamanda "İzlenebilirlik" kavramı ile anlatılmak istenen; farklı yerlerde, değişik cihazlarla ve farklı ortam şartlarında gerçekleştirilmiş olan ölçüm sonuçları ile etalonların kalibrasyon sonuçlarının birbirini teyid etmesi ve güvenilirliği sağlamasıdır. Ölçmeye tabi olan büyüklüğün bir referansa sahip olmadığı durumlarda; söz konusu büyüklük, temel ve/veya türetilmiş büyüklüklerin boyut analizi yapılarak "İzlenebilirlik" sağlanır. Ölçülen büyüklüğün bir ulusal referansı mevcut değil ise "izlenebilirlik" ile ilgili uygulama, uluslararası kabul edilmiş referanslar veya kontrol yöntemleri ile sağlanmaktadır. Bu gibi durumlarda ölçüm sonuçları; laboratuvar deneyleri ve/veya kalibrasyonlar ile doğrulanmalı ve belgelendirilmelidir. İzlenebilirlik kavramının daha iyi anlaşılabilmesi için Referans Standart (Etalon), Kalibrasyon zinciri, İzlenebilirlik Prensipleri gibi kavramlara açıklık getirilmesi gerekmektedir (BIPM²,1984; Cameron,1977; Hofmann et al.,1979; Millea,1984; Toffin,1978; EN 29000-1,1994; EN 45000,1994).



2.2.1 Referans Standart Kavramı

Birincil Referans Standart: Belirli bir alanda en yüksek metrolojik vasma sahip ölçme teçhizatı,

Uluslararası Referans Standart: Uluslararası Konferans veya Konvansiyonla kabul edilmiş ölçme referans standardı,

Ulusal Standart: Ele alınan büyüklüğe ait, ülkedeki diğer bütün standartların değerlerinin temeli olduğu; resmi, ulusal bir kararla kabul edilen standart,

Referans Standart: Genelde belirli bir mahalde mevcut olan en yüksek metrolojik vasıfta olup, o mahalde yapılan ölçümler için referans teşkil eden standart.

Bu tanımlar hiyerarşik sırada verilmiştir. Alt seviyede bulunan bir referans, kesintisiz bir kalibrasyon zinciri içinde, ardışık mukayeseli ölçümler vasıtasıyla, ulusal veya birincil referans standarta bağlanmalıdır. Kalibrasyon zinciri; ölçüm sonuçlarını, ölçüm sonucuna bağlı belirsizlik değerini SI birimler sistemi içinde teminat altına almaktadır. Kalibrasyon işleminin sonucu, kalibre edilen büyüklüğün belirsizlik aralığının genişliğini değiştirmektedir. Belirsizlik aralığının değişimi; deney şartlarına, etalonun kalitesine ve kullanılan karşılaştırma teçhizatlarına bağlıdır. Ölçme etalonları, beraberlerinde, "Belirsizlikler Piramidi" kavramı ile anılmaktadır. Belirsizlik değerinin, birincil standarttan alt seviye referanslara doğru giderek genişleyen bir yönü vardır (BIPM²,1984; Ekerim,1989).

2.2.2 Kalibrasyon Zinciri

Metroloji sistemi içersinde gerçekleştirilen ve/veya muhafaza edilen ulusal veya birincil referans standartlar bir kalibrasyon zincirinin temel dayanak noktalarını oluşturur. Bu referanslar yardımıyla, metroloji sistemi dahilinde yetkilendirilmiş veya yüksek doğruluklu standartlara sahip laboratuvarlar ile sistem dışında bulunan özel statüye haiz laboratuvarlar, referanslarını; kesintisiz, ardışık ölçümlerle ve uygun karşılaştırma metod, yöntem ve teçhizatlarıyla en üst referansa bağlamak suretiyle kalibrasyon zincirini oluştururlar (Bayer,1989).

2.2.3 İzlenebilirlik Prensipleri

Sanayileşmiş bir çok ülkede uygulanmakta olan yeni kalite anlayışı gereği sanayi kuruluşları; ürünün, belirtilen şartlara uygunluğunu göstermek amacıyla, sahip olduğu, ödünç aldığı ve/veya alıcının temin ettiği muayene, ölçme ve deney teçhizatının kontrol, kalibrasyon ve bakımını sağlamalıdır. Teçhizatlar, talep edilen ölçme yeterliliğini sağlayacak şekilde olmalıdır. Metroloji açısından bakıldığında yukarıda söz edilen izlenebilirlik şekli " **Teknik İzlenebilirlik** " olarak adlandırılabilir. İzlenebilirlik kavramının sağlamaştırılması için teknik izlenebilirliği " **Döküman İzlenebilirliği** " ile tamamlanması gerekir. Döküman izlenebilirliği, üretimin her safhasında; ölçme, deney ve kalibrasyonlar için yazılı prosedürler

hazırlamak; ölçme teçhizatının kalibrasyonu, akredite laboratuvarlara yaptırıldıktan sonra buralardan elde edilen sertifikaları ve bilgileri dökümanete etmek; üretim sürecinden elde edilen tüm bilgi muhafaza etmektir. Ayrıca izlenebilirliği sağlamaya yönelik, laboratuvarlar bulundurdıkları referans standartları " Laboratuvarlararası Karşılaştırma Ölçümlere " katılarak, referans ölçme standartlarının yeterliliği, güvenilirliği ve laboratuvarın çalışmasını doğrulamalıdır. Karşılaştırma ölçümleri, laboratuvarların verdikleri hizmet veya kapasiteleri açısından karşılaştırmak anlamına gelmez. Laboratuvarlararası karşılaştırma ölçümleri, bir metroloji laboratuvarının bulundurduğu referans standartların sistematik hatalarının etkileyen faktörleri ve kalibrasyonda kullanılan teçhizatların doğruluğunun tespiti için kullanılan bir yöntem olmasının yanı sıra, laboratuvarların akreditasyon koşullarını yerine getirip veya getirmediğinin de değerlendirilmesidir. Karşılaştırma ölçümleri sonunda ortaya çıkan bilimsel, teknik ve özel sorunlara çözüm getirme açısından önemli bir araçtır. Laboratuvarlararası karşılaştırma sonuçları E_n normalize hata yardımı ile değerlendirilmektedir (Bayer et al.,1977;Belanger et al.,1979; Golubev et al.,1994).

$$E_n = \frac{LAB_{sonuç} - Ref_{değer}}{\sqrt{(U_{lab}^2 + U_{ref}^2)}}$$

2.2.3.1

E_n normalize hata değeri karşılaştırma ölçümleri koordine eden laboratuvar tarafından açıklanan normalize hata sınırları içinde olmalıdır. Bir kalibrasyona izlenebilir diyebilmemiz için ;

- 1.Kalibrasyon, uygun ortam ve teçhizat ile yapılmalı,
- 2.Kalibre edilecek cihazın belirsizliğine uygun referans kullanılmalı,
- 3.Teknik izlenebilirlik ve döküman izlenebilirliği sağlanmalı (EK 1, Şekil E1'de Döküman izlenebilirliği ile ilgili talimat hazırlama akış diyagramı verilmiştir),
- 4.Kalibrasyon için teknik ve idari prosedürler oluşturularak, kalibrasyon sonuçları, metrolojik karakteristikler açıkça ifade edilmelidir .

2.2.4 Metrolojide Ölçü Lokmalarının Kalibrasyonunun Önemi

Uzunluk biriminin endüstri'ye transfer işleminde, ölçü lokmaları önemli bir rol oynamaktadır. Günümüzde, seri üretime dayanan sanayilerin bir ön şartı olarak bir bütünün oluşturulması için farklı yerlerde üretilen bir çok parçanın belli toleranslar içinde uyumlu olmaları istenmektedir. Makina ve otomotiv sanayi ürünlerinin ve bu ürünleri oluşturan parçaların kalitelerinin ifadesi olan Fiziksel, Kimyasal, Mekanik özelliklerin yanı sıra, boyutsal ve geometrik özellikleride (uzunluk, açı, geometrik formdan sapma, yüzey kalitesi,vs.), yüksek teknolojilerin ihtiyaçları sonucu daha büyük hassasiyetle

belirlenmesi gereği ortaya çıkmaktadır. Ölçümlerde güven faktörünü sağlamak için ise ölçme sistemlerinin tamamı metrolojik kontrol altında tutulmalıdır. Kalite kontrol sisteminde kaliteyi teminde kullanılan Kumpaslar, Mehengirler, Mikrometreler, vs. gibi çeşitli boyutsal ölçme cihazları, muhafaza ettikleri uzunluk biriminin zaman içindeki kararlılığını ve doğruluk seviyelerini korumaları için referans etalon masterlarla (Ölçü lokmaları, Halka, Tampon, vs.) kalibre edilmesi gerekir. Uzunluk birimini, yüksek hassasiyet ve doğruluk değerleri muhafaza eden ölçü lokmaları, kullanım hataları, aşınma, termal şoklar, gibi nedenlerle zaman içinde deformasyona uğrarlar. Muhafaza ettikleri boyutun doğruluğu hakkında bilgi edinmek ve boyutları kontrol altında tutmak için belirli aralıklarla bir üst seviye ölçme sistemi ile mukayese edilmelidir. İmalat sanayinde kalite temininde kullanılan ölçme cihazlarının pahalı ve ekonomik ömürlerinin, 3 ile 10 yıl arasında olması, bu alanda kullanılan ölçme sistemlerinin, metrolojik karakteristikleri, kullanım sürecinde teminat altına alınmalıdır. Kalite temini, modern kalite kontrol teknikleri uygulamanın yanı sıra, işletmelerin Metroloji alt yapılarını kurmaları ile ancak mümkün olacaktır. Bu açıdan bakıldığında uzunluk biriminin sanayiye aktarılma işleminde, ölçü lokma setlerinin sınıfını belirleyen tolerans değerlerini korumaya yönelik çalışmalar ve özellikle, 1983 senesinde BIPM'in Ölçü ve Ağırlıklar Genel Konferansında değiştirilen Metre tanımına uygun olarak, ışığın dalga boyu cinsinden ifade edilen uzunluk birimini, elle tutulabilen bir maddi ölçüte transferi önem taşımaktadır (Engelhard,1957; Golubev et al.,1994; Tükel,1980;).

2.2.5 Ölçü Lokmalarının Kalibrasyon Metodları ve Hiyerarşisi

Ölçü lokmaları, ISO 3650 normunda belirtildiği gibi, 6 ayrı kalite sınıfında imal edilmekte ve kalibrasyon hiyerarşisi bu norma bağlı olarak oluşturulmaktadır (EK 2, Tablo E 2.1'de ölçü lokmalarının kalibrasyon hiyerarşisini göstermektedir).

Kalibrasyon hiyerarşisine ve ISO 3650 standardında belirtilmiş olan hassasiyet seviyelerine bağlı olarak, ölçü lokmalarının nominal değerlerinin doğruluk seviyesi Mutlak ve Mukayeseli kalibrasyon metodları kullanılarak tesbiti yapılmaktadır (EK 3, Tablo E 3.1 ve Tablo E 3.2'de ölçü lokmalarının nominal boyuta bağlı olarak müsaade edilen hatalar ve toleranslar verilmiştir).

2.3 Uzunluk Birimi

Yüksek doğruluğa haiz ölçümler gerçekleştirmek ve ölçü birimlerinin muhafaza etmeye yönelik çalışmaların anlaşılması açısından bu bölümde öncelikle Uzunluk biriminin referans standardı olan He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ stabilize lazerin teorisi, kalibrasyon metodu ve yöntemleri tanıtılmış ve karşılaşılan sorunlar üzerinde durulmuştur.

2.3.1 Uzunluk Referans Standardı He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ Stabilize Lazer

1983 yılında Ağırlık ve Ölçüler Genel (CGPM) Konferansında alınan karar doğrultusunda uzunluk Referans Standardı Metre, elektromanyetik dalganın vakumda katettiği yola ve dolayısıyla frekans ve zamana bağlanmıştır. BIPM, metrenin pratikte gerçekleştirilmesi ile ilgili aldığı tavsiye kararları çerçevesinde, tanımlanmış olan uzunluk referans standardı için gerçekleştirme metodu ve yöntemlerini belirlemiştir. Metre tanımına uygun olarak gerçekleştirilmesinde, en çok frekasta stabilize edilmiş lazer teknikleri kullanılmaktadır (BIPM, 1983; Bray, 1979; Chartier et al., 1991).

En basit anlatımla bir lazer, birbirine paralel iki ayna ile bunların arasına konmuş, ışığı kuvvetlendirici bir ortamdan ibarettir. Oluşan güçlü ışığın dışarı çıkabilmesi için aynalardan birisi yarı geçirgen olarak seçilmiştir. Bu sistemin bütününe rezonatör denir. Öyle ki, ışığın rezonatör içerisinde gelip gitme uzaklığı bu ışığın dalgaboyunun (λ) tam katıdır. Aynalar arası uzaklık L ise, $\lambda = 2L/k$ 'dır. Bu dalganın frekansı (f): $f = (k \cdot c)/2L$ 'ye eşit'tir. Aynalara dik ve bu ifadeye uyan her dalga, bir lazer modudur. Modlar, ışık dalgalarının harmonikleridir. Harmonikler, $f = (k \cdot c)/2L$ ifadesi ile gösterilir. Burada $k = 1, 2, 3, \dots$ değerlerini aldıkça frekans 1, 2, 3 kat artar. Stabilize olmamış bir lazer kavitesinde " k " milyon mertebesinde. Kısacası normal bir lazerin optik modlarının sayısı bir milyon civarındadır.

Pratikte aranan ise lazerin tek modlu yani tek dalga boyunda olmasıdır. Bu durumda frekans bandı genişliği dar dolayısıyla stabilize lazerden söz edilir. Çalışma prensibine bakıldığında, genel olarak herhangi bir atom topluluğunda her bir atom, kendisini en düşük enerji seviyesinde yani taban seviyesinde tutmaya eğilimlidir. Atomlar bu taban enerji seviyesinden daha yüksek enerji seviyelerinde, ancak uyarılmış olarak bulunabilirler. Her bir atom, bir dış etki olmadan, kendiliğinden, soğurduğu bu enerjiyi serbest bırakarak minimum enerji seviyesine iner. Bu esnada yayılan fotonların doğrultusu, düzensizdir. Bu radyasyon kaynağındaki atomlar birbirinden bağımsızdırlar. Atomlar arasında bir faz bağıntısı olmadığından ışık uyumlu değildir. Faz, noktadan noktaya ve zamana bağlı olarak değişir. Uyarılmış durumda bulunmayan bir atom grubu üzerine fotonların geldiği farz edersek ve gelen fotonlar yeterli derecede bir enerjiye sahip ise, bu gruptaki atomlar uyarılmış duruma yükselebilecek kadar enerji, soğurabilirler. 1917 yılında Einstein tarafından verilen uyarılmış yayılım teorisine göre uyarılmış seviyede bulunan atom daha aşağı seviyedeki enerji durumuna foton yayarak dönebilir. Bu dönüşüm, bazı

durumlarda kendiliğinden, bazı durumlarda ise bir elektromanyetik radyasyonun uyarlanması ile olur. Yüksek enerji seviye "i", alçak enerji seviye "j" ile gösterilirse, her iki enerji dönüşümü esnasında fotonlar $\epsilon = h \cdot \nu$ denklemi uyarınca $\epsilon_i - \epsilon_j = h \cdot \nu_{ij}$ şeklinde bir enerji taşırlar. Bu denklemde ϵ_i ve ϵ_j , sırasıyla yüksek ve alçak seviyede atomun enerjisini; $h = 6.625 \times 10^{-34}$ js Planck sabitini; ν_{ij} ise dönüşümdeki frekans farkını göstermektedir.

Eğer elektromanyetik bir dalga, uyarılmış bir atomu tetikliyorsa, bu dalganın frekansı $(\epsilon_i - \epsilon_j)/h$ olmalıdır. Bu işlemin önemli bir özelliği, gelen uyarıcı dalga ile oluşan foton aynı ışıma modundadır ve bu fotonlar uyarıcı dalgaya ilave olacak şekilde onun akı yoğunluğunu artırır. Lazer ışığının birçok üstünlükleri vardır. Bu yüzden lazer, birçok araştırma ve ölçme tekniklerinde kullanılan önemli bir teçhizat olmuştur. Bu üstünlükleri dört grupta toplayabiliriz (Bouchareine¹,1988; Bruhart,1965; HP,1991; NPL,1987; Chartier² et al.,1992; Gill,1979;):

A- Doğrultu özelliği : Lazerde sadece aynalara dik doğrultuda ışıma meydana geldiğinden, lazer ışını yüksek dereceden bir doğrultu özelliğine sahiptir. Ayrıca lazer ışığı çok uzak mesafelere bir açısal dağılmaya uğramadan gidebilir. Birçok lazer ışığında açısal sapma 10^{-3} radyandan daha küçüktür. Bu özellik belirli bir doğrultuda yüksek konsantrasyona gerek duyulan ölçmelerde önemlidir. Örnek olarak boru hatlarının döşenmesinde, uzun tünellerin açılmasında, dünya ile ay arasındaki uzaklığın ölçülmesinde lazerin bu özelliğinden yararlanılır.

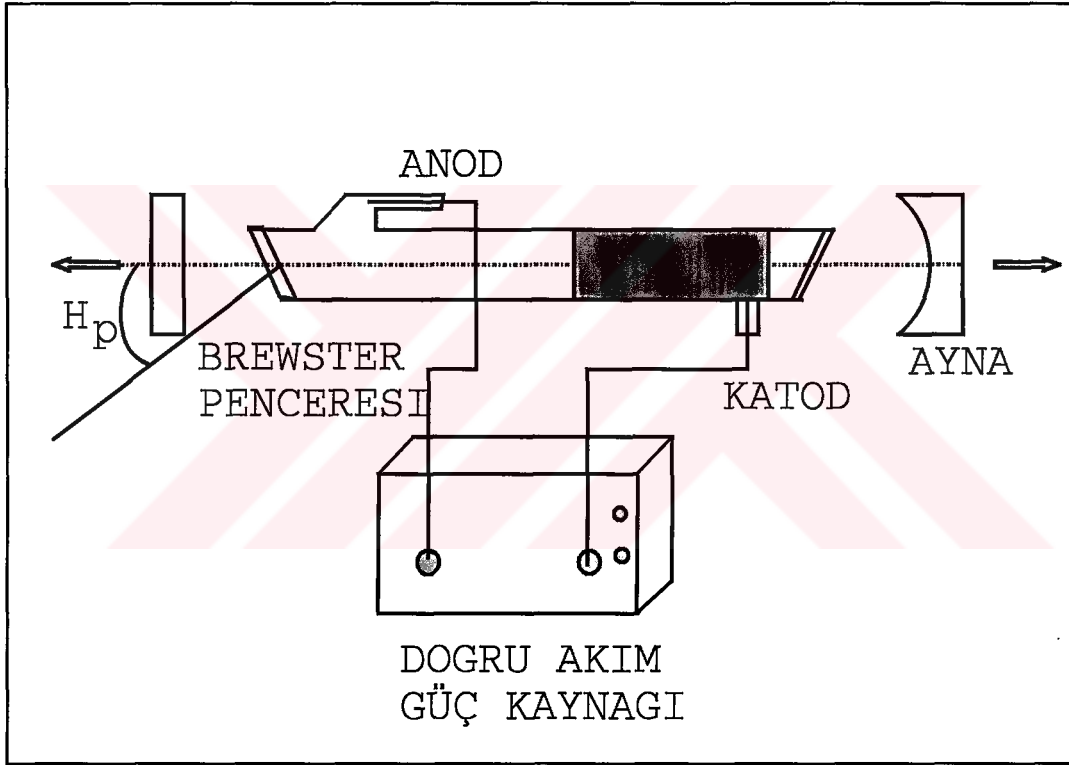
B- Uyumluluk (koherentlik) : Lazerden başka hiçbir ışık kaynağında, yüksek dereceden uzaysal ve zamansal uyumluluk elde edilemez. Rezonatörün iki başındaki aynalar arasından sadece ışık dalga boyunun yarısının katları kadar, duran ışık dalgası dışarı çıkar. Bu yüzden yüksek dereceden hem uzaysal hem de zamansal uyumluluk elde edilebilmektedir. Bu özellik holografi ve interferometrik ölçmelerde önemli rol oynar.

C- Parlaklık (intensity) : Lazerde tek bir frekans değerinde enerji yayıldığından istenilen noktada yüksek dereceden enerji yoğunlaştırılması yapılabilir. Bu özellik nedeniyle bazı lazerler ile eritme, kesme, kaynak ve tıpta cerrahi işlemler yapılabilir.

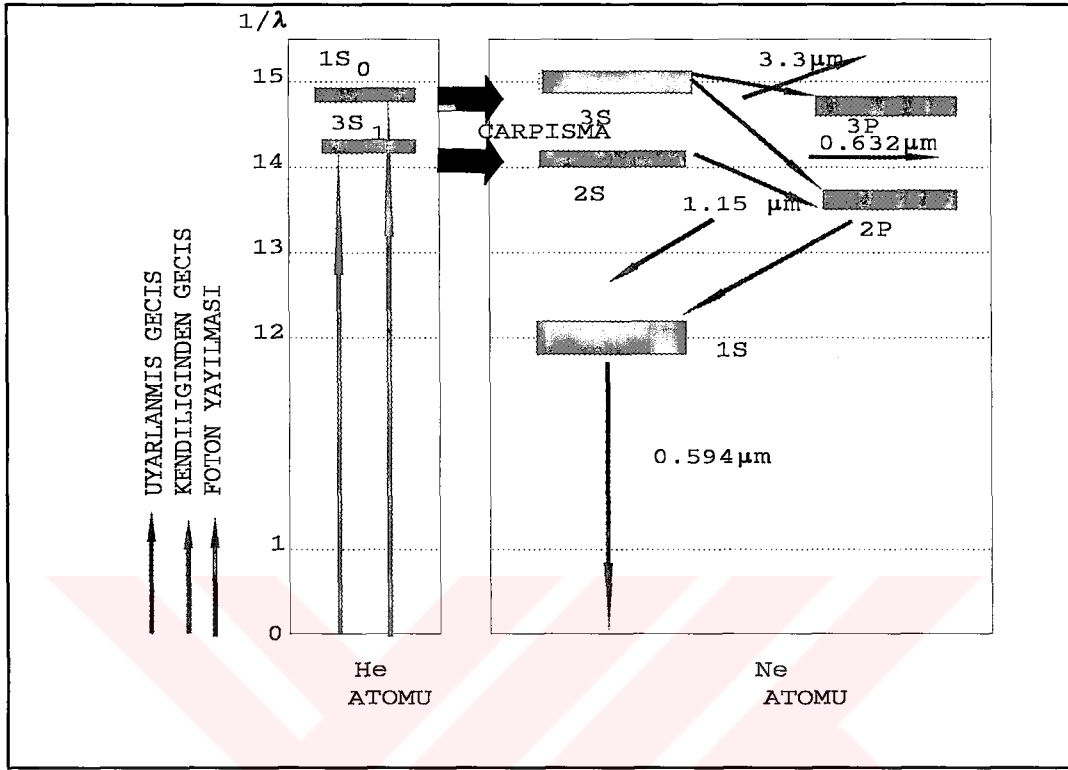
D- Tek dalga boyululuk (monokromatiklik) : Her lazer kendi karakteristik dalga boyunda (örnek olarak Helyum-Neon (He-Ne) lazeri 632.8 nm, Yakut lazeri 694.3 nm, Argon lazeri 514.5 nm dir) ışık yayar. Klasik ışık kaynaklarında filtre edilerek elde edilen ışığın dalga boyunun band aralığı 100 Å olmasına karşılık lazer ışığının band genişliği yaklaşık olarak 10^{-3} Å değerindedir.

Bu çalışmada kullanılan He-Ne lazerleri 632.8 nm dalga boyunda olup gücü mikrowatt mertebesinde. Şematik olarak Şekil 2.3.1.1'de gösterilmiş olan He-Ne lazerinde ana eleman, plazma tüpüdür. Plazma tüpü bir iki milimetre çapındaki kılcal bir borunun dış tarafına yaklaşık olarak 25 mm çapında sızdırmaz ikinci bir borudan meydana gelmiştir. Lazer ışıması, içinde yaklaşık olarak %85 He,

%15 Ne bulunan 0.9 torr basınçtaki kılcal boru içinde oluşur. Sistemde pompalama işlemi genellikle bir elektrik deşarj ile yapılır. Şekil 2.3.1.2’de görüldüğü gibi, pompalama sonunda enerji seviyesi yükselen He atomları yarı kararlı bir durum olan $2S_1$ ve $2S_3$ seviyelerinde toplanırlar. Uyarılmış durumdaki bu He atomları, elastik olmayan çarpmalar ile taban seviyedeki Ne atomlarının enerji seviyelerini $3S_2$ ve $2S_2$ durumlarına yükseltirler. Bu yükselmiş enerji seviyelerindeki herhangi bir Ne atomu, kendiliğinden $3P_4$ ve $2P_4$ seviyelerine inerken 3391.2 nm, 1152.3 nm ve 632.8 nm dalga boylarında foton yayar. Bunlardan sonuncusu görünür band’ta ve daha kuvvetli olması nedeniyle, He-Ne lazerleri bu aralıkta çalışacak şekilde ayarlanır.



Şekil 2.3.1.1 : He-Ne Lazerin Şematik Gösterimi



Şekil 2.3.1.2 He-Ne Lazerinin Enerji Geçiş Seviyeleri

Elektriksel olarak uyarılmış Neon atomlarından herhangi biri lazer tüpü içinde hareket ederken, diğer uyarılmış Helyum atomlarına çarparak bu atomların daha üst enerji seviyelerine geçmelerine neden olurlar ve bu şekilde zincirleme bir reaksiyon doğar. Uyarılmış Helyum atomlarının 3S-2P geçişlerinde 632.8 nm dalga boyunda foton yayarlar. Bu esnada aynı frekansta artan bir genlik dalgası oluşur. Tüpün iki ucuna yerleştirilmiş aynalar içinde bir "Rezonans Hücresi" oluşturulur. Bu aynalardan biri, ışığı % 99 yansıtacak ve % 1 geçirecek şekilde, diğeri ise % 99.9 yansıtacak ve % 0.1 geçirecek şekilde seçilir. Ayrıca lazerde 632.8nm dalgaboyunda rezonans olacak şekilde bir ayarlama yapılır.İçten aynalı He-Ne lazerlerinin rezonans hücresi içerisinde polarize bir eleman yoktur. Bunlardan meydana gelen ışık bir çok doğrusal polarize ışığın toplamından meydana gelir. Lazerden çıkan ışığı doğrusal polarize edilmesi için, sisteme Brewster pencereleri ilave edilir. Brewster penceresi olmayan lazerlerdeki ışık için polarizasyondan söz edilemez, Brewster pencereci lazerlerden elde edilen ışık ise "doğrusal polarize" olarak adlandırılır (BIPM⁴,1984; Bouchareine¹,1988; Bouchareine²,1988; Bruhart,1965; Chartier² et al.,1992; Chartier³ et al.,1992; Kiyoto,1982; Titov et al.,1988; Titov² et al.,1995;Rowley¹,1973).

Daha önce açıklandığı üzere metrenin yeni tanımı, ışığın vakumda aldığı yola, dolayısıyla frekans

ve zamana bağlanmıştır. Başka bir anlamda Metre Standardı değişken fiziki ölçüt'ten değişmez bir büyüklük olan bir atomik yapıya bağlı olarak tanımlandı. Dolayısıyla uzunluk birimi " Metre " bundan böyle Sezyum (Cs) atomik saatleri aracılığı ile 10^{-15} doğruluk seviyesinde gerçekleştirilen zaman birimine bağlıdır. Ayrıca, dalga boyu-frekans ayrımı yapmaksızın bu iki kavram uzunluk tanımında kullanılabilir, çünkü metre, ışık hızına "c" ye bağlıdır. Buna rağmen tanımda bulunan ışık kelimesi, yalnız görünür bölge içindeki frekansları değil, tüm frekans bandları kastedilmektedir. Ancak son yirmi yıl içinde lazerlerin ışıma frekanslarının stabilizasyonundaki gelişmeler, spektrumun görünür bölgesinin önemini daha da ön plana çıkartmıştır. Frekans analizi ile oluşturulan kalibrasyon zinciri, frekans ölçümlerinin izlenebilirliğini sağlayan tek metod'tur (Barnes et al,1971;Bayer et al,1977; BIPM,1984). Bununla birlikte optik görünür bölgedeki frekanslara ulaşmak, bu yöntemde de güçlüklerle karşılaşmaktadır (Akimoto,1973; Chebotayev et al.,1985; Helmcke,1975; Weiss et al.,1988; Pendrill et al.,1991; Periodiques,1993; Petru et al., 1992).

Atom fiziğindeki gelişen teknoloji ve teorik birikiminin, kullanımı ile araştırmacılar, atomik ve moleküler frekansları temel ölçme standartlarının oluşturulması, dolayısıyla kullanmayı büyük ölçüde başarmışlardır . Örneğin; izlenebilirlik açısından bugün enterferometrik ve spektral ölçüm metodu sayesinde uzunluk birimi, atomik Sezyum (Cs) saatine bağlanabilmektedir. Başka bir anlamda, optik frekans değerine bağlı kalmaksızın ölçme imkanı sağlanmakta ve ölçmenin hassasiyeti, frekans ölçümüne ve dolayısıyla kullanılan frekans ölçüm teçhizatın doğruluğuna bağlı kalmaktadır. Çeşitli dalga boyunda çalışan stabilize lazerler yardımıyla, görünür bölgede 535-633 nm aralığında 10^{-12} 'lik bağlı bir doğruluk seviyesinde bir referans frekans eşeli oluşturulabilmekte ve " fark frekans ölçüm " tekniği kullanılarak atomik veya moleküler bir frekans ölçülebilmektedir. Bu çerçevede, tez konusu olarak, frekans eşelinin bir basamağı olan He-Ne/I₂ stabilize lazerin frekansını iyodun soğurma çizgilerine kilitleyerek uzunluk referansı oluşturulması ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bir Lazerin monokromatiklik derecesi, ışık kaynağının ışık şiddetinin yarı değerindeki $\delta\lambda$ spectral profilin genişliğine bağlıdır (Şekil 2.3.1.3). Bir ışık kaynağının referans olabilmesi için frekansın kararlılığının yanı sıra ışık şiddetinin ve ayrıca spektral profilinin genişliği dar ve Doppler genişliği çok ince olmalıdır. Lazerlerin frekans stabilizasyonu, frekans değerine, kullanılan elektromagnetik dalganın dalga boyuna ve vakumdaki hızına bağlıdır (BIPM³,1984; Quinn²,1994; Razet et al.,1993).

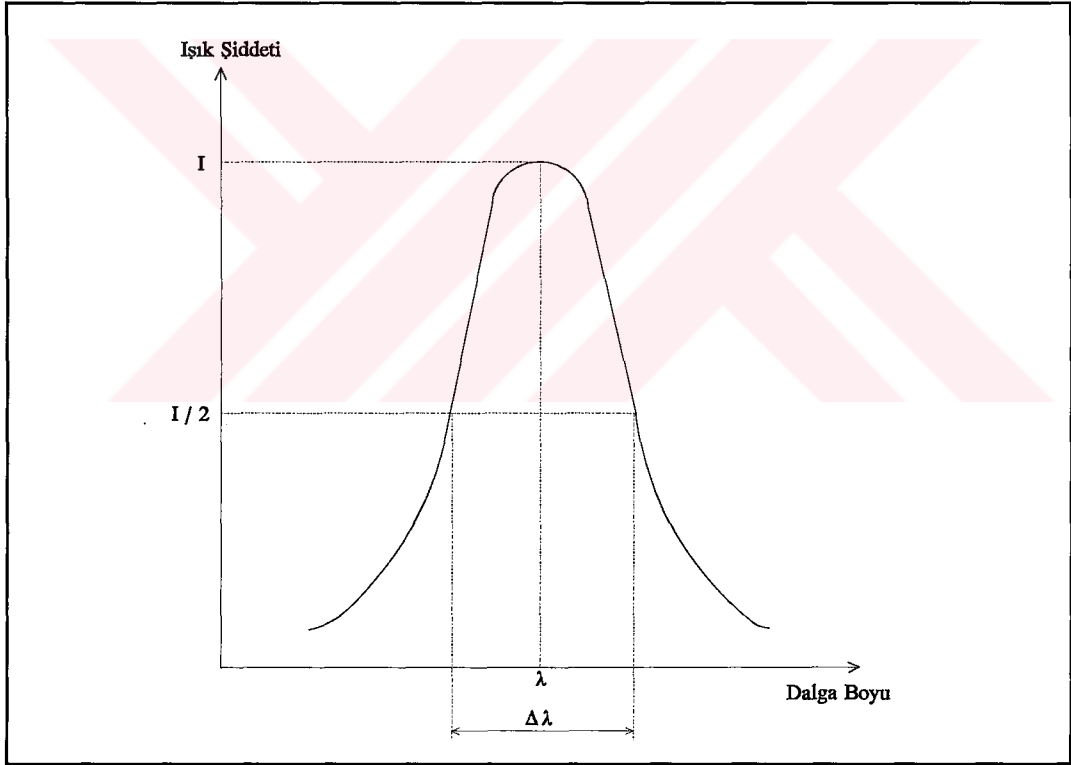
$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.3.1.1)$$

Ayrıca frekans değeri, rezonans kavitenin uzunluğuna da bağlıdır.

$$\lambda_r = \frac{k \cdot C}{n \cdot L} \quad (2.3.1.2)$$

Rezonans kavitenin uzunluğundaki bir değişim, rezonans frekansının değişimi dolayısıyla dalga boyunun değişimi demektir. Uzunluk referans standardı için ilk yaklaşım olarak frekans stabilizasyonunu şu şekilde ifade edebiliriz:

$$\frac{\delta v_r}{v_r} = -\frac{\delta L}{L} \quad (2.3.1.3)$$



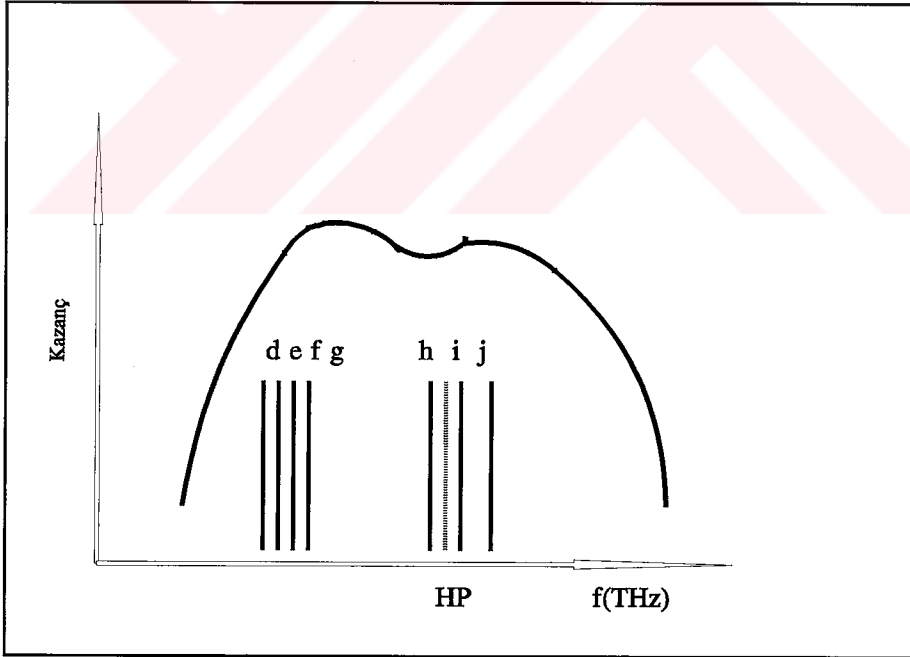
Şekil 2.3.1.3 :Lazerin Spektral Profil Genişliği

Uzunluk referans standardının gerçekleştirilmesinde rezonans kavitenin uzunluğunun sabit tutulması, lazerde yüksek değerde bir stabilizasyonun elde edilmesi anlamına gelmektedir. Boyutsal metrolojik uygulamalarda 10^{-9} 'dan küçük belirsizlik gerektiğinden, ölçme işaretini, dolayısıyla frekans kararlılığını

sağlanması gerekmektedir. Frekans kararlılığı sağlayan önemli metodlar:

- Lamp Dip,
- Polarizasyon Yöntemiyle Stabilizasyon,
- Doymuş Soğurma ile Stabilizasyon yöntemidir.

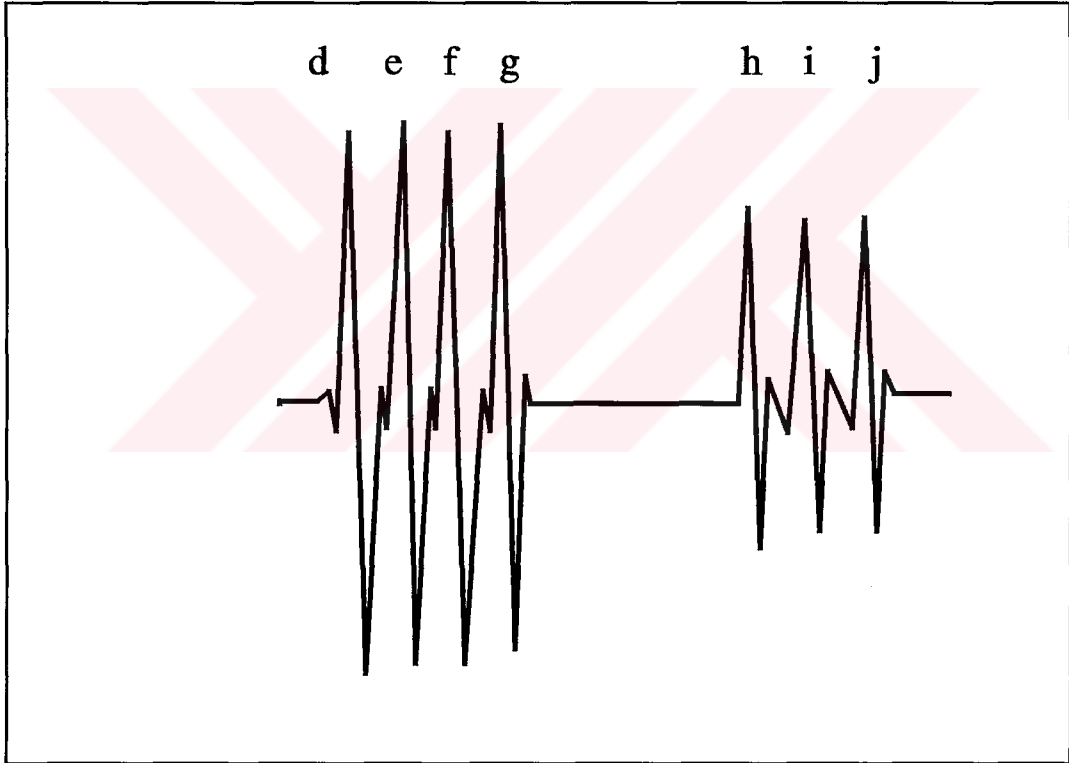
Doymuş soğurma ile stabilize edilen lazer sistemlerinde, optik kavite içersine soğurucu bir buhar (iyod, karbondioksit veya metan) içeren optik bir hücre (cell) yerleştirilir ve lazerin ışıma frekansı ile soğurucu ortamın soğurma çizgisine (absorption line) karşılık gelen frekans eşitleninceye kadar, rezonans kavitesinin boyu servo sistemlerin yardımıyla ayarlanır. Lazerlerin frekans stabilizasyonu "Faz Algılama" tekniğine dayanmaktadır (Akimoto,1973; Bertinotto et al.,1975; Bouchariene²,1988; Bray,1979; Brigodiot,1993; Cerez et al.1983; Chartier¹ et al.,1992; Iwasaki et al.,1989). Bu çalışmada referans uzunluk standardı olarak kullanılan lazerin frekans stabilizasyonu sağlayan servo sistemin blok diyagramı şekil 2.3.1.5'de ve lazerlerin stabilizasyonunda kullanılan yöntem ve geçiş parametreleri Tablo 2.3.1.1' de verilmiştir. Stabilize lazerde, 633nm yakınında mevcut çok ince soğurma çizgilerin ki bunlar, d,e,f,g,h,i,j' dir (Şekil 2.3.1.4) aralarında mukayeseli ölçümler yapılarak kalibre edilecek ikinci seviye referans standart lazerin dalga boyu λ hesaplanır.



Şekil 2.3.1.4 : Çift Frekans Lazerin Kazanç Eğrisi ve Iyodun Soğurma Çizgileri

Bu çalışmada, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) için Bureau International Des Poids Et Mesures (BIPM) de yapılmış olan 124 Numaralı İyod hücresi " BIPM 7 " lazeri üzerine monte edilmiş ve BIPM'de bulunan "BIPM 4" lazeri ile bu lazer karşılaştırılmıştır. Servo sisteminin yardımı ile lazeri 633 nm yakınında iyodun soğurma çizgilerine sıra ile kilitleyerek lazerin kısa ve uzun zaman aralığında kararlılığı "Fark Frekans " ölçüm tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçümlerle ilgili sonuçlar EK 4, Tablo E 4.1 ve Tablo E 4.2'de sunulmuştur.

CGPM tarafından tavsiye edilmiş ve $^{127}\text{I}_2$ moleküler rezonansına stabilize edilmiş He-Ne lazer'ler birçok metroloji enstitüsünün ve Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)'de uzunluk referans standardı olarak kullanılmaktadır. Bu şekilde stabilize edilmiş lazerin frekansı $f = 473,612,214.8$ MHz, dalga boyu, $\lambda = 632.9913981$ nm, ve bağıl belirsizlik değeri 10^{-12} mertebesinde dir.



Şekil 2.3.1.5 : He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ Stabilize Lazerin Soğurma Çizgileri

Bu çalışmada uzunluk biriminin referans standardı olarak kullanılmış olan He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ lazer 1991 yılında Fransa'da BIPM ve INM'de yapılmış çalışmalar sırasında, geliştirilmiş benzeri sistemler incelenerek ve metrenin yeni tanımı ile ilgili tavsiye edilmiş parametreleri kullanarak, nispeten daha basit ve daha az

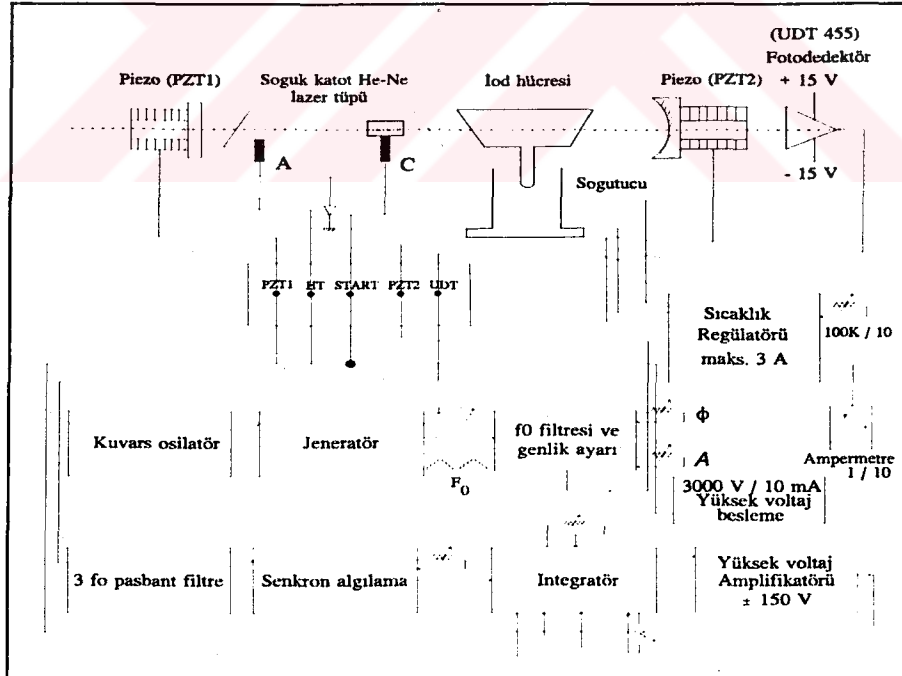
maliyetli ilk Ulusal Uzunluk Referans Standardının prototipi oluşturulmuştur. Uzunluk Referans Standardının prototip düzeneği 20 mm çapında 3 İnvar çubuk ve optik düzeneğini taşıyan ve ayar imkanı veren iki alüminyum flanştan oluşmaktadır. Lazerin rezonans kavitesini toplam uzunluğu 420 mm olup 300mm uzunluğunda NEC GTL 20-40 lazer tübü ve 100 mm uzunluğunda olan BIPM 124 Iyod hücresi kullanılmıştır. Lazerin rezonans kavitesinin parametreleri ilk etapta sonuçların karşılaştırılabilmesi bakımından BIPM'deki sistemin benzeri olarak seçilmiştir. Rezonans kavitesinde kullanılan 632.8 nm geçirgen aynalar %99 yansıtma özeliğe sahip olup birisinin yarıçapı 60 cm diğerinin yarı çapı ∞ 'dur. Lazer ışımasının frekansı, iyod spektrumundaki ince yapı frekans bileşenlerinden birisine servo sisteminin yardımı ile kilitlenmektedir. Amaç, frekansı sabit tutarak, lazerin dalga boyunun kararlılığını sağlamaktır. Bu ise şekil 2.3.4 'te gösterilmiş olan servo kontrol sisteminin yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Uzunluk Referans standardının kararlılığını sağlayan servo-kontrol sistemi, üçüncü harmonik kilitleme tekniği ve piezokristal (PZT) kullanılarak lazer ışın demeti F_0 frekans değerinde module edilmekte ve module edilmiş ışın demeti, sistem içinde bulunan optik detektör tarafından faz duyarlı tekniği kullanılarak analiz edilmektedir. Ayrıca $3F_0$ frekansı (üçüncü harmonik) referans sinyal olarak senkron algılama birimine uygulanmaktadır. Amaç, lazer ışın demetinin frekansını, iyodun ince yapı frekansına kilitlemek, dolayısıyla lazer frekansını sabit tutmaktır. Bu sinyal senkron algılamadaki sinyal integratörün girişine verilerek PZT1 aracılığıyla sistemde frekans kaymaları olduğu durumlarda kavite uzunluğunu değiştirerek frekansı sabit tutar. Modülasyon frekansı olarak 6 MHz kullanılmıştır. Lazer frekansının değişimi üzerinde etkiyen en önemli parametreler, lazerin çıkış gücü, iyod basıncı ve modülasyon genişliğidir. Bu parametrelerde oluşacak değişimler lazer frekansının kaymasına sebep olur .

Uzunluk referans standardı olan He-Ne/ $^{127}I_2$ stabilize lazerden, ikinci seviye referans standardı olarak bu çalışmada kullanılmış olan Ç.F lazer enterferometresine uzunluk birimi transfer edilmiş ve bu enterferometre ölçme lokmalarının kalibrasyonu için transfer standardı olarak kullanılmıştır.



Frekansta Stabilizasyon Yöntemi	Frekans Değeri (f)	Dalga Boyu (μm)	Geçiş Çizgisi	Gaz Basıncı (Pa)	Belirsizlik Değeri	Hücre Sıcaklığı (°C)
He-Ne / CH ₄	88376181608 kHz	3.3923139	P(7),F(2)171	≤ 3	± 1.3*10 ⁻¹⁰	20°C
He-Ne / ¹²⁷ I ₂	520206808.5 MHz	0.5762947	P(62) "O"	≤ 3	± 6*10 ⁻¹⁰	6°C ± 2°C
He-Ne / ¹²⁷ I ₂	473612214.8 MHz	0.6329913	11-5,R(127),i	≤ 3	± 6*10 ⁻⁹	15°C ± 1°C
He-Ne / ¹²⁷ I ₂	489880355.1 MHz	0.6119707	9-2,R(47),"O"	≤ 3	± 1.3*10 ⁻⁹	-5°C ± 2°C
He-Ne / ¹²⁷ I ₂	582490603.6 MHz	0.5146734	43 Om,o(13)3	≤ 3	± 1.3*10 ⁻⁹	-5°C ± 2°C

Tablo 2.3.1.1 : Lazerlerin Stabilizasyon Parametreleri ve Yöntemleri



Şekil 2.3.1.6 : Frekansta Stabilize Lazerin Blok Diyagramı

2.3.2 Kullanılan Lazerlerin Kalibrasyonu ve Doğruluğunun Tespiti

Enterferometrik ölçümlerde kullanılan ve ölçme altyapısını oluşturan teçhizatların tümü kalibre edilmelidir. Bu bölümde, çalışmalarında kullanılan lazerin kalibrasyon yöntemi ve metodu anlatılmıştır. Stabilize lazerlerin ışıma frekanslarının kısa ve uzun zaman kararlılığı, fark frekans ölçüm metodu ve Allan Varyansı yardımı ile değerlendirilmiştir. Frekansta stabilize iki lazerin mukayesesi, bu lazerleri çok ince soğurma çizgilerine kilitleyip, aralarındaki frekans farkı ölçülerek yapılır. Şekil 2.3.2.1 fark frekans ölçme düzeneğini göstermektedir. E_1 ve E_2 monokromatik, aynı polarizasyonda ve ν_1 , ν_2 frekansında iki elektromanyetik dalga olsun. Bu durumda her dalga için elektrik alanı ;

$$E_1 = \epsilon_1 \cos(\nu_1 t + \phi_1) \quad (2.3.2.1)$$

$$E_2 = \epsilon_2 \cos(\nu_2 t + \phi_2) \quad (2.3.2.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu iki elektromanyetik dalgayı bir P noktasında superpoze edildiğinde, P noktasındaki toplam elektrik alanı aşağıdaki gibi ifade edilir:

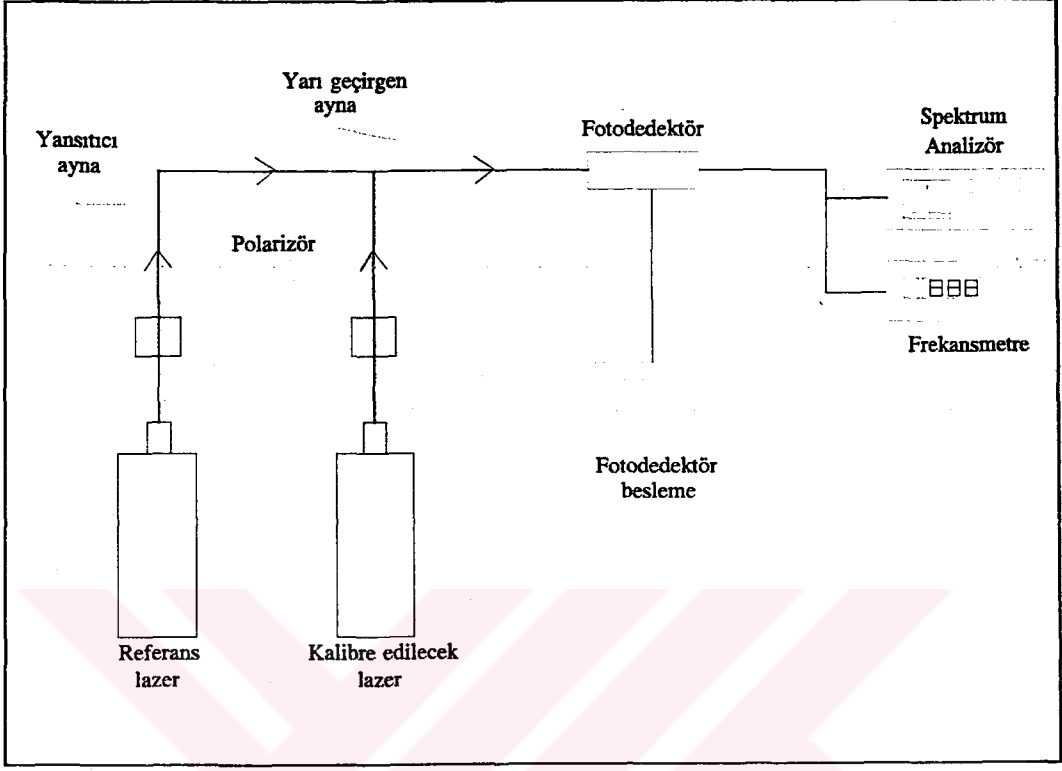
$$E = E_1 + E_2 \quad (2.3.2.3)$$

Enerji ifadelerini kullanarak bir tarif verebilmek için (2.3.2.3) ifadesinin karesini alarak ve E_1 , E_2 'nin değerlerini bu ifade içine konulduğunda E^2 ifadesini aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$E^2 = (E_1 + E_2)^2 = \epsilon_1^2 \cos^2(\nu_1 t + \phi_1) + \epsilon_2^2 \cos^2(\nu_2 t + \phi_2) +$$

$$\frac{1}{2} \nu_1 \nu_2 \left[\cos \frac{1}{2} ((\nu_1 + \nu_2)t + (\phi_1 + \phi_2)) \right] + \quad (2.3.2.4)$$

$$\frac{1}{2} \nu_1 \nu_2 \left[\cos \frac{1}{2} ((\nu_1 - \nu_2)t + (\phi_1 - \phi_2)) \right]$$



Şekil 2.3.2.1 : Uzunluk Referans Standardlarının Kalibrasyon Düzeneği.

Optik dedektörler 1 GHz'ten küçük frekanslara duyarlıdırlar, ve böylelikle yalnızca fark frekans değeri olan $\delta\nu = | \nu_1 - \nu_2 |$ 'i ölçülebilmektedir. Çalışmalarda lazerin frekans kararlılığının zaman düzleminde tespiti " Allan Varyansı " yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca herhangi bir osilatörün kararlılığı da aynı yöntemle yapılır. Lazerin yaydığı ışın demetinin elektrik alanı $E(t)$ ile ifade edilirse ve çok düşük değerde olan genlik değişimleri ihmal edildiğinde, $E(t)$ 'yi :

$$E(t) = E_0 \cos(\omega_0 t + \phi(t)) \quad (2.3.2.5)$$

şeklinde yazabiliriz. Anlık frekans değeri,

$$\nu(t) = \frac{(\omega_0 + \dot{\phi}(t))}{2\pi} \quad (2.3.2.6)$$

ve bağıl anlık frekans değişimi ise:

$$y(t) = \frac{\phi(t)}{\omega_0} \quad (2.3.2.7)$$

olarak ifade edilir. Allan Varyansı yardımı ile zaman düzleminde osilatörün kararsızlığı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\sigma_y^2(2, \tau, \tau) = \sigma_y^2(\tau) = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{m} \right) \sum \left[\frac{(y_{k+1} - y)^2}{2} \right] \quad (2.3.2.8)$$

yukarıdaki ifadede yer alan y_k

$$y_k = \frac{1}{\tau} \int_{t+k\tau}^{t+(k+1)\tau} y(t) dt \quad (2.3.2.9)$$

olarak ifade edilir.

τ bir ölçüm süresidir. Pratik uygulamalarda σ_y^2 tam olarak ölçülememektedir, ancak önceden belirlenmiş belli zaman aralıklarla yapılan sınırlı sayıda ölçümler ile yetinilmektedir. Bir lazerin frekansının kararlılığı, bağıl varyans yardımıyla ifade edilir:

$$V_R = \frac{\sigma(t)}{\nu_0} \quad (2.3.2.10)$$

Bu tip ölçümlerde, karşılaştırılan referans lazer ile kalibre edilen lazerin ışın demetleri arasında hizalanma sırasında oluşan açısal hatalar, dedektör çıkışındaki sinyalin frekansının açısal hata ile orantılı olarak genişlemesine neden olmaktadır (Bosch, 1973; Chartier³ et al., 1992; Petru et al., 1990; Picard, 1989; Randall, 1987).

Bu genişleme aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta \nu = \kappa \nu_0 \sqrt{\left(\frac{2kt}{mc^2} \right) \log 2} \quad (2.3.2.11)$$

İki sinyal arasında yarım miliradyan'lık bir fark için referans ortam sıcaklığında yaklaşık 100 kHz lik bir frekans genişlemesi olmaktadır. Bu da yaklaşık olarak 10^{-11} [m]'lik bir boyut hatasına karşılık gelmektedir (Simonsen et al., 1990; Spieweck, 1985; Spieweck, 1980; Venceslav, 1974; Wallard, 1972; Wallard, 1974; Warnecke et al., 1984; Weiss et al., 1988).

2.4 Mutlak Ölçüm Metodları

Bu ölçüm metodu, uzunluk biriminin tanımına uygun olarak gerçekleştirilen birincil referans standardından, enterferometrik ölçüm teknikleri kullanarak, doğrudan metroloji laboratuvarlarının ve / veya sanayinin "00" ve "K" kalite sınıfı ölçü lokmalarının ve diğer hassas boyut ölçme sistemlerinin kalibrasyonu için uygulanır. 1, 2 ve 3 sınıfı ölçü lokmaları da enterferometrik yöntemle kalibre edilebilir, ancak ölçü lokmaları maliyet ve muhafaza ettikleri toleranslar bakımından incelendiğinde, kalibrasyon masrafları işletim maliyetini karşılayamaz. Dolayısıyla bu sınıflarda bulunan ölçü lokmaları daha ucuz bir yöntem olan mukayeseli ölçüm metodu ile kalibre edilmeleri daha rasyonel bir çözüm olarak görülür. Enterferometre teknikleri kullanılarak ölçü lokmalarının kalibrasyonunun yapılabilirliği ilk defa 1892 yılında A.Albert Michelson tarafından gösterilmiş ve 1894 yılında "VALEUR DU METRE EN LONGUEURS D'ONDES LUMINEUSES" adlı eserinde Paris BIPM'de bulunan uluslararası "Prototip Metre"nin kadmiyum spektrumundaki karakteristik kırmızı dalga boyu cinsinden enterferometrik teknik kullanılmıştır. Bu çalışmalar boyutsal metroloji'de enterferometrenin diğer hiç bir yöntemle mukayese edilemeyecek ölçüde yüksek doğrulukta olduğunu ispat etmiş ilk örnektir (CNAM,1989; Kösters,1938; Kramer,1988; Michelson,1894). Ölçme tekniğindeki bu gelişme 1905 yılında J.Benoit, C.Fabry ve A.Perot tarafından tekrarlanan ölçümlerle daha da geliştirilmiş ve " Prototip Metre " üzerinde tekrarlanan ölçümlerin, yapılan ilk ölçümlerle olan tutarlılığı, sonucu daha da pekiştirmiştir.

1892 tarihinde enterferometrenin " Prototip Metre " nin kadmiyum spektrumundaki karakteristik kırmızı ışığın dalga boyu cinsinden ifade edilmesinden sonra günümüze kadar geçen sürede enterferometre için gerekli monokromatik ışık kaynakları ve tayf genişlemeleri iyice anlaşılmış ve Lazer kaynaklarının keşfedilmesi ile enterferometreler metroloji laboratuvarlarında vazgeçilmez bir teçhizat olarak yerini almıştır. Aynı kaynaktan çıkan elektromagnetik dalganın bir ışık bölücü ayna ile ikiye ayırarak bunları farklı optik yollar izlemesi ve bir noktada süperpoze olması (üst üste gelmesi) enterferans veya girişim olarak adlandırılmaktadır. İki veya daha fazla dalga katarının uzayda birbirlerinin üstüne binmesiyle gerçekleşen girişim olayı yapıcı ve yok edici olarak iki şekilde görülür. Yapıcı (kuvvetli) girişimin görülebilmesi için gerekli koşullar şunlardır (Bayer,1989; Kramer,1987; Michelson, 1894; NPL, 1987; OILM, 1980; Priel,1993):

1. İki ışın arasındaki faz farkı sabit olmalıdır. Bunun anlamı her iki ışının da aynı periyoda ve dalgaboyuna sahip olmasıdır. Bu şart sağlanmadığı takdirde, girişim çok küçük yol farklarıyla görünebilir olacaktır.

2. Her iki ışın demetinin yayılma doğrultuları arasındaki açı, kosinüsü bire eşit olacak kadar küçük olmalıdır. Daha büyük açılar da girişim oluşturur fakat açı büyüdükçe gözlem yapmak, saçaklar arası uzaklık azaldığından zorlaşır.



3. Her iki dalganın şiddetleri mümkün olduğunca birbirine eşit olmalıdır. Bu koşul sağlanmadığı takdirde saçak görüntüsü zayıf olabilir.

4. Her iki dalga da aynı polarizasyona sahip olmalıdır. Basit olması için, doğrusal polarize edilmiş ve vakum içerisinde z-yönünde hareket eden bir elektromanyetik dalganın, herhangi bir noktadaki elektrik alan (E), yol ve zamanın fonksiyonu olan trigonometrik bir fonksiyon ile gösterilebilir (Bosch,1973; Bouchareien²,1988; King, 1977).

$$E=U\cos[2\pi\nu(t-z/c)] \quad (2.4.1)$$

Burada U, genlik; ν , frekans; c ışığın hızıdır. T periodu, ν frekansı ve ω açısal frekans kullanarak aşağıdaki gibi ifade edilir ;

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.4.2)$$

Dalgaboyu (λ), $\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$ ilişkisiyle verilir ve burada dalgaboyu,dalganın yayılma

hızına dolayısıyla ortamın kırılma indisine bağlıdır. Ortam değiştiğinde dalganın frekansı aynı kalmasına rağmen dalgaboyu değişir. Kırılma indisi "n" olan bir ortamda dalga, $\nu = c / n$ hızıyla yayılır ve dalgaboyu,

$$\lambda_n = \nu \cdot T = \frac{\nu \cdot \lambda}{c} = \frac{\lambda}{n} \quad (2.4.3)$$

ile verilir.

Aynı zamanda (2.4.1) denklemini,

$$E = Re \{U \cdot \exp[i \cdot 2\pi \nu \cdot (t-z/\nu)]\} \quad (2.4.4)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada Re, { } parantez içerisindeki ifadenin reel kısmını temsil eder. Bu bize eşitliğin sağ tarafının, uzaysal ve zamansal değişimin çarpanları şeklinde ifade edilmesini sağlar.

$$E = \text{Re} \{ U \cdot \exp(-i \cdot 2\pi \nu z / v) \cdot \exp(i \cdot 2\pi \nu t) \} \quad (2.4.5)$$

$$\phi = \frac{2\pi \nu \cdot z}{v} = \frac{2\pi \cdot n \cdot z}{\lambda} \quad (2.4.6)$$

olmak üzere, (2.4.5) denklemini

$$E = \text{Re} \{ U \cdot \exp(-i\phi) \cdot \exp(i2\pi \nu t) \} \quad (2.4.7)$$

şeklinde de ifade edilebilir. Kaynak ile z noktası arasındaki optik yolu $P=nz$ ile verilir. ϕ ise bu yola karşılık gelen faz farkıdır. E üzerindeki tüm işlemlerin lineer olduğunu düşünürsek (2.4.7) eşitliği;

$$E = u \cdot e^{i2\pi \nu t} \quad (2.4.8)$$

eşitliğine dönüştürebiliriz. Burada (u), titreşimin kompleks genliğidir ve $u = U \cdot e^{-i\phi}$ 'dir. u_1 ve u_2 farklı yollardaki ışınlar ise;

$$u_1 = U_1 \cdot e^{i\phi_1} \quad (2.4.9)$$

ve

$$u_2 = U_2 \cdot e^{i\phi_2} \quad (2.4.10)$$

olarak ifade edilebilir. Bu iki dalganın birbiri üzerine superpoze edildiğinde, elektromanyetik dalga teorisine göre, aynı yönde yayılan ve aynı düzlemde polarize olmuş iki monokromatik dalganın, Φ gibi herhangi bir noktada birleştirildiğinde, bileşke alanın basit toplamayla elde edileceğini söyler (Bruhart, 1965).



$$u = u_1 + u_2 \quad (2.4.11)$$

$$I = |u|^2 = |u_1 + u_2|^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.4.12)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos \Delta\phi \quad (2.4.13)$$

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.4.14)$$

Buradan görülmektedir ki, şiddetlerin toplamı, iki dalganın şiddetlerinin vektörel toplamına eşittir.

$2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos\Delta\phi$ terimine girişim terimi denir ve $\Delta\phi = (2n+1)\pi$, $n=0,1,2,\dots$ bu

durumunda $\cos \Delta\phi = -1$ olduğundan $I = I_{\min}$ olur. Bunun anlamı iki dalga birbirlerine göre zıt fazda olduklarından karanlık girişim saçakları oluşturur.

$\Delta\phi = 2n\pi$, $n=0,1,2,\dots$ durumunda $\cos \Delta\phi = 1$ olduğundan $I = I_{\max}$ olur. Bunun

anlamı ise iki dalga birbirleriyle aynı fazda olduklarından aydınlık girişim saçakları oluşturur. Her iki dalga eşit şiddette olduklarında, örneğin $I_1 = I_2 = I_0$, (2.3.12) eşitliği

$$I = 2 \cdot I_0 \cdot [1 + \cos \Delta\phi] = 4 \cdot I_0 \cdot \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (2.4.15)$$

şeklini alır. Burada şiddet, 0 ile $4I_0$ arasında değişmektedir .

Gözlenebilir (kuvvetli) girişim etkileri meydana getirmek için, çıkışlarında daima aynı fazda olan ışık dalgaları yayan iki kaynağa sahip olmak gerekir. İki noktadan daima aynı fazda olarak çıkan iki ışık dalgası sağlamak için, sadece bir ışık dalgasından hareket etmek ve bu dalgayı, her biri farklı yoldan gidip, sonunda bir ekran üzerinde aynı noktada karşılaşan, iki kısma ayırmak gerekir. Bu koşullarda, orijinal ışık dalgasının uğrayabileceği herhangi bir faz değişmesi iki kısma beraber etkir ve dolayısıyla bu iki kısım daima aynı fazda yola çıkarlar. Böyle iki noktaya uyumlu (koherent) kaynaklar adı verilir. Uyumluluk faz farkının zaman içinde sabit olması demektir (Bruhart,1965; Matsumoto et al.,1992; Matsumoto,1980, Michelson, 1894; Millea,1987).

2.4.1 Enterferometreler

Ölçü lokmalarını klasik enterferometrik yöntemle dalga boyu cinsinden ölçme prensibi, yüz yılı aşkın bir süre önce bulunmuş ve bu yönteme dayanan bir çok tip enterferometre metroloji laboratuvarlarının ihtiyaçlarına cevap vermek üzere geliştirilmiştir. Enterferometreler temelde birbirine benzemekle beraber, firmalara özgün farklılıklar arz etmektedir. Elektromagnetik spektrumun görünür bölgesinde çalışan klasik enterferometreler ölçü lokmalarının (masterların, v.s.) uzunluklarının ışığın dalga boyu cinsinden ifade edilmesinde " oransal artık " ölçme prensibine göre çalışmaktadırlar. Bu yöntem referans düzlem ile masterın veya etalonun üst yüzeyinden oluşturulan girişim saçakları arasındaki farkın ölçülmesine dayanmaktadır (Şekil 2.4.1). Vakumda λ dalga boyuna sahip bir monokromatik ışın kaynağına sahip olduğumuzu kabul edersek, " n " kırılma indisine sahip ortamdan geçerken bu ortamdaki dalga boyu:

$$\lambda = \frac{\lambda_v}{n} \quad (2.4.1.1)$$

Ölçmede kullanılan ölçü lokmasının nominal uzunluğu L ;

$$L = (N_n + E_n) \frac{\lambda}{2} \quad (2.4.1.2)$$

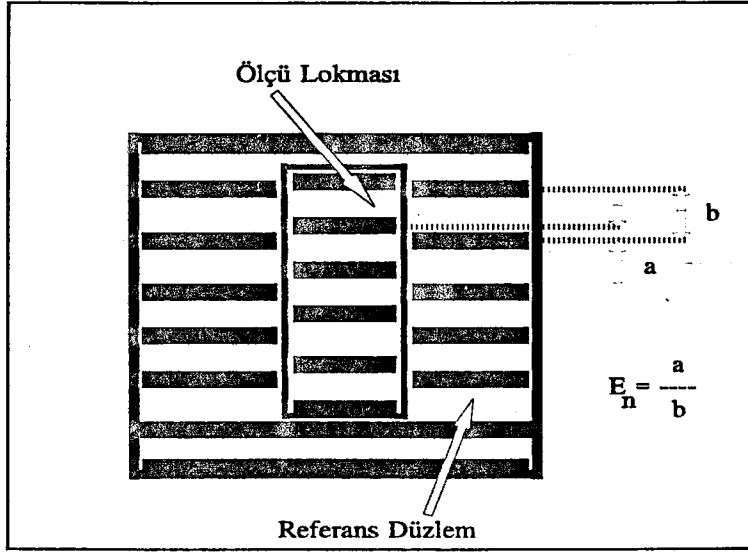
Boyut değişimi ise ;

$$\delta l = L_m - L \quad (2.4.1.3)$$

$$\delta l = [(N_m - N_n) + (E_m - E_n)] \frac{\lambda}{2} \quad (2.4.1.4)$$

δl ölçülen ölçü lokmalarının nominal boyut'taki farkını vermektedir. Bu farkın ölçülebilmesi için 3 veya 5 monokromatik ışık kullanarak ölçülmesi gerekmektedir, dolayısıyla birçok " oransal artığın " ölçülmesi ile oluşan " $n-1$ " sayıda bir denklem sistemin çözümü ile δl bulunur.

Bu çalışma esnasında teorik olarak dört tip enterferometre incelendi. Bu enterferometreler; " ZEISS JENA " enterferometresi, Japon " TUSUGAMI " enterferometresi, " METRIC-KÖSTERS ZEISS " enterferometresi ve " Ç.F. Lazer" enterferometresidir (Darnedde,1992; Engelhard,1957; Hartmann et al.,1989; Hewitt, 1984; NPL,1984;Kiyoto,1982).

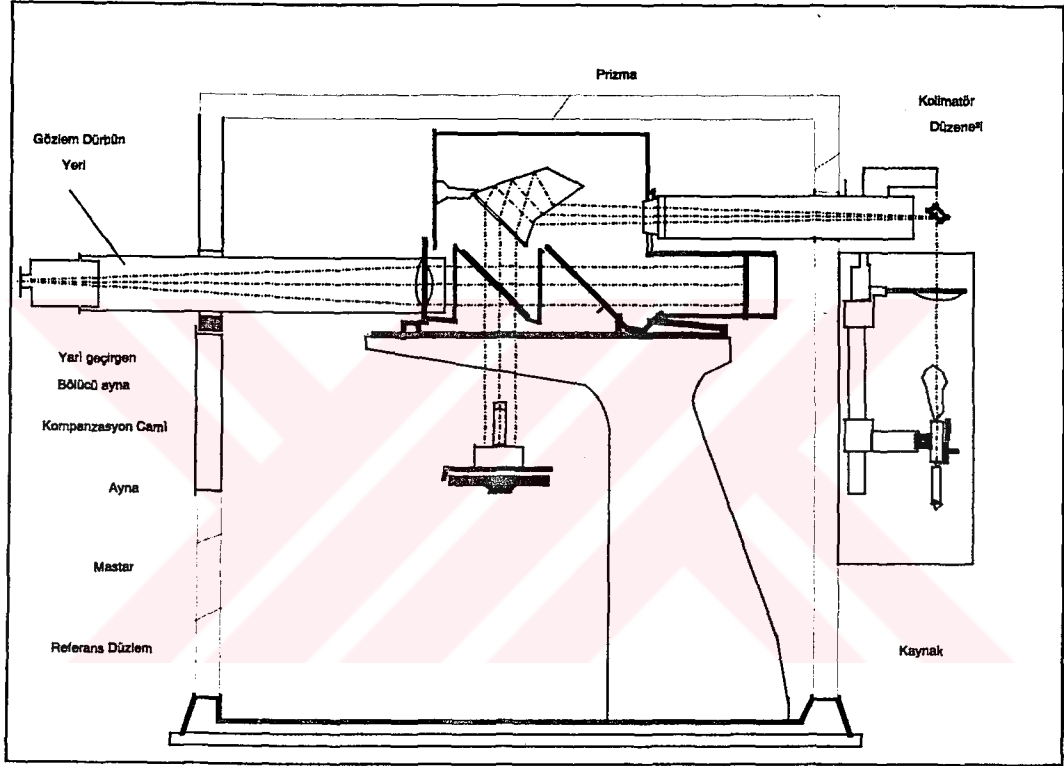


Şekil 2.4.1 : Oransal Artık Değeri

2.4.1.1 Zeiss Jena Enterferometresi

Bu enterferometre, emsalleri içerisinde en basit yapıya sahip olup, " Kösters " tipi enterferometre olarak da anılmaktadır. Şekil 2.4.1.1.1'de gösterilen bu enterferometre üç önemli kısımdan oluşmaktadır;

1. Monokromatör: Doğal Kripton, Kadmiyum, Civa veya Helyum lambasından çıkan ışın demeti kondensatör ve kolimatör mercek sisteminden geçtikten sonra bir dispersyon prizmasından geçerek istenilen monokromatik ışın demetini seçilmesi imkanı vermektedir.



Şekil 2.4.1.1.1 : Zeiss Jena Enterferometresi

2. Enterferometre ;İki optik lam'dan ve iki optik aynadan oluşmakta. Lam'lerden birisi ışık demetini ikiye bölmekte diğeri ise optik yolu kompanse etmektedir.

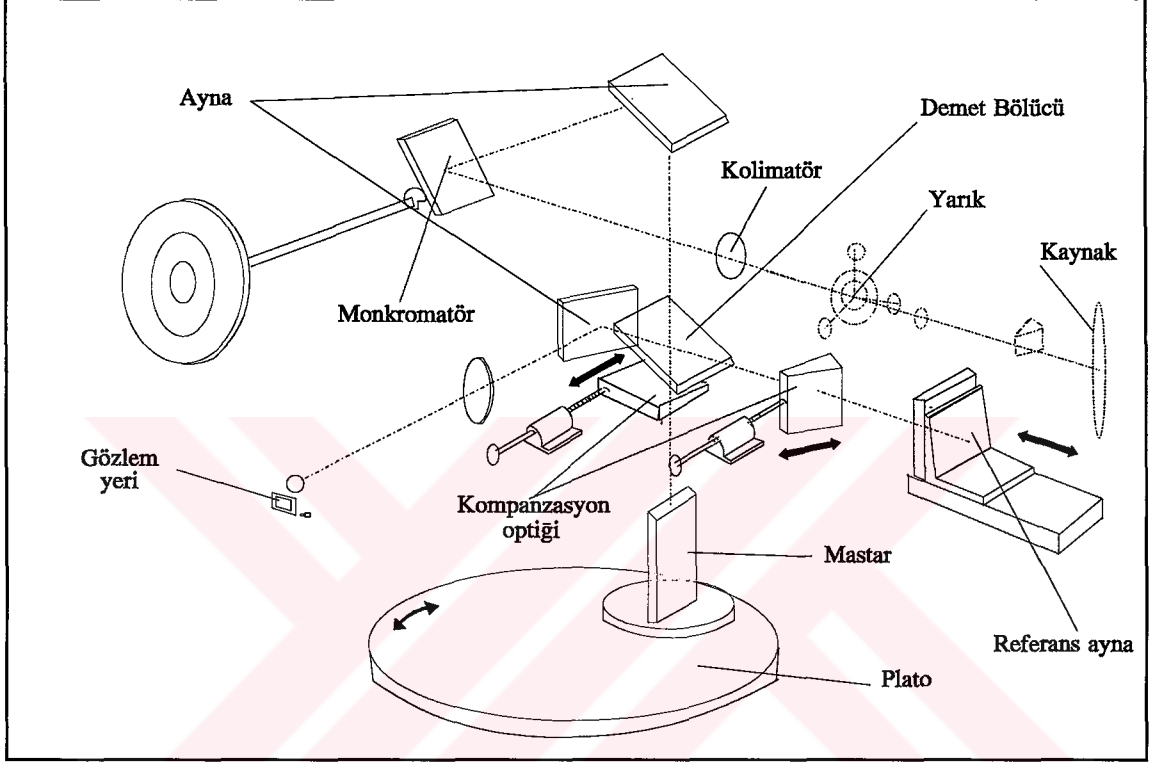
3. Gözlem optiği.

Ölçü lokmaları, izotermal bir hacim içerisinde sıcaklığı stabilize edildikten sonra ölçülmektedir.

2.4.1.2 Tusugami Enterferometresi

Genelde bütün enterferometreler bir ölçümde bir tek master ölçmektedir. Bir ölçü lokma setinde en az 47 ölçü lokması olduğunu düşünürsek pek rahat ve çabuk bir çalışma olmadığı görülmektedir.

Tusugami enterferometresi bir çok ölçü lokmasını aynı hacim içine konularak ölçme imkanını veren bir tasarıma sahiptir. Bu yeni tasarım 10 adet ölçü lokmasını izotermal bir hacim içersinde ölçme imkanını vermektedir.



Şekil 2.4.1.2.1 Tusugami Enterferometresi

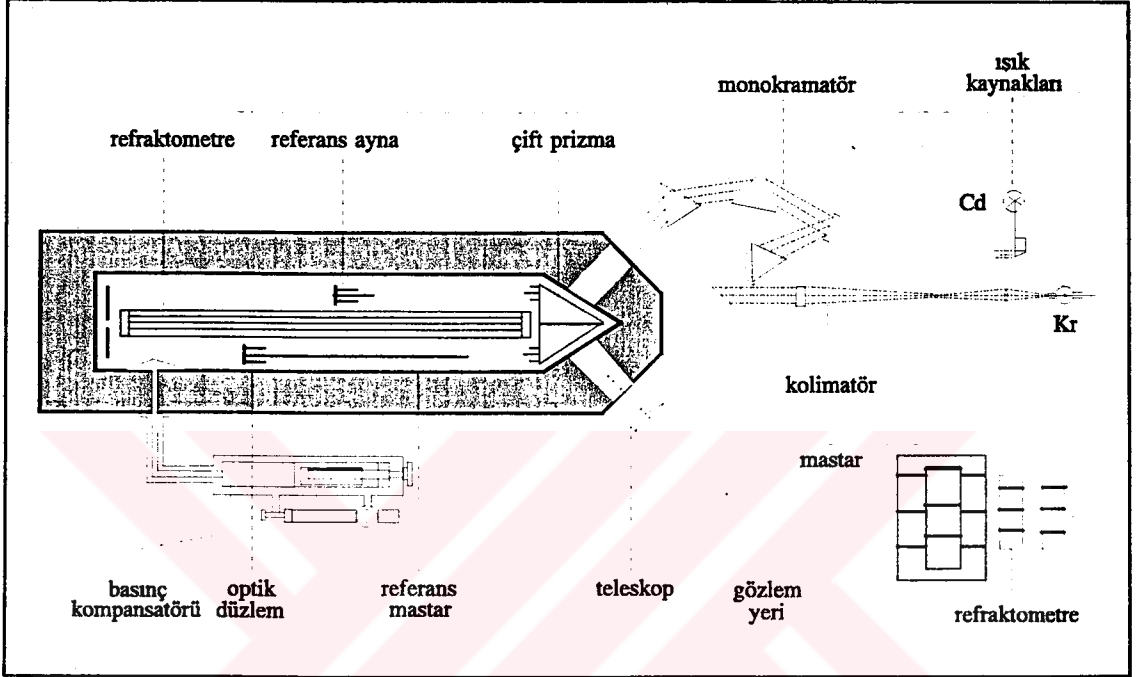
Şekil 2.4.1.2.1 de gösterilen bu enterferometre de " Zeiss Jena " enterferometresinden farklı olarak enterferans alanının fotoğrafını çekebilecek bir optik düzeneğe sahiptir. Ayrıca aynaların konumu, ölçü lokmasının boyutuna bağlı olarak ayarlanabilir (NPL,1984; NRLM,1978; Sydenham,1985).

2.4.1.3 Metrik Zeiss-Kösters Enterferometresi

Bir metreye kadar masterların ölçülebildiği (Şekil 2.4.1.3.1) ve aynı zamanda bir komparatör olan bu enterferometre şu özelliklere sahiptir (Sydenham,1985; Warnecke et al.,1984):

1. 250 mm ye kadar küresel başlı ölçü çubukları, ölçü küreleri ve masterlar ölçülebilmektedir. 100 mm den küçük masterlar bu enterferometrede ölçülememektedir.
2. Metrik Zeiss enterferometresi Kripton 86 bir ışık kaynağı kullanmakta olup 500 mm den 1 m ye

kadar olan ölçümleri 500 mm etalon bir ölçme lokması vasıtası ile mukayeseli olarak ölçümler yapabilmektedir. Bunun sebebi ise, spektral lambanın koherent uzunluğu 500 mm den büyük uzunlukları ölçme imkanı vermemektedir.



Şekil 2.4.1.3.1 : Metrik Zeiss - Kösters Enterferometresi

2.4.1.4 Çift Frekans Lazer Enterferometresi

Ç.F. lazer enterferometresi, ışın frekansı termal olarak stabilize edilmiş bir mesafe ölçme sistemidir (Şekil 2.4.1.4.1). Bu enterferometrenin kontrol sistemi, referans ve ölçme optik detektörleri, yüksek gerilim güç kaynağı ve gösterge biriminden oluşmaktadır. Lazer, birbirine dik polarize edilmiş ve aralarında 2 MHz'lik frekans farkı olan iki ışın demeti sağlar. Lazerin ν_1 ve ν_2 frekanslardaki demetin bir kısmı b_1 bölücü yarı geçirgen ayna vasıtası ile D_1 detektörüne gönderir ve referans sinyali oluşturur. Diğer kısım ise enterferometrenin sabit ve hareketli kolundan döndükten sonra b_2 yarı geçirgen ayna tarafından D_2 detektörü üzerine gönderilerek ölçme sinyali elde edilir. Bu iki sinyal arasındaki fark mikroişlemci ile işlenerek gösterge ünitesinde, katedilen mesafe olarak gösterilmektedir. Enterferometrenin hareketli kolunda, uzaklaşma yönünde bir yer değiştirme yapıldığında, yansıyan ışın demetinin frekansı Doppler-Fizeau etkisinden dolayı küçülmekte ve 2 MHz'lik sabit frekans farkı yer değiştirme ile orantılı olarak artacaktır. Eğer enterferometrenin hareketli kolunda yaklaşma yönünde bir yer değiştirme söz konusu ise frekans farkı yer değiştirme ile orantılı olarak azalacaktır (HP,1991;

Kiyoto,1982; Ishikawa et al.,1994). Referans fark frekans değeri ν_0 ve enterferometrenin ölçme kolundaki fark frekans değeri ν_1^0 yer değiştirme hızı ile orantılıdır:

$$\nu_1^0 = \nu_1 \left(1 + 2\frac{v}{c}\right) \quad (2.4.1.4.1)$$

$$\nu_2 - \nu_1^0 = \nu_0 + \nu_1 2\frac{v}{c} \quad (2.4.1.4.2)$$

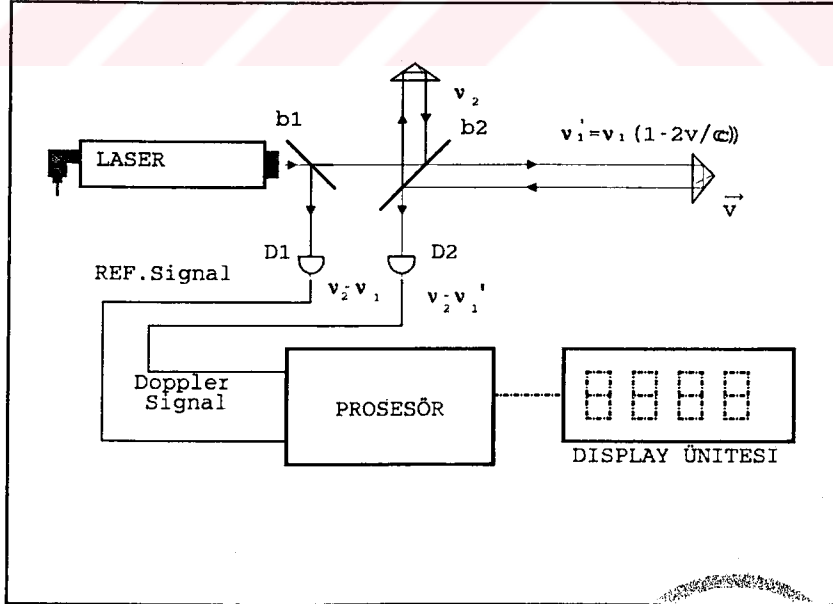
$$\nu_2 - \nu_1^0 - \nu_0 = \nu_1 2\frac{v}{c} \quad (2.4.1.4.3)$$

Gerçekte ölçülmek istenilen hareketin hızı değil, zamana göre hızın integrali olan yer değiştirme değeridir. Dolayısıyla;

$$X = X_0 + \int_0^t v dt \quad (2.4.1.4.4)$$

$$X = X_0 \frac{\lambda}{2} \int_0^t (\nu_1^0 - \nu_2) dt - \frac{\lambda}{2} \int_0^t \nu_0 dt \quad (2.4.1.4.5)$$

ile yer değiştirme değeri elde edilir.



Şekil 2.4.1.4.1 : Çift Frekans Lazerin Şematik Gösterimi

Yukarıda belirtilmiş integrali değerini bulunması için bir T periyodunda, D_1 ve D_2 detektörleri vasıtasıyla frekans değerleri ölçülmesi gerekir. Bu durumda T periyodu aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$T=2\pi\nu t \quad (2.4.1.4.6)$$

anlık frekans değeri ise;

$$\nu=(\frac{1}{2\pi})\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4.1.4.7)$$

dır.

Enterferometrenin detektörlerine gelen sinyaller mikroişlemci tarafından işlenerek bir kaç dakika için 10^{-11} ve uzun süreler (saat, ay, sene) için 10^{-10} kararlılık ile ölçümler gerçekleştirilmektedir (Abramova et al.,1992; HP,1991; NPL,1987; NRLM,1984).



2.5 Karşılaştırmalı Ölçüm Metodu

Karşılaştırmalı ölçüm metodu ise ölçülen büyüklüğün, değeri bilinen aynı cins bir büyüklükle doğrudan karşılaştırılarak ölçülmesidir. Referans bir ölçü lokması kullanılarak bir alt kalite sınıfında bulunan bir ölçü lokma seti, komparatör vasıtası ile kalibre edilebilir. Karşılaştırma işlemi enterferometrelerle yapılabildiği gibi Elektro-Mekanik komparatörlerin vasıtasıyla da yapılabilmektedir. Ölçü lokmalarını mukayese işleminde "00" kalite sınıfına ait bir ölçü lokma seti ile bir alt sınıfta bulunan ölçü lokma setlerinin kalibrasyonu gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.4.1.3.1 de Enterferometrik ZEISS komparatörü, EK 5, Şekil E 5.1'de Elektro-Mekanik komparatör gösterilmektedir. Metrik Zeiss- Kösters Enterferometresi ile mutlak ölçümlerde yapılabilmektedir. Elektro-mekanik komparatörde "00, K, veya 0" sınıfı referans ölçü lokmaları kullanarak bir alt sınıfta bulunan ölçü lokmalarının kalibrasyonu mekanik bir standa bağlı olan bir induktif boyut transduseri yardımı ile referans ve kalibre edilecek ölçü lokması arasındaki farkı ölçülür. Referans ölçü lokmasını orta noktasında sıfır ayarı yapıldıktan sonra kalibre edilecek ölçü lokması üzerine beş noktada ölçümler yapılır (EK 5, Şekil E 5.3) ve tekrar referans ölçü lokmasının orta noktasına dönülür. Bu noktalar her iki ölçü lokmasının orta noktası ve kalibre edilen ölçü lokmasının dört köşeden yaklaşık 1.5 mm mesafede alınan noktalardır. Elde edilen değerlerle, f_s , f_u ve f_o değerleri hesap edilir ve ilgili standartlarda izin verilmiş değerlerle karşılaştırılır (EK 5, Şekil E 5.2), (BIPM¹,1984; Moore,1970; POTULSKI, 1986;Perez et al.,1993; Stock,1984).

2.6 Mutlak ve Karşılaştırmalı Ölçümlerde Ölçmeyi Etkiyen Faktörler

Boyutsal metrolojide, ölçü lokmalarının kalibrasyonu önemli bir yeri vardır. Ölçü lokmalarının kalibrasyonu sırasında, ölçme sonucunu etkileyen bir çok etken mevcuttur. Mutlak ve mukayeseli ölçümlerde, ölçmeyi etkileyen faktörler arasında aşağıdakileri sayabiliriz :

- 1.Havanın kırılma indisi,
- 2.Optik referans düzlemin etkisi,
- 3.Ölçü lokmalarının konum etkisi ve ölçme problemlerinin temas etkisi,
- 4.Ortam sıcaklığının etkisi ve stabilizasyon süresi,
- 5.Sıcaklık değişiminin, ölçü lokmalarının uzama katsayısı üzerindeki etkisi,
- 6.Sıcaklık ölçerlerin kalibrasyonu,
- 7.Ölçmede kullanılan Laserin kalibrasyonu ve doğruluğu,
- 8.Ölçü lokmalarının yüzey durumu ve kalitesi,
- 9.Uzunluk ve boyutsal metroloji laboratuvarlarının ortam şartları.

2.6.1 Havanın Kırılma İndisi, Enterferometrik Ölçümler Üzerindeki Etkisi

Enterferometrik ölçümlerde kullanılan ışın kaynağının dalga boyu " λ ", vakuma göre tanımlanmaktadır. Ancak, ölçümlerde ortamın kırılma indisi, ışığın dalga boyunu değiştirdiği bilinmektedir. Anpirik olarak bu etki şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\lambda_a = n\lambda_v \quad (2.6.1.1)$$

Ortamın kırılma indisi ise üç ana etkene bağlıdır; bunlar, ölçme ortamının atmosferik basıncı, nemi ve ortamın sıcaklığıdır. Standard koşullarda ($p = 760$ mm Hg, $T = 20$ °C ve $R = \% 50$) ortamın kırılma indisi $n = 1.00027$ dir. Konu ile ilgili kaynaklar incelendiğinde, ortam sıcaklığına, neme ve basınca bağlı olarak ortamın kırılma indisini veren birçok formüller mevcuttur (Spiewieck,1980; Sydenham,1985; Warnecke et al.,1972).Ortamın kırılma indisini ifade eden çeşitli formüller aşağıda verilmiştir:

$$n=1+[0.933-0.003(t-20)-0.36(P-760)+0.005(p-10)-0.015(k-3)]10^{-6} \quad (2.6.1.2)$$

$$n=1+9.744310^{-6}P\left[\frac{(1+10^{-6}(26.7-0.1871))}{(0.934915+0.00203887)}\right]-1.08910^{-6}Re^{0.0325T_0} \quad (2.6.1.3)$$

$$(n-1)_s = 0.04722300 (173.3-R^2)^{-1} \quad (2.6.1.4)$$

$$(n-1)_\phi = (n-1)_s \frac{(0.00138823P)}{(110.003671t)} \quad (2.6.1.5)$$

bu formüllerin uygulanmasıyla 700 - 800 torr'luk hava basıncı ve 15 - 30 °C aralığında " n " değeri 1.025-1.15 arasında değerler alır ve dalga boyu üzerindeki etkisinin değeri ise 1×10^{-9} 'dan küçük olduğu literatürde belirtilmektedir. Enterferometrik ölçümlerde havanın kırılma indisinin tesbitinde sıklıkla kullanılan 2.6.1.3 numaralı ifadedir. Ortamın sıcaklık, basınç ve nem değerleri, enterferometrelerde bulunan sensörler aracılığı ile ölçme sisteminde bulunan mikroişlemciye yükleyerek, o andaki ortam koşulları için dalga boyu değerini otomatik olarak düzeltmektedir. Bu çalışmada, ölçü lokmalarının kalibrasyonunda kullanılan Ç.F lazer ölçüm sistemde havanın kırılma indisi otomatik olarak hesap edilip gerekli düzeltme yapılmaktadır (Darnedde,1992; Edlen,1966; Engelhard,1957).

2.6.1.1 Karbondioksit (CO₂) Miktarının Kırılma İndisi Üzerindeki Etkisi

Havada bulunan gazların kırılma indisi üzerindeki etkileri, bu gazların molar konsantrasyonları ile direkt orantılıdır. Standart havadaki 0.0003 CO₂ miktarı (0.23 Torr 'luk bir kısmi basınç'ta), n üzerinde $4.5 \cdot 10^{-9}$ 'dan küçük bir etki yapmaktadır. Havanın kırılma indisinin etkiyen CO₂ miktarına bağlı matematiksel ifade aşağıdaki gibi dir:

$$(n-1)_x = [1 + 0.540(x - 0.0003)](n-1)_s \quad (2.6.1.1.1)$$

2.6.1.2 Su Buhar Basıncının Etkisi

Şartlandırılmış hava içersinde %1 ile %2 arasında su buharı mevcuttur ve kırılma indisi üzerinde 4 ile $8 \cdot 10^{-8}$ düzeyinde bir etki yapmaktadır. Bu etki, CO₂ miktarının etkisinden büyüktür (Darnedde, 1992). Dolayısıyla enterferometrik ölçümler sırasında şartlandırılmış havada bulunan su buhar miktarını giderecek tedbirler alınmalıdır.

2.6.1.3 Referans Optik Düzlem Etkisi

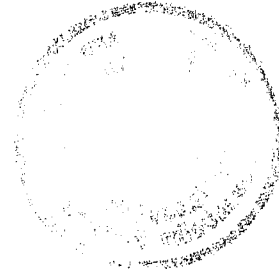
Enterferometrede, ölçü lokmalarının referans alt yüzeyi, moleküler adezyon seviyesinde referans düzleme yapıştırılmaktadır. Bu düzlem, optik kalitede olup düzlemsizlik değeri ise $\lambda / 20$ den küçüktür (Matsumoto, 1980; Michelson, 1894; Toffin, 1978). Bu düzlemin amacı, ölçü lokmalarının alt yüzeyi ile üst yüzeyin orta noktası arasında kalan mesafeyi dalga boyu cinsinden ifade edebilmektir. Optik değerden mekanik boyuta geçilebilmesi için aşağıda belirtilmiş etki değerlerini göz önüne tutulması gerekmektedir.

1. Ölçme yüzeylerinin form hataları,
2. Ölçü lokmalarının ölçme yüzeyi ile referans düzleminin yüzey kalitesi,
3. Referans düzlemin ve mastarların malzeme yapıları.

Özellikle elektromanyetik dalganın, enterferometrenin optik ayna kolunda ve metalik yüzeylerde oluşturduğu yansımalar ölçüm üzerinde önemli etkiler oluşturmakta dolayısı ile sistematik hata kaynakları meydana getirmektedir.

2.6.1.4 Ölçü Lokmasının Konum Etkisi

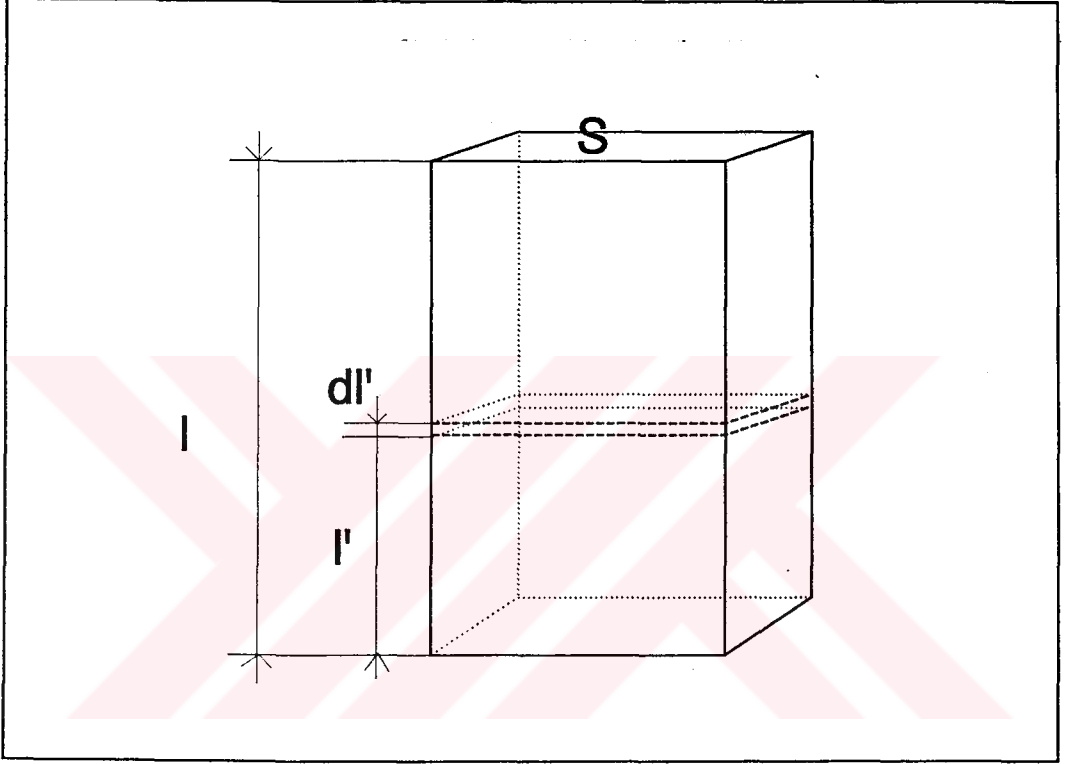
ISO ve Avrupa normlarında, 350 mm'ye kadar olan ölçü lokmalarının dikey, 350 mm'den büyük ölçü lokmalarının ise yatay konumda ölçülmelerini tavsiye edilmektedir. Dikey konumda ölçülen lokmalar kendi ağırlığının etkisiyle bir zorlamaya maruz kalmaktadır (Şekil 2.6.1.4.1). Oluşan deformasyon mukavemet açısından incelendiğinde; δl elemanının oluşturduğu δF kuvvetinin değeri:



$$\delta F = \frac{\rho g S \delta l(l)}{(ES)}$$

(2.6.1.4.1)

$\hat{l}$ uzunluk değeri için basma kuvvetlerin etkisi ile oluşan deformasyonu gösterir.



Şekil 2.6.1.4.1 : Ölçü Lokmasında Kendi Ağırlığının Etkisi İle Oluşan Deformasyon

Birim uzunluk elemanı için deformasyon değeri yazarsak,

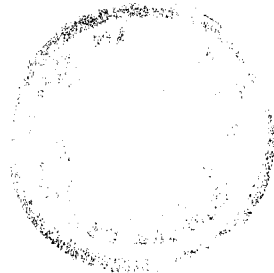
$$\delta \varrho = \frac{\rho g S \delta l(l)}{(ES)}$$

(2.6.1.4.2)

sonuç olarak;

$$\delta \varrho = \frac{\rho g \delta l(l)}{E}$$

(2.6.1.4.3)



bulunur. Kendi ağırlığının etkisi ile oluşan toplam deformasyonun değeri ise ,

$$e = \frac{\int_0^l \rho g \delta l(l)}{E} = \frac{\rho g \delta l^2}{2E} \quad (2.6.1.4.4)$$

Yukarıdaki ifadeden de görüldüğü gibi dikey konumda bulunan bir ölçü lokmasında oluşan deformasyon değeri, mastarın uzunluğunun karesi ile orantılıdır. İfade edilen hesap yöntemine dayanarak bu çalışmada kullanılmış olan 860703 numaralı 100 mm lik ölçü lokmasında aşağıdaki değerler için oluşması tahmin edilen deformasyon değeri;

$$\rho = 7800 \text{ [kgm}^{-3}] \quad E = 22 \cdot 10^{10} \text{ [Nm}^{-2}] \quad g = 9.8023007 \text{ [ms}^{-2}]$$

$$e = \frac{\rho g \delta l^2}{2E} = 0.17(10^{-6})l^2 = 1.7(10^{-3}) \text{ [}\mu\text{m]} \quad (2.6.1.4.5)$$

olarak bulunmuştur. Fakat aynı zamanda referans düzleminde de, ölçü lokmasının kendi ağırlığından dolayı bir deformasyon söz konusudur. Literatürde referans düzleminde oluşan deformasyon 0.2nm'yi geçmediği belirtilmektedir. Ayrıca enterferometrik ölçümlerin doğruluk değeri 5nm'yi aşmamaktadır. Bir başka problem ise Elektro-Mekanik komparatörlerde karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2.3.5.2). Ölçme probu ile ölçü lokmalarını malzeme ve elastik modülü arasındaki farktan dolayı, temas esnasında ortaya çıkan Hertz' kuvvetlerden dolayı temas deformasyonunu " α " oluşmaktadır (Bayer,1970; Ikonen et al.,1993;Nash,1977).

$$\alpha = \frac{(3\pi)^{2/3}}{2} \cdot P^{2/3} \cdot (V_1 + V_2)^{2/3} \cdot \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right)^{1/3} \quad (2.6.1.4.6)$$

$$D_1 = 1. \text{ cismin çapı} = 2R_1 \quad (\text{Küresel bir cisim için [mm]})$$

$$D_2 = 2. \text{ cismin çapı} = 2 | R_2 | \quad (\text{Küre için [mm]})$$

$$D_1 = \infty \quad (\text{Düzlem için})$$

$$D_2 = -2 | R | \quad (\text{Küresel cisimler için})$$

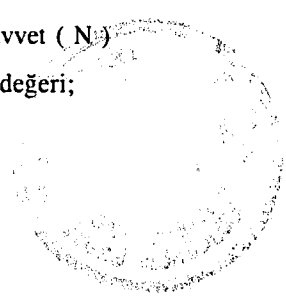
$$\tau_1 = \text{Poisson katsayısı}$$

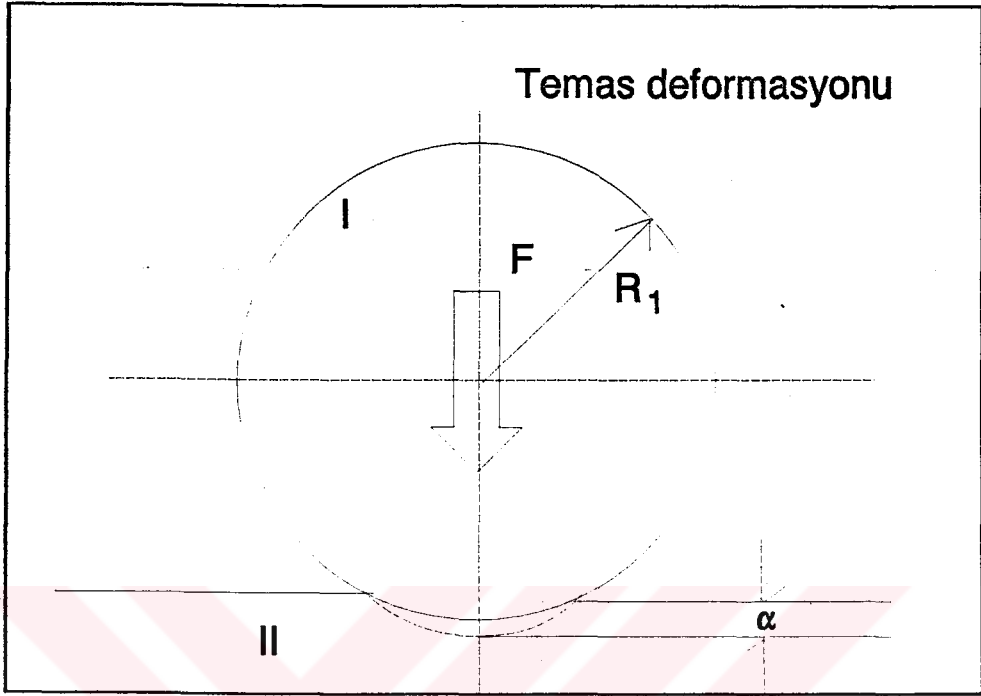
$$E_1 = 1. \text{ cismin elastik modülü (N/mm}^2) \quad E_2 = 2. \text{ cismin elastik modülü (N/mm}^2)$$

$$\tau_2 = \text{Poisson katsayısı}$$

$$P = F \text{ Uygulanan kuvvet (N)}$$

Genel olarak iki cismin teması halinde oluşan deformasyon değeri;





Şekil 2.6.1.4.2 :Ölçme Probu ile Ölçü Lokması Arasında Oluşan Temas Deformasyonu.

Malzeme	Elastik Modülü $E(10^4 \cdot \text{N/mm}^2)$	Poisson Katsayısı ν
Aluminyum	7.05	0.345
Tungsten Karbür	52.4-72.4	0.200÷0.280
Krom Karbürü	33.9	0.280
Çelik	21.0	0.291
Silis	7.29	0.170

Tablo 2.6.1.4.1: Metrolojide Kullanılan Bazı Malzemelerin Özellikleri

Örneğin 3 mm çapında çelik bir bilyanın 1 N kuvvet altında, alüminyumdan yapılmış düz bir parça üzerine uyguladığı temas deformasyonunun değeri ise:



$$D_1 = 3 \text{ mm}$$

$$D_2 = \infty$$

$$\tau_1 = 0.291 \quad E_1 = 210\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_2 = 0.345 \quad E_2 = 70\,500 \text{ N/mm}^2$$

$$P = 1 \text{ N}$$

$$\delta l = \frac{(3\pi)^{(2/3)}}{2} 1^{(2/3)} \left[\frac{1 - (0.291)^2}{210000\pi} + \frac{1 - (0.345)^2}{70500\pi} \right] \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{\infty} \right)^{1/3} \quad (2.6.1.4.7)$$

$$\delta l = 7.145 \times 10^{-6} \text{ [m]} \quad (2.6.1.4.8)$$

bulunur.

2.6.2 Ortam Sıcaklığının Etkisi ve Stabilizasyon Süresi

ISO ve OIML standartlarında ve bu kuruluşların aldıkları tavsiye kararlarında, ölçü lokmalarının muhafaza edilecekleri ve ölçülecekleri sıcaklığının değeri $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ olarak tespit etmiştir. Ölçme sisteminde ölçü lokmalarının sıcaklığı $\pm 0.02^\circ\text{C}$ lik bir kararlılığa sahip olması gerekir. Dolayısıyla, ölçü lokmalarının ölçüm öncesi ortam sıcaklığına ulaşmaları için belli bir süre bekletilmeleri gerekmektedir. $\pm 0.1^\circ\text{C}$ bir sıcaklık dengelemesi için masterların referans ortam koşullarında en az 4 saat bekletilmeleri gerekmektedir (Cameron,1977; Zastrogin,1992; Zelbstein,1980; Holmes et al. 1963). Bu çalışma kapsamında 15, 20, 25, 50, 100, 200, 300, 500, ve 1000 mm ölçü lokmalarının sıcaklık stabilizasyon süreleri ölçülmüştür. EK 6, Şekil E 6.1' den Şekil E 6.9'a kadar bu ölçümler ile ilgili deneysel sonuçların grafik gösterimleri sunulmuştur.

2.6.3 Sıcaklık Değişiminin Ölçü Lokmasının Uzama Katsayısı Üzerindeki Etkisi

Genellikle, ölçü lokmalarının uzama katsayısı sıcaklığın bir lineer fonksiyonu olarak kabul edilir. Burada kastedilen, ölçü lokmasının uzama katsayısı ile sıcaklık doğrudan bağlantılı olduğudur. Ölçümlerde, ölçü lokmalarının uzama katsayısının $15-25^\circ\text{C}$ derece aralığında sabit olması istenmektedir. Bu konuda yapılmış olan çalışmalarda uzama katsayısının sabit olmadığı ve sıcaklıkla değişim gösterdiği tespit edilmişti. Dolayısıyla ölçmenin gerçekleştiği 20°C de uzama katsayısının ve belirsizlik değerinin yüksek doğrulukla bilinmesi gerekir (Croarkin et al.,1979; Millea,1984; OILM,1980; Schatz,1981). Muhtelif malzemelerden yapılmış ölçü lokmalarının uzama katsayıları Tablo 2.6.3.1'de verilmiştir.

MALZEME	UZAMA KATSAYISI	BİRİM
ÇELİK	10.5 ÷ 12.5	10 ⁻⁶ [m/m K ⁻¹]
TUNGSTEN KARBÜR	5.5 ÷ 6	10 ⁻⁶ [m/m K ⁻¹]
KROM KARBÜR	8.3 ÷ 8.6	10 ⁻⁶ [m/m K ⁻¹]
ALUMİNYUM	23	10 ⁻⁶ [m/m K ⁻¹]

Tablo 2.6.3.1 : Çeşitli Malzemelerden Yapılmış Ölçü Lokmalarının Uzama Katsayıları

Bir "t" sıcaklık ortamında bulunan ölçü lokmasının boyutu;

$$L_t = L_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha \Delta t) \quad \Delta t = t - 20^\circ\text{C}$$

$$L_t - L_{20^\circ\text{C}} = \alpha \cdot \Delta t \cdot L_{20^\circ\text{C}} \text{ şeklinde ifade edilir:}$$

Örneğin 75 mm boyutunda ve $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ uzama katsayılı bir ölçü lokmasının, 75 mm'lik $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ uzama katsayılı bir referansla 22°C sıcaklık'ta karşılaştırıldığında sistematik hata;

$$\epsilon_s = \Delta \alpha \Delta t L = (10 - 12) 10^{-6} 75 \cdot 10^{-6} 2 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ } [\mu\text{m}] \quad (2.6.3.1)$$

değerindedir. Sıcaklığın etkisiyle ölçü lokmasında da oluşan boyut değişimi aşağıdaki ifade ile gösterilmektedir.

$$\delta L = \delta L_0 + \alpha L_n \delta t \quad (2.6.3.2)$$

δL ifadesinin değişim fonksiyonu δt cinsinden 1. dereceden bir polinom olup, δL ve δt 'nin istatistiksel analizi en küçük kareler metodu kullanılarak yapılmaktadır. Bu iki parametre yardımı ile α 'yı ve üzerindeki belirsizliği Forsythe polinomu kullanarak 15°C-25°C aralığında hesap edebilmiştir. Buradaki amaç α üzerindeki belirsizliği tespit etmek ve ölçü lokmalarının kullanım ortamında, uzama katsayısının sıcaklığa bağlı değişim fonksiyonunu tespit etmektir. 1988 yılında Fransa'da Laboratoire National D'Essais (LNE)'de yapılmış olan çalışmada, 500mm'lik bir ölçü lokmasını kullanarak 15°C-20°C aralığında sıcaklığı değiştirerek α nın değişimi incelenmiştir.



Forsythe polinomu,

$$\sum P_j(x_i)P_k(x_i)=0 \quad (2.3.6.3)$$

şeklinde "j" derecede bir polinom olsun ve $P_j(x)$ polinomları tüm deney y_i, x_i noktalarında $j \neq k$ olmak üzere ortogonalite şartını sağlayacak şekilde ifade edilmelidir. Bu matematiksel ifadeleri ortogonalite şartına uygun δt cinsinden bir matris olarak yazılabilir. "B" matrisinin yardımıyla polinomun Φ_j katsayılarını ve varyansını

$$\Phi_j = (B^T B)^{-1} B^T \delta l \quad (2.6.3.4)$$

$$V(\Phi) = \sigma^2 (B^T B)^{-1} \quad (2.6.3.5)$$

formülleri ile hesap edilebilir. Matrisel ifadeyi en küçük kareler metodu kullanarak ifade edildiğinde;

$$\Phi_j = \frac{\sum \delta l_i P_j(\delta t_i)}{\sum P_j^2(\delta t_i)} \quad (2.6.3.6)$$

$$V(\Phi) = \frac{\sigma^2}{\sum P_j^2(\delta t_i)} \quad (2.6.3.7)$$

olarak bulunur.

Forsythe metodu yardımı ile en küçük kareler yöntemi kullanarak ortogonal polinomları oluşturursak:

$$P_0(\delta t_i) = 1 \quad (2.6.3.8)$$

$$P_1(\delta t) = (\delta t_1 - \alpha_1) P_0(\delta t) \quad (2.6.3.9)$$

$$P_2(\delta t) = (\delta t_2 - \alpha_2) P_1(\delta t) - \beta_2 P_0(\delta t) \quad (2.6.3.10)$$

$$P_k(\delta t) = (\delta t_k - \alpha_k)P_{k-1}(\delta t) - \beta_k P_{k-2}(\delta t) \quad (2.6.3.11)$$

ifadesini elde edilir.

α_k ve β_k katsayılarının değerleri ise :

$$\alpha_{j+1} = \frac{\sum x_i [P_j(\delta t_i)]^2}{\sum [P_j(\delta t_i)]^2} \quad (2.6.3.12)$$

$$\beta_{j+1} = \frac{\sum [P_j(\delta t_i)]^2}{\sum [P_{j-1}(\delta t_i)]^2} \quad (2.6.3.13)$$

olarak ifade edilir.

Deneyssel olarak tespit edilen δl ve δt (EK7, Tablo E 7.1) ikilisinin yardımı ile $\alpha_i, \beta_i, \phi_i$ katsayıları hesap edilebilir (Tablo E 7.2 ve Tablo E 7.3'te $\alpha_i, \beta_i, \phi_i$ katsayıları ve standart sapma değerleri verilmiştir).

Forsythe polinomuna uygun olarak δl ifadesi yazıldığında;

$$\delta l = \phi_0(\delta t) + \phi_1 P_1(\delta t) = \phi_0 - \alpha_1 \phi_1 + \phi_1 \delta t \quad (2.6.3.14)$$

burada :

$$P_0(\delta t) = 1 \quad (2.6.3.15)$$

ve

$$P_1(\delta t) = \delta t - \alpha_1 \quad (2.6.3.16)$$

olarak alınmıştır. δl 'nin başlangıç ifadesine dönersek

$$\delta l = \phi_0 - \alpha \phi_1 \quad (2.6.3.17)$$

ve

$$\alpha l_n \delta t = \Phi \delta t \quad (2.6.3.18)$$

sonucu elde edilir.

Bu durumda ölçü lokmasının $15^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında lineer uzama katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\alpha = \frac{\phi_1}{l_n} \quad (2.6.3.19)$$

α lineer uzama katsayısının standard sapması ise:

$$S(\alpha) = \frac{S(\phi_1)}{l_n} \quad (2.6.3.20)$$

dır.

Bu çalışma kapsamında nominal boyutu 500 mm'lik bir ölçü lokması ile yapılan ölçümler neticesinde, uzama katsayısı ve bunun üzerindeki standart sapma değeri;

$\alpha = 10.99599 \cdot 10^{-6} \text{ [mm}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{]}$, $S(\alpha) = 1.3 \cdot 10^{-8} \text{ [mm}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{]}$ olarak belirlendi.

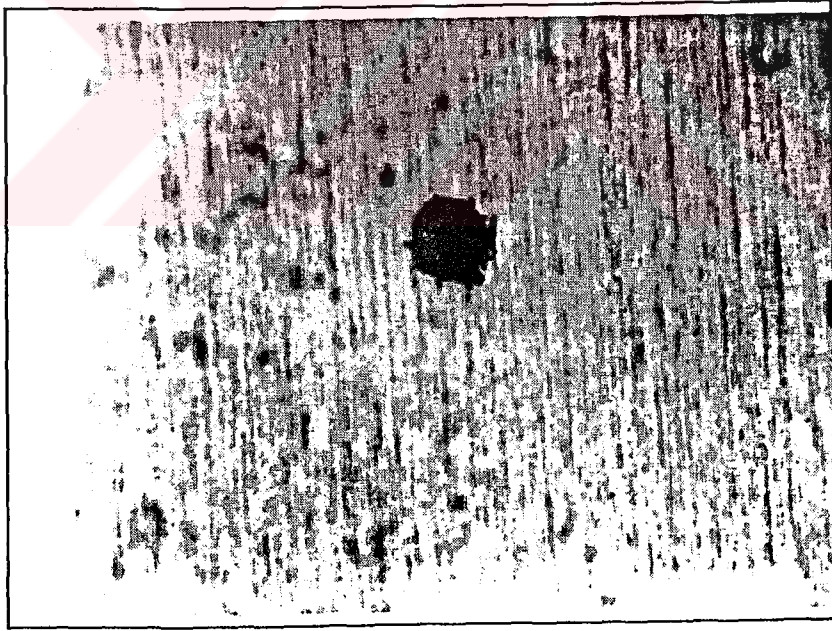
Bu değer, % 99 güvenilirlik seviyesi, 19 serbestlik derecesi ve $t = 2.539$ Student dağılımına göre hesaplanmıştır.



2.6.4 Ölçü Lokmalarının Yüzey Durumu ve Yüzey Kalitesi

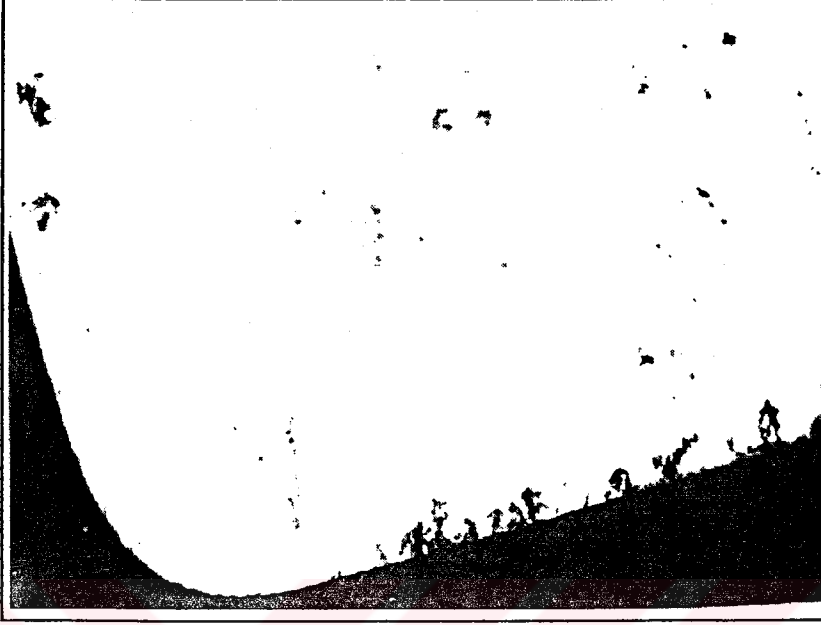
Metroloji laboratuvarlarında bulunan referans ve transfer ölçü lokmalarının uzunluğu: "ISO 3650 standardına göre ayna yüzey kalitesinde, paralel iki yüzey arasındaki mesafe" olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla ölçü lokmalarının yüzey kalitesi ölçü lokmalarının kalibrasyonunda önemli bir hata kaynağı oluşturur. Enterferometrik olarak kalibre edilen ölçü lokmaları optik kalitede bir yüzeye sahip olmalıdır. "00", "K" sınıfında bulunan ölçü lokmalarının yüzey kalite değeri $R_a \leq 0.001 \mu m$ olmalıdır. Elektromekanik komparatör ile kalibre edilen ölçü lokmalarında ise bu değer yaklaşık olarak $R_a \leq 0.0012 \mu m$ 'i aşmamalıdır. Muhtelif yüzey bozukluklarına yol açan durumlar aşağıda sıralanmıştır;

- Yanlış kullanım,
- Uygun olmayan malzemelerle temizlemek,
- Laboratuvar ortam koşulları,
- Elektro-Mekanik komparatör ile yapılan ölçümlerde temas kuvvetlerinden dolayı ölçü lokmaları yüzeylerinde derin çizikler, korozyon izleri, deforme bölgeler gibi yüzey bozuklukları oluşmaktadır (Birch,1979; Böhme,1980; Hewitt,1984; Puttock,1984; Seino,1980).



Şekil 2.6.4.1 : Ölçme Probenun, Ölçü Lokması Yüzeyine Zamanla Oluşturduğu Temas Deformasyon İzi (x400 Kat Büyütme)

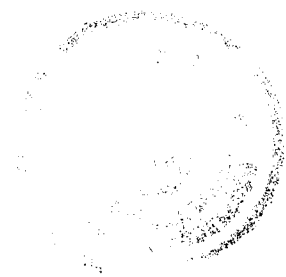


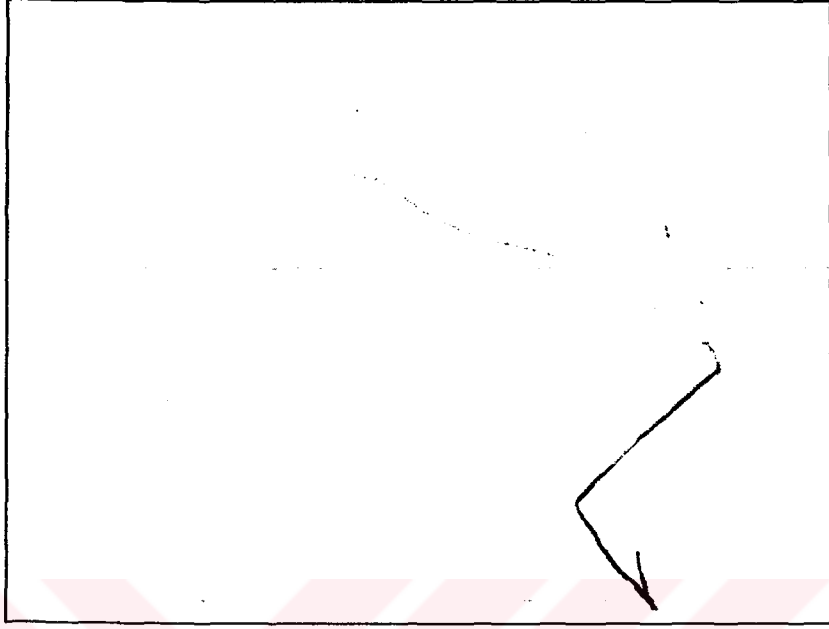


Şekil 2.6.4.2 : İyi Temizlenmemiş ve Uygun Olmayan Ortam Koşullarından Dolayı Oluşan Korozyon İzleri(x 116 Kat Büyütme)

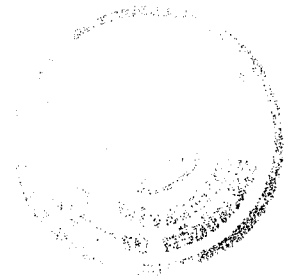


Şekil 2.6.4.3 : Temizlik Malzemelerinin Oluşturduğu Leke ve Korozyon İzleri(x116 Kat Büyütme)





Şekil 2.6.4.4 : Ölçü Lokması Yüzeyinde Kötü Kullanımdan Dolayı Oluşmuş Çizikler (x116 Kat Büyütme).



2.7 ÖLÇME BELİRSİZLİĞİ

Ölçme belirsizliği, ölçülen büyüklüğün gerçek değerinin içinde bulunduğu, değerlerin bir bölgesini tanımlayan ve ölçüm sonucunun doğruluğunu karakterize eden bir parametredir. Bilinen bütün sistematik ve rastgele hatalar için yapılan düzeltmelerden sonra bu belirsizlik elde edilir. Ölçmeye tabi olan bütün fiziksel büyüklüklerin ölçüm sonucu, sistematik ve rastgele olan etki faktörlerinin etkisi ile gerçek değerleri ölçülememektedir. Ölçüm sonucuna etkiyen büyüklüklerin ölçülen büyüklükteki katkılarını mutlak olarak belirlemek mümkün değildir. Etki faktörlerinin büyüklüğünün değeri, tekrarlı ölçümler, istatistik yöntem ve deneyimlerle tespit edilmektedir. Yani, ölçülen Y büyüklüğü X_i etki büyüklüklerine bağlı bir G fonksiyonu olarak gösterilir.

$$Y=G(X_1, X_2, \dots, X_p, \dots, X_n) \quad (2.7.1)$$

Bir ölçme işlemi için toplam belirsizlik, bütün belirsizlik kaynaklarına karşılık gelen varyans değerleri, hesaplama ve tahmin yöntemlerini içermelidir. Ayrıca her ölçme işleminde G fonksiyonuna uygun olarak belirsizliğin hesap edilmesi için ölçüm metoduna uygun olarak bir matematiksel modelin geliştirilmesi gerekmektedir. Genelde belirsizlik değerleri ölçüm ile ilgili standart sapma (σ), varyans (σ^2), bağıl varyans (σ^2) ve bağıl standart sapma (σ) değeri gibi parametrelerle ifade edilmektedir. Belirsizlik değerinin hesap edilmesinde ölçüm sonuçlarının istatistiksel dağılımı da (Gaussian, Kare, Student, Üçgen, Dikdörtgen) ayrıca önem taşır (ISO,1992; PAU,1978).

Bu bölümde belirsizlik hesabı ile ilgili temel kavramlara açıklık getirilecek ve bu çalışmada, ortamın ve ölçü lokmalarının sıcaklık ölçümünde kullanılan T tipi ısılıçflerin kullanıldığı ölçümlerdeki belirsizlik hesabı ve ölçü lokmaların ölçümü sırasında etki faktörlerinden kaynaklanan belirsizlik değerlerinin hesap yöntemi anlatılacaktır.

2.7.1 Enterferometrik Ölçümlerde Ortam Sıcaklığının Ölçülmesi ve Ölçüm Belirsizliğinin Hesaplanması

Enterferometrik ölçümlerde, ortam ve ölçü lokmalarının sıcaklığının yüksek doğrulukla ölçülmesi gerektiğinden, ölçümlerde kullanılan termometrelerin yüksek hassasiyetle sıcaklık ölçmeleri şarttır. Ayrıca ölçülen değerin yanısıra bu değere ait belirsizlik değerinin de bilinmesi gerekir. Enterferometrelerde kullanılan sıcaklık ölçerlerinin, ulusal referanslara izlenebilir ve kalibreli olmaları gerekmektedir. Genel olarak termometre kalibrasyonu, önceden tespit edilmiş özel kontrollu koşullar altında gerçekleştirilir. Yani kalibrasyon işlemi göre sabit sıcaklık noktaları Uluslararası Sıcaklık Skalasını (ITS 90)'na kullanılarak gerçekleştirilmiş Ulusal Sıcaklık Skalasına izlenebilirliği sağlamalıdır. Bu çalışmada gerçekleştirilmiş

enterferometrik ölçümlerde kullanılan termometrelerin 0-28 °C derece aralığında, Suyun Üçlü Noktasında ve Galyumun Katılaşma Noktasında kalibre edilmeleri yeterlidir. Sıcaklık ölçümlerindeki belirsizlik kaynaklarını daha iyi ifade etmek için ölçümlerde kullanılmış olan T tipi ısılciftler (Thermocouple) 0-70°C derece aralığında kalibre edilmiştir. Enterferometrik ölçümlerde sıklıkla kullanılan termometre tipleri genellikle şunlardır;

1. Quartz civalı termometreler,
2. Platin dirençli termometreler,
3. T, J, K, tipi ısılciftler .

ITS 90'a göre, sabit sıcaklık noktaları arasında herhangi bir sıcaklık değeri (t_{90}) istendiğinde, sabit sıcaklık noktaları arasında interpolasyon yapılarak bulunur. Bunun yapılabilmesi için, sıcaklık ölçümlerinde özel referans değerlerine ve sapma fonksiyonlarına ihtiyaç vardır. Sadece sabit noktalarda ölçüm yapılıyorsa ve sadece bu noktalardaki sıcaklık önemli ise, ölçüm değerlerinin, $W(t_{90})$, W_{ref} değerinden ne kadar sapma yaptığını tespit etmek yeterlidir ($\Delta W = W_{ref} - W(t_{90})$). W_{ref} , $W(t_{90})$ değerleri sabit sıcaklık noktasında, sıcaklık birimini transferinde kullanılan Pt. dirençli termometrenin ITS 90'a göre direnç değeridir. Fakat uygulamada sabit noktalar arasındaki bir sıcaklık değeri bilinmek istendiğinde, sabit noktalar arasında interpolasyona da ihtiyaç vardır. Bunun yapılabilmesi için ITS 90'ın öngördüğü interpolasyon denklemleri kullanılır ve sabit noktalar için verilen referans değerleri (W_{ref}), kullanılarak kalibrasyonu yapılan her bir termometre için sapma fonksiyonu ve gerekli katsayılar hesaplanır. ısılciftlerin kalibrasyonu sırasında, sabit sıcaklık noktalarının belirsizlik değerleri, ölçüm teçhizatının belirsizliği ve bağlantı etkisi olarak ölçümü etkileyen faktörleri arasında sayabiliriz. Diğer önemli bir husus ise ölçüm sonucu üzerindeki belirsizlik değeridir. Ölçüm sonucunun belirsizliği, kalibre edilen ölçerin yeteneğini ve hassasiyetinin yanısıra ölçüm yöntemine de bağlıdır. Tespit edilen hatalar ile elde edilen ölçüm belirsizliği, sadece bir tahminden ibarettir.

Ölçüm ve kalibrasyonlarda iki tip belirsizlik vardır, bunlar;

A tipi belirsizlik,

B tipi belirsizlik,

A tipi belirsizlik; tekrarlı deneysel ölçümler sonucu tespit edilir ve standart sapma değeri yardımı ile hesaplanır. Belirsizlik değeri, güvenilirlik seviyesine bağlı olarak standart sapmanın bir oranı olarak alınır.

$$U_A = \frac{\sigma}{k} = \frac{1}{n-1} \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_{ort})^2}{k}} \quad (2.7.1.1)$$

B tipi belirsizlik ise, mevcut bilgiler (kalibrasyon sertifikası, önceki ölçüm bilgileri v.s.) ve deneyimler kullanılarak elde edilir. Sıcaklık ölçümünde kullanılan ısılciftlerin kalibrasyonundaki B tipi

belirsizlikler, elektriksel ölçüm sisteminden, sabit sıcaklık noktalarının saflık derecesine, termal temas, banyo kararlılığı, basınç etkileri, ısılcıftın ısı kapasitesi gibi parametreler etkisinden kaynaklanır. Her bir B tipi belirsizlik değeri BIPM'in yayınladığı ITS 90'a uygun olarak, dikdörtgen dağılım gösterdiğinden bu değerin 1/3'ü alınır (BNM,1990; Bonnier,1987; Bonnier,1990; ISO,1978; Lecollinet et al.,1991; Lecollinet,1989; Moser,1968; Thomas,1990).

Toplam standart belirsizlik, ölçümlerin A tipi ve B tipi standart belirsizlikleri birlikte değerlendirilerek ifade edilir ve toplam belirsizlik, bütün belirsizliklerin karelerinin toplamının kareköküne eşittir. B tipi belirsizliklerin toplam değeri;

$$U_B = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_i^2} \quad (2.7.1.2)$$

olarak ifade edilir. Bu durumda ölçümün toplam belirsizlik değeri ise;

$$U_T = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (2.7.1.3)$$

Genellikle belirsizlikler $2\sigma = \% 95$ güvenilirlik seviyesine göre verilirler. Genişletilmiş belirsizlik değeri ise; $U = kU_T$ olarak ifade edilir. Burada k %95 güvenilirlik seviyesi ve ölçüm sayısına göre belirsizlik genişletme katsayısı "k" istatistik cetvellerinden seçilir.

Isılcıftlar Şekil E 8.3'te gösterilmiş olan deney düzeneğinde 0- 70 °C aralığında Suyun Üçlü Noktası, Galyum Sabit Katılma noktası ve referans sıcaklık banyosunda kalibre edilmiştir. Isılcıft multimetreye bağlanarak her referans sıcaklık noktası için emf değerleri bilgisayar aracılığı ile okunduktan sonra, değerler T tipi ısılcıftlar için verilmiş olan referans emf değerleri ile karşılaştırılır. Isılcıftlar için kullanılan referans ve ölçülen emf değerlerinin yardımı ile oluşturulan polinomlar karşılaştırılır ve bu iki polinom arasındaki standart sapma değeri güvenilirlik seviyesine bağlı olarak A tipi belirsizlik olarak kabul edilir. Suyun Üçlü Noktası, Galyum Sabit Katılma noktası ve referans sıcaklık banyosu ile ilgili B tipi belirsizlik bütçesi tablo 2.7.1.1, 2.7.1.2 ve 2.7.1.3 te verilmiştir.

A Tipi Belirsizlik $U_A = 0.12$

B tipi Belirsizlik	Üst Limit $\Delta t(\text{mK})$	$U_i = \Delta t/3$ (mK)
B_1 : Suyun Üçlü Noktasının Belirsizliği	0.07	0.02
B_2 : Elektriksel Ölçüm Sisteminin Belirsizliği	0.15	0.05
B_3 : Hidrostatik Etkinin Belirsizliği	0.09	0.03
B_4 : Elektriksel Gürültü	0.015	0.005
B_5 : Elektriksel Joule Etkisi	0.03	0.01
B_6 : Isı Kaybı Etkisi	0.3	0.1
B_7 : Kimyasal Safılık	0.6	0.2
B_8 : Sabit Sıcaklık Platonun Tesbitindeki Belirsizlik	0.6	0.2
Toplam Belirsizlik $U = 0.32 \text{ mK}$		

Tablo 2.7.1.1 : Suyun Üçlü Noktasının Belirsizlik Bütçesi

A Tipi Belirsizlik $U_A = 0.2 \text{ (mK)}$

B tipi Belirsizlik	Üst Limit $\Delta t(\text{mK})$	$U_i = \Delta t/3$ (mK)
B_1 : Suyun Üçlü Noktasından Kaynaklanan Belirsizlik	0.63	0.21
B_2 : Elektriksel Ölçüm Sisteminin Belirsizliği	0.3	0.1
B_3 : Hidrostatik Etkinin Belirsizliği	0.02	0.007
B_4 : Elektriksel Gürültü	0.015	0.005
B_5 : Elektriksel Joule Etkisi	0.1	0.03
B_6 : Isı Kaybı Etkisi	0.5	0.17
B_7 : Kimyasal Safılık	1	0.33
B_8 : Sabit Sıcaklık Platonun Tesbitindeki Belirsizlik	0.2	0.07
B_9 : İç Gaz Basıncın Etkisi	0.05	0.017
Toplam Belirsizlik $U = 0.5 \text{ mK}$		

Tablo 2.7.1.2 : Galyum Sabit Sıcaklık Noktasının Belirsizlik Bütçesi

A Tipi Belirsizlik $U_A = 1 \text{ (mK)}$

B tipi Belirsizlik	Üst Limit $\Delta t \text{ (mK)}$	$U_i = \Delta t/3$ (mK)
B_1 : Elektriksel Ölçüm Sisteminin Belirsizliği	0.1	0.03
B_2 : Elektriksel Gürültü	0.15	0.05
B_3 : Elektriksel Joule Etkisi	0.1	0.03
B_4 : Isı Kaybı Etkisi	1	0.3
Toplam Belirsizlik $U = 1.2 \text{ mK}$		

Tablo 2.7.1.3 : Referans Sıcaklık Banyosunun Belirsizlik Bütçesi

Kalibre edilmiş olan T tipi ısılıçift için kalibrasyon sertifikasına her sıcaklık noktası için hesap edilen maksimum belirsizlik değerinin k ile çarpım değeri yazılır. Bu durumda T tipi ısılıçiftlerin maksimum genişletilmiş belirsizlik değeri ise $U_T = k \cdot U_{\max.} = 2 \cdot 1.2 = 2.4 \text{ mK}$ olarak alınır. Ortamın ve ölçü

lokmlarının sıcaklığının ölçümü sırasındaki belirsizlik değeri ise;

$$U_{\text{ölçüm}} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{ölçüm}}^2}{k} + U_{\text{ser.}}^2} = 33 \text{ mK} \quad \text{'dir.}$$

Sıcaklık ölçerlerin kalibrasyonu ile ilgili ölçüm sonuçları Şekil E 8.1, Şekil E 8.2 ve Tablo E 8.1'de sunulmuştur.

2.7.2 Ölçü Lokmalarının Belirsizliği

Ölçü lokmalarının kalibrasyonu sırasında sıcaklık, nem, basınç, uzama katsayısı etkisi, referans standardının etkisi v.s. gibi etkiler ölçüm sonucuna etki eden faktörlerdir. Ölçülen büyüklüğün gerçek değerini bulmak ve bu değere bağlı olan tahmini belirsizlik değerini ifade edebilmemiz için aşağıda ifade edilmiş olan ölçüm modeline uygun olarak hesaplama yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, Ç.F. enterferometresi kullanılarak referans ölçü lokmaları ile kalibre edilecek ölçü lokmaları karşılaştırılarak, aralarındaki fark ölçülmüştür. Bu durumda referans ve kalibre edilen ölçü lokması arasındaki fark ;

$$d=l(1+\alpha\theta)-l_s(1+\alpha_s\theta_s) \quad (2.7.2.1)$$

olarak verilir. 2.7.2.1 denkleminde kalibre edilecek ölçü lokmasının l değerini çıkartırsak, bu değeri aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$l=\frac{l_s(1+\alpha_s\theta_s)+d}{(1+\alpha\theta)} \quad (2.7.2.2)$$

ve bunu Taylor serisi ile ifade edildiğinde, l değeri;

$$l=l_s+d+l_s(\alpha_s\theta_s-\alpha\theta)+.... \quad (2.7.2.3)$$

bulunur.

Referans ölçü lokması ve kalibre edilen ölçü lokması arasındaki sıcaklık farkı $\delta\theta=\theta-\theta_s$ ve uzama katsayıları arasındaki farkı $\delta\alpha=\alpha-\alpha_s$ olarak ifade edersek 2.7.2.3 denklemi aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$l=G(l_s,d,\alpha_s,\theta,\delta\alpha,\delta\theta) \quad (2.7.2.4)$$

yani,

$$l=l_s+d-l_s(\delta\alpha\theta+\alpha_s\delta\theta) \quad (2.7.2.5)$$

olur.

Burada $\delta\theta$, $\delta\alpha$ farkları sıfır olarak kabul edilmiştir. Fakat gerçekte tahmini belirsizlik değerleri ise sıfırdan farklıdır. Ayrıca 2.7.2.5 denkleminde ifade edilmiş olan parametreler birbirinden bağımsız olarak kabul edilmiştir. Bu durumda ölçülen büyüklük üzerindeki standart sapma değeri, 2.7.1 denklemi ile ifade edilmiş Y fiziksel büyüklüğün Taylor açılımının ilk terimi ile ifade edilir (diğer yüksek derecedeki terimler çok küçük olduklarından ihmal edilmiştir) (ISO, 1992);

yani;

$$G(Y)=G(X_i)+\sum \frac{\partial G(X_i)}{\partial X_i}(Y-X_i)$$

$$G(Y)-G(X_i)=\sum \frac{\partial G(X_i)}{\partial X_i}(Y-X_i)$$

$$G(Y)-G(X_i)=U_T$$

$$Y-X_i=U(X_i)$$

Belirsizlik değerin vanyansı ise ;

$$U_T^2(Y)=\sum \left[\frac{\delta G(l_s, d, \alpha_s, \delta \alpha, \delta \theta)}{\delta X_i} \right]^2 U^2(X_i) \quad (2.7.2.6)$$

şeklinde ifade edilir.

Yukarıdaki ifadeyi 2.7.2.4 denkleminde uygulandığında ve $\delta \theta$, $\delta \alpha$ sıfır olarak kabulü yapılırsa toplam belirsizlik değeri vanyansı aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$U_T^2(l)=\beta_s^2 U^2(l_s)+\beta_d^2 U^2(d)+\beta_{\alpha_s}^2 U^2(\alpha_s)$$

$$+\beta_{\theta}^2 U^2(\theta)+\beta_{\delta \alpha}^2 U^2(\delta \alpha)+\beta_{\delta \theta}^2 U^2(\delta \theta)+..... \quad (2.7.2.7)$$

Burada β değerleri ;

$$\beta_s = \frac{\partial G}{\partial l_s} = 1 - (\delta\alpha \cdot \theta + \alpha_s \cdot \delta\theta) = 1$$

$$\beta_d = \frac{\partial G}{\partial d} = 1$$

$$\beta_{\alpha_s} = \frac{\partial G}{\partial \alpha_s} = -l_s \delta\alpha = 0$$

$$\beta_\theta = \frac{\partial G}{\partial \theta} = -l_s \delta\alpha = 0$$

$$\beta_{\delta\theta} = \frac{\partial G}{\partial \delta\theta} = -l_{\alpha_s}$$

hesaplanmış ve toplam tahmini belirsizlik bu durumda ;

$$U_T(l) = \sqrt{U^2(l_s) + U^2(d) + l_s^2 \theta^2 U_2^2(\delta\alpha) + l_s^2 U^2(\delta\theta)} \quad (2.7.2.8)$$

olarak ifade edilir.

2.7.2.1 Referans Uzunluk Standardının Belirsizliğinin Katkısı

Bu çalışmada referans olarak kullanılmış olan He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ stabilize lazerin kalibrasyon belirsizlik değeri, BIPM de elde edilen sonuçlara göre;

$$U_{Ref} = 0.1[pm]$$

ve belirsizlik değeri $k = 3$ için ;

$$U_{ref} = \frac{0.1}{3} = 0.03[pm] = 3 \cdot 10^{-8}[\mu m]$$

tespit edilmiştir.

2.7.2.2 Çift Frekans Lazerin Belirsizliğinin Katkısı

Ç.F lazerin belirsizlik değeri, referans He-Ne/¹²⁷I₂ stabilize lazerin belirsizlik değeri ve bölüm 2.3.2’de anlatılmış kalibrasyon yöntemine uygun olarak bu iki lazerin karşılaştırılması sonucu elde edilmiş ölçüm sonuçları üzerindeki belirsizlik değerinin karelerinin toplamalarının kareköküdür;

$$U_{CF} = \sqrt{U_{Ref}^2 + U_{TKR}^2} \quad (2.7.2.2.1)$$

$$U_{Ref} = 3 \cdot 10^{-8} [\mu m]$$

$$U_{TKR} = 1 \cdot 10^{-7} [\mu m]$$

2.7.2.3 Referans ve Kalibre Edilen Ölçü Lokmaları Arasındaki Farkın Belirsizliğinin Katkısı

Ölçü lokmalarının l ve l_s değerleri 5 defa tekrarlanan 20 bağımsız ölçüm sonucu elde edilmişlerdir. Yapılan ölçümler ve bu ölçümlerin aritmetik ortalamasından elde edilen $U(d_0)$ belirsizlik değeri ise;

$$U(d_0) = \frac{\sigma(d_0)}{\sqrt{5}} \quad (2.7.2.3.1)$$

dir.

Ölçme düzeneğinde kullanılan Ç.F. lazerin tekrarlı ölçümler sonucu tespit edilmiş olan rastgele hata değerinin, % 95 güvenirlilik aralığında ve Student dağılımına göre $0.01 \mu m$ ’yi aşmadığı gözlenmiştir. Bu değer enterferometrik olarak kalibre edilmiş 50 mm lik ölçü lokması 6 defa ölçülerek tespit edilmiştir. Student dağılımına göre, t değeri 2.57 dir.

$$U(d_1) = \frac{0.01}{t} = \frac{0.01}{2.57} = 4 [nm] \quad (2.7.2.3.2)$$

Ölçme düzeneğinin ölçüm sonuçlarındaki tekrarlanabilirlik hatası 3σ aralığı için;

$$U(d_2) = \frac{0.01}{3} = 0.003 (\mu m) \quad (2.7.2.3.3)$$

dir. Bu durumda referans ve kalibre edilen ölçü lokmaları arasındaki farktan kaynaklanan toplam belirsizlik değeri;

$$U(d) = \sqrt{U^2(d_0) + U^2(d_1) + U^2(d_2)} \quad (2.7.2.3.4)$$

bulunur.

2.7.2.4 Ölçü Lokmalarının Uzama Katsayısının Farklılığından Kaynaklanan Belirsizliğin Katkısı

Referans ve kalibre edilen ölçü lokmalarının sertifikalarında uzama katsayısı $11 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ değerindedir ve toleransı $\pm 1 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ olarak belirtilmiştir. Uzama katsayısı üzerindeki belirsizlik değeri ise;

$$U(\alpha_s) = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 0.6 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (2.7.2.4.1)$$

olarak ifade edilmektedir.

2.7.2.5 Ölçü Lokmalarının Sıcaklık Farkından Dolayı Kaynaklanan Belirsizlik

Ölçümler, ölçü lokmaları standart referans sıcaklık değeri olan 20°C 'ta gerçekleştirilmiştir. Fakat ölçümler sırasında ortam sıcaklığının değişiminden dolayı ölçü lokmalarında $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 'lık bir değişim gözlenmiştir. Bu değer üzerindeki belirsizlik ise ;

$$U(\delta\theta) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.07 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.7.2.5.1)$$

Sıcaklık değeri üzerindeki belirsizlikten dolayı, ölçü lokmasında oluşan belirsizlik, aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$U(\delta\alpha, \delta\theta) = \sqrt{l^2 \theta^2 U(\delta\alpha)^2 + l^2 \alpha^2 U(\delta\theta)^2} \quad (2.7.2.5.2)$$

2.7.2.4 Ölçü Lokmalarının Genişletilmiş Belirsizlik Değeri

Ölçü lokmalarının genişletilmiş belirsizlik değeri, $U_{99} = k_{99} U_c(l)$ %99 güvenirlik seviyesinde

ve yapılan ölçüm tekrar sayısının serbestlik derecesine göre hesap edilmiştir. Yapılan ölçümlerin efektif toplam serbestlik derecesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$v_{eff}(l) = \frac{[U^2(d_0) + U^2(d_1) + U^2(d_2) + \dots]^2}{\frac{U^4(d_0)}{v(d_0)} + \frac{U^4(d_1)}{v(d_1)} + \frac{U^4(d_2)}{v(d_2)} + \dots} \quad (2.7.2.4)$$

Tespit edilen bu değer yardımı ile student dağılım tablosundan %99 güvenirlik seviyesine uygun olarak k_{99} tablolardan seçilir.

2.8 Uzunluk ve Boyutsal Metroloji Laboratuvarlarının Ortam Şartları

Ölçmeye tabi tüm fiziksel büyüklükler çeşitli nedenlerden dolayı ölçme esnasında bir ölçme hatasını da beraberinde taşımaktadır. Ölçme hatasına sebebiyet veren etki faktörleri, ölçmenin gerçekleştirildiği ortam ile dış ortam koşulları kontrol edilerek azaltılabilir. Metroloji laboratuvarlarında, ölçmeye tabi olan fiziksel büyüklüğün ölçülmesi ve bu büyüklüğün ölçülmesinde kullanılan teçhizatın doğru ve hassas çalışabilmesi için, kontrollü ortam koşulları sağlanması zorunludur. Metroloji laboratuvarlarında, iç ve dış ortamın, ölçüm sonuçlarına etkileri kolayca ifade edilememektedir. Ancak, ölçümleri etkileyen iç ve dış ortam koşulları, tanımlanmış limitler içinde tutulduğunda, amaçlanan hassasiyete ulaşılabilir. Her ölçme ve kalibrasyon faaliyeti için, ölçümlerin gerçekleştirilmesi, farklı çevre ve iklimlendirme koşullarına ihtiyaç göstermektedir. Dolayısıyla metroloji laboratuvarlarında, her fiziksel büyüklük için, dış ve iç çevre şartları ile iklimlendirme koşulları tespit edilmelidir. Laboratuvar sıcaklık değeri ve değişimi, atmosferik basınç, şartlandırılmış hava'nın parametreleri (hızı, değişim devir sayısı, kalitesi, nem miktarı, toz v.s.), gürültü ve zemin titreşimleri, radyasyon, elektrik besleme hattındaki voltaj değişimleri, manyetik alan etkileri, düşük frekans ve radyoelektrik yayınlar gibi faktörler uzunluk ve boyutsal metroloji laboratuvarlarının projelendirme safhasından itibaren dikkate alınmalıdır. İklimlendirme sisteminde, yalnızca sıcaklık parametresini sabit tutmak yeterli değildir. Laboratuvar iklimlendirme sistemlerinde; nem, hava üfleme hızı, ortamın atmosferik basıncı, havanın kalitesi (CO_2 , CO , O_2 , H_2S miktarı) gibi etkenler ölçüm ortamını etkilemektedir. Örneğin, üflenmiş hava ile laboratuvarında bulunan hava arasındaki sıcaklık farkı üflenmiş havanın debisine, hızına ve havanın nemine bağlı olarak kontrol edilir.

EK 9, Şekil E 9.1'de UME boyutsal metroloji laboratuvarının iklimlendirme sisteminin şematik gösterimi verilmektedir. Ancak her seviyede metroloji laboratuvarlarının iklimlendirme sistemleri, hedeflenen ölçüm belirsizliğine göre ve maliyet faktörü dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Başka bir ifade ile mikrometre, kumpas, mehengir gibi teçhizatları kalibre etmek için bu tipteki bir iklimlendirme sistemi gereksizdir.

Boyutsal ölçme teçhizatları imal eden bir işletmede ise imal edilen teçhizatın metrolojik karakteristiklerini ve öngörölmüş kaliteyi temin etmek için hassas metrolojik ortam şartlarına gereksinim vardır. Tablo 2.8.1 de örnek olarak birincil seviye bir uzunluk ve boyutsal metroloji laboratuvarında sağlanması gereken ortam koşulları özetlenmiştir (Bilgiç ve diğerleri; Katoh et al.,1978; Millea,1980; Zelbstein,1980).

Etki Büyüklüğü	Değeri	Tolerans	Notlar
Sıcaklık	20°C	± 0.5°C	Saat'te max. Değişim ≤ ±0.1°C
Nem	%45 Rh	%10	-
Basınç	+500 Pa	± 50 Pa	$P_{lab} = P_{at} + 500$
Akustik Gürültü	≤ 60 dB	± 5 dB	20-9600 Hz. Aralığında
Titreşim	≤ 50 nm	±10 nm	Titreşimin Genliği 200 Hz'te Cihaz Tabanında
Tozsuzluk	≤cl 100000	± % 10	E9 Hava Filtresi
Aydınlatma	20W/m²	± % 5	Soft Light Işık Kaynakları
Manyetik Alan	≤ 200 µT	± % 10	Ölçü Lokması İçin
Manyetik Alan	$2 \cdot 10^{-4}$ T	≤ % 1	Laboratuvar Ortamı İçin
Elektrik Besleme	220 ve 380V	± % 1	UPS ve RF Filtre
τ Harmonik Distorsiyon	≤ % 3	± % 1	-

Tablo 2.8.1 : Uzunluk ve Boyutsal Metroloji Laboratuvarlarının Ortam Koşulları

Bu çalışma sırasında, ölçü lokmalarının kalibrasyon düzeneğinin yerleştirildiği mermer masanın titreşim seviyeleri ölçülmüştür. Buradaki amaç titreşim seviyesinin müsaade edilen sınırlar içinde olup olmadığının kontrol etmektir. Bu ölçümlerin bir diğer amacı ise hafta içinde laboratuvarları iklimlendiren klima sistemi çalıştığından bina titreşim genliklerinde farklılık olup olmadığını gözlemektir. Laboratuvarda yapılmış olan ölçümlerde titreşimlerin ivme ve frekans değerleri tespit edilmiştir. Titreşimlerin genlik değerleri ise aşağıdaki ifadelere göre hesap edilmiştir.

$$a = \omega^2 \cdot d \quad (2.8.1)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.8.2)$$

$$d = \frac{a}{\omega^2} = \frac{a}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2} \quad (2.8.3)$$

" Hafta içi " yapılmış olan ölçümlerde, kaydedilen maksimum ivmelenme değeri, 32 Hz 'te $310 \mu\text{m/s}^2$ 'lık bir değer ölçülmüştür. Buda $7.7 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ lik bir yer değiştirmeye (d) tekabül etmektedir. Titreşim genliğinin RMS değeri ise $5.42 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ dir. " Hafta sonunda " yapılmış olan ölçümlerde ise kaydedilen maksimum ivmelenme değeri ise 38 Hz 'te $98 \mu\text{m/s}^2$ 'dir. Buda $2.2 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ lik bir yer değiştirmeye tekabül etmektedir. Titreşim genlik değerinin RMS değeri ise $1.555 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ dir. Bu değerler müsaade edilen sınırlar içinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Titreşim ölçümleri ile ilgili grafik gösterimler EK 13, Şekil E 13.1 ve Şekil E 13.2'de sunulmuştur.



BÖLÜM III

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 GİRİŞ

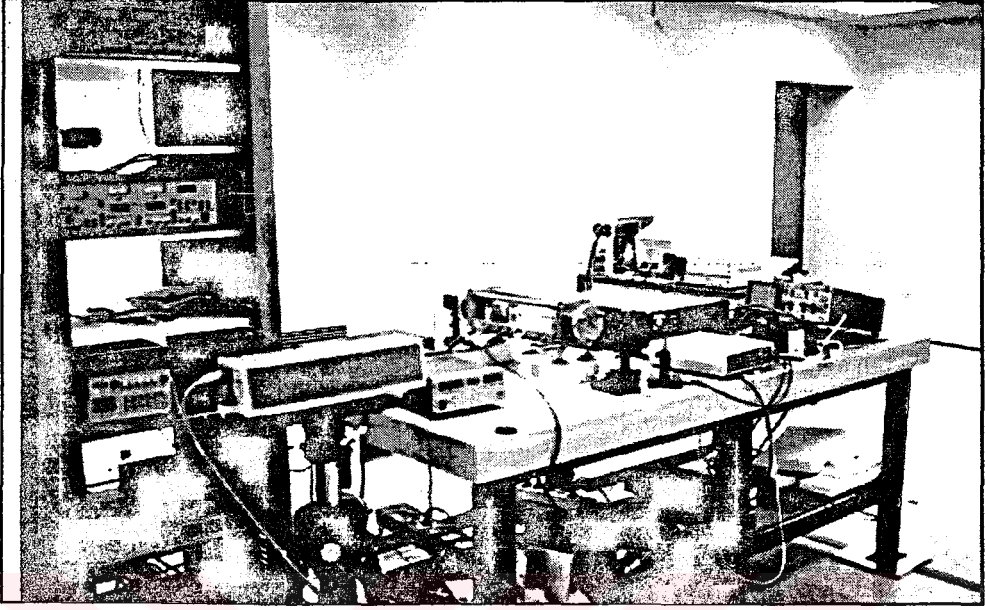
Bu bölümde, çalışmanın konusu olan " Uzunluk Biriminin Birincil Ulusal Referans Standardından Sanayiye Transferi ve Ç.F. Lazer Enterferometresi İle Ölçü Lokmalarının Kalibrasyonunun Metodik Çözümü " için izlenebilirliğin sağlanmasına yönelik olarak; ölçü lokmalarının kalibrasyonunda kullanılan Ç.F. lazer, ulusal referans olarak He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ stabilize lazer ile mukayese edilmiştir. Ç.F lazer'in kalibrasyonu yapılmış ve tespit edilen metrolojik karakteristikler benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca ölçü lokmalarının kalibrasyonu için geliştirilmiş yönteme uygun deney düzeneği kurularak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında önemli bir etki faktörü olan sıcaklık ölçümleri yapılmış, sıcaklık ölçümlerinde kullanılan ısı çiftlerinin ITS 90'a göre kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

3.1.1 Ölçü Lokmalarının Kalibrasyonunda Kullanılan Çift Frekans Lazerin Kalibrasyonu

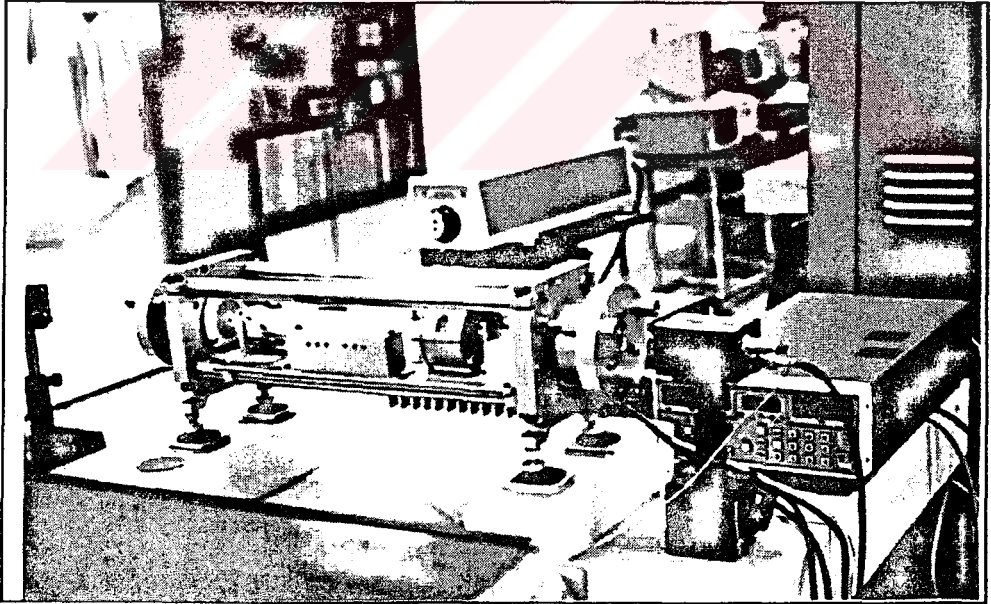
BIPM' in 1983 tarihinde aldığı karar üzerine uzunluk biriminin birincil referans standardının gerçekleştirme yöntemlerinden biri olan He-Ne / $^{127}\text{I}_2$ stabilize lazerden bir alt seviyeye uzunluk birimini transfer etmek için "Fark Frekans" ölçüm tekniği kullanılmaktadır. Bölüm 2.3.2'de belirtilmiş olan metoda uygun olarak kurulmuş olan deney düzeneğinde (Şekil 3.1.1.1 ve Şekil 3.1.1.2) Ulusal Uzunluk Referans Standart prototipi kullanılarak ölçü lokmalarının kalibrasyonunda kullanılan Ç.F. lazer, mukayese yöntemi ile kalibre edilmiştir. He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ stabilize lazerin frekansı, iyodun soğurma çizgilerinden bir tanesine kilitleyerek stabilize edilir ve bu frekanstaki dalga boyu referans olarak kabul edilir (Abramova et al.,1992; Allan,1966; Gill,1979; Glaser 1987; Gonella,1994; Hanes et al.,1969). Kalibre edilecek Çift Frekans lazer, deney düzeneğine yerleştirildikten sonra referans lazerin ve kalibre edilecek lazerin ışın demetleri frekans farkını ölçen fotodiyot üzerine düşürülür. Kalibre edilen lazerin dalga boyu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\lambda = \lambda_0 - \left(\frac{\lambda_0^2}{c} \right) \Delta \nu \quad (3.1.1.1)$$

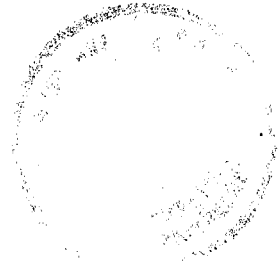
Frekans farkı ölçülerek, (3.1.1.1)' de belirtilmiş bağıntı ile lazerin dalga boyu tespit edilir. BIPM'de yapılmış olan çalışmalarda " i " soğurma çizgisinde stabilize edilmiş lazerin dalgaboyu $\lambda_0 = 632.9913981 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ fm}$ olarak ve 3σ için belirlenmiştir. Deneyde kullanılmış olan stabilize referans lazerin " i " soğurma çizgisindeki dalga boyu ise $\lambda_0 = 632.9913982 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ pm}$ olarak ve 2σ güvenilirlik ile belirlenmiştir.



Şekil 3.1.1.1 : Çift Frekans Lazerin, Ulusal Uzunluk Referansı ile Kalibrasyonu İçin Laboratuvarda Kurulan Deney Düzenegi



Şekil 3.1.1.2 : Çift Frekans Lazerin, Ulusal Uzunluk Referansı ile Kalibrasyonu İçin Laboratuvarda Kurulan Deney Düzenegi



3.1.2 Deney Prosedürü ve Sonuçları

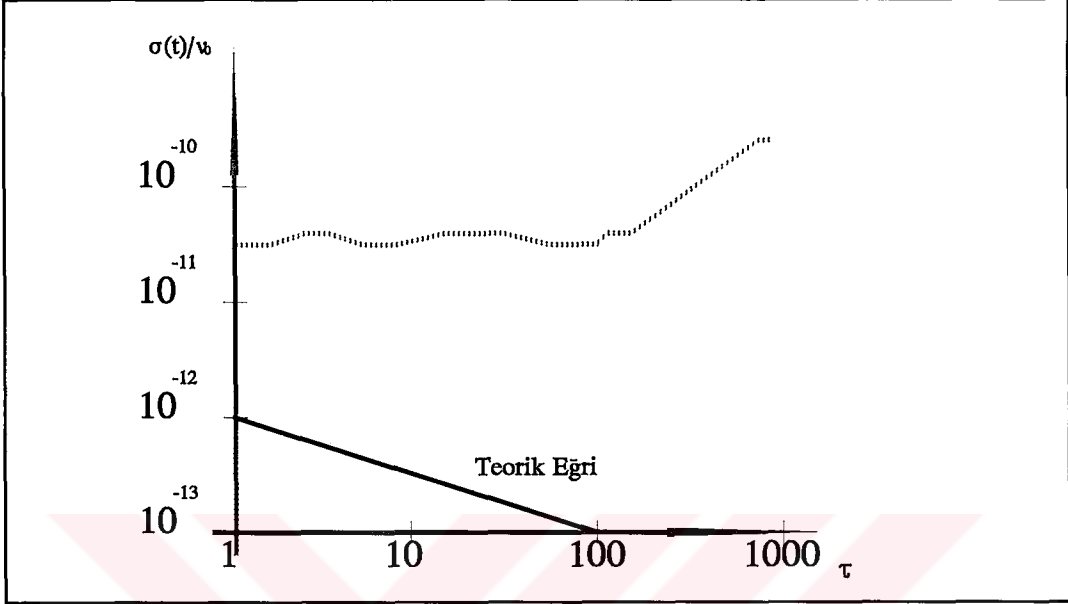
Referans He-Ne/¹²⁷I₂ stabilize lazer, Şekil 2.3.2.1, 3.1.1.1 ve 3.1.1.2 'de gösterilmiş olan deney düzeneği kurulduktan sonra Spektrum Analizör yardımı ile Şekil 3.1.2.3, 3.1.2.4 ve 3.1.2.6'da gösterilmiş şekiller elde edilinceye kadar referans lazerin mekanik ve elektronik kısımları ayarlanır. Daha sonra, sırayla " i, j ve g " soğurma çizgilerine kilitlenmiş olan referans lazer, kalibre edilecek Ç.F. lazerin dik ve yatay polarizasyon modlarının referans lazer'e göre olan frekans farkları ölçüldü. Ç.F. lazerin yatay ve dikey polarizasyonları arasındaki frekans farkı, bilgisayar destekli frekansmetreden frekans değerleri okunmuştur. Dikey ve yatay polarizasyon modları arasındaki fark 1.95-2 MHz arasında olmalıdır. Yapılmış olan ölçümler sonucunda bu değer 1.97 MHz olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.1.2.3'ten Şekil 3.1.2.6'ya kadar Referans lazerin ve Ç.F lazerin dikey ve yatay polarizasyon modlarının fark frekanslarının spektrum analizöründeki görünümünü vermektedir. Deneyin sonuçları ise Tablo 3.1.2.1'de verilmiştir.

	FREKANS FARKI (MHz)	ALLAN VARYANSI (kHz)	STD.SAPMA (kHz)	DALGA BOYU (nm)
L _R (i) - ÇF(v)	20.783 124	8	100	632.991 398
L _R (i) - ÇF(h)	18.810 386	4.97	254	632.991 373
L _R (j) - ÇF(v)	42.408 425	5.3	7.5	632.991 392
L _R (j) - ÇF(h)	40.418 415	45	53.8	632.991 375
L _R (g) - ÇF(v)	104.947 192	21	23	632.991 396
L _R (g) - ÇF(h)	102.974 454	24	26	632.991 374

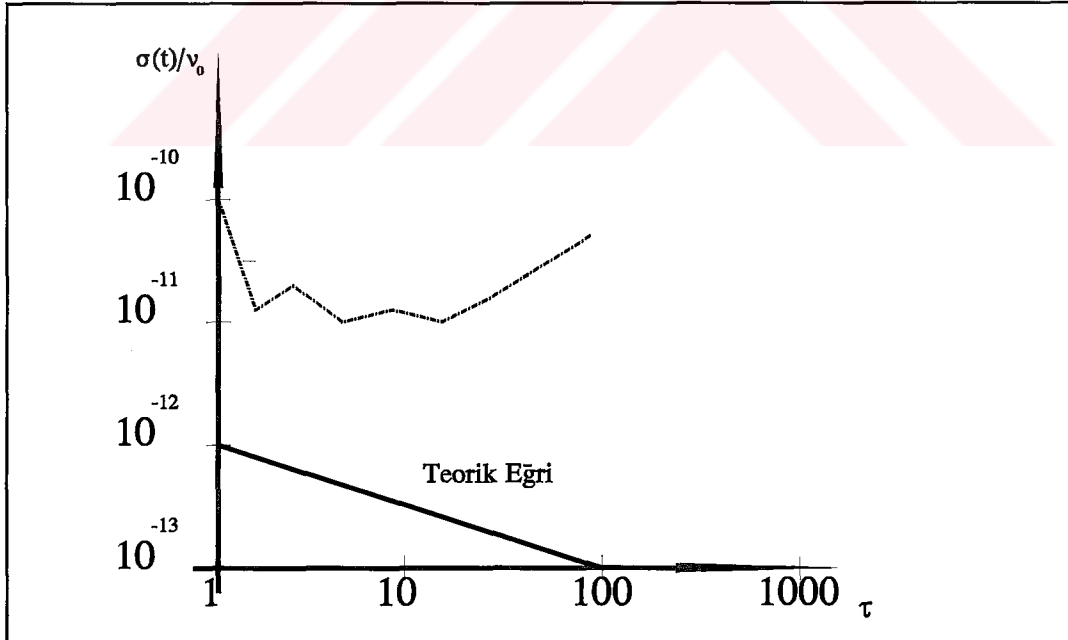
Tablo 3.1.2.1 : Fark Frekans Ölçüm Sonuçları

Deneyisel verilerin sonucu Ç.F. lazerin dikey polarizasyon modu için frekans değeri $\text{ÇF}_v = 473\,612\,235\,475\text{ MHz} \pm 200\text{ kHz}$, yatay polarizasyon modu için $\text{ÇF}_h = 473\,612\,233\,502.3\text{ MHz} \pm 508\text{ kHz}$ olarak 2σ için hesap edilmiştir. Dalga boyuna çevirildiğinde polarizasyon modlarının dalgaboyu uzunluğu $\text{ÇF}_v = 632.991398\text{ nm} \pm 1\text{ pm}$, $\text{ÇF}_h = 632.991398\text{ nm} \pm 1\text{ pm}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer normal laboratuvar ortam koşullarında tespit edilmiş değerdir. Normal ortam koşullarında ölçümler yapıldığında, havanın kırılma indisi ortam koşullarına göre değiştiğinden, dalga boyu değerinde düzeltme yapılması gerekmektedir. Ç.F lazer, ölçme sistemi içinde mevcut olan sıcaklık, nem ve basınç sensörlerinden aldığı sıcaklık, nem ve ortam basınç bilgilerini kullanarak havanın kırılma indisini otomatik olarak kendisi hesap edip düzeltmeleri yapmaktadır. Şekil 3.1.2.3 Ç.F. lazerin dikey polarizasyon modu ile "j" soğurma çizgisine kilitleyerek stabilize edilmiş referans lazerin fark frekansının spektrum analizöründeki görünümünü vermektedir. Aynı zamanda, sonuçların INM'de yapılmış benzer çalışma ile uyum içinde olduğunu görülmüştür. Şekil 3.1.2.1 ve Şekil 3.1.2.2, lazerlerin kararlılığının

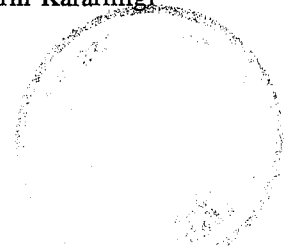
birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

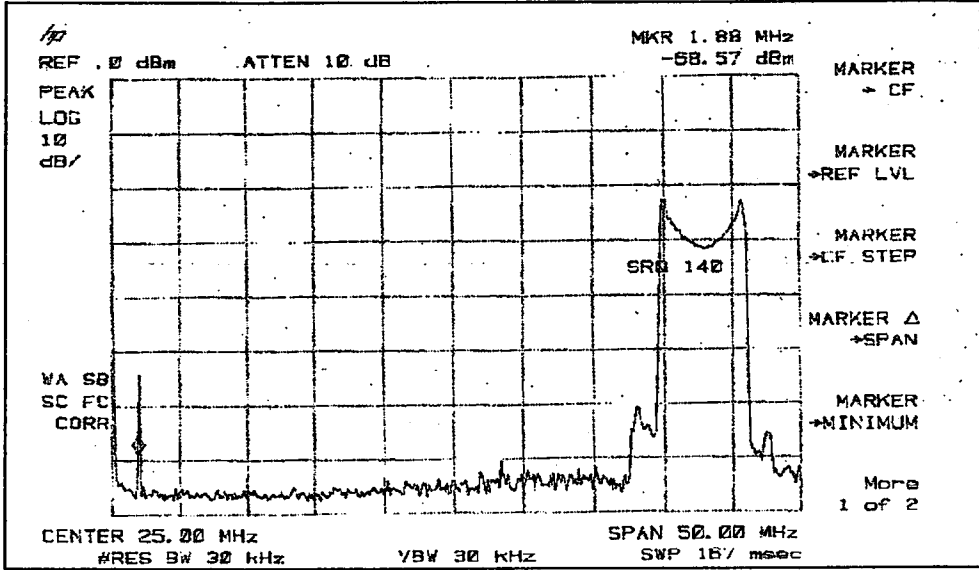


Şekil 3.1.2.1 . INM’de Kalibre Edilmiş Ç.F. Lazerin Bağıl Kararlılığı

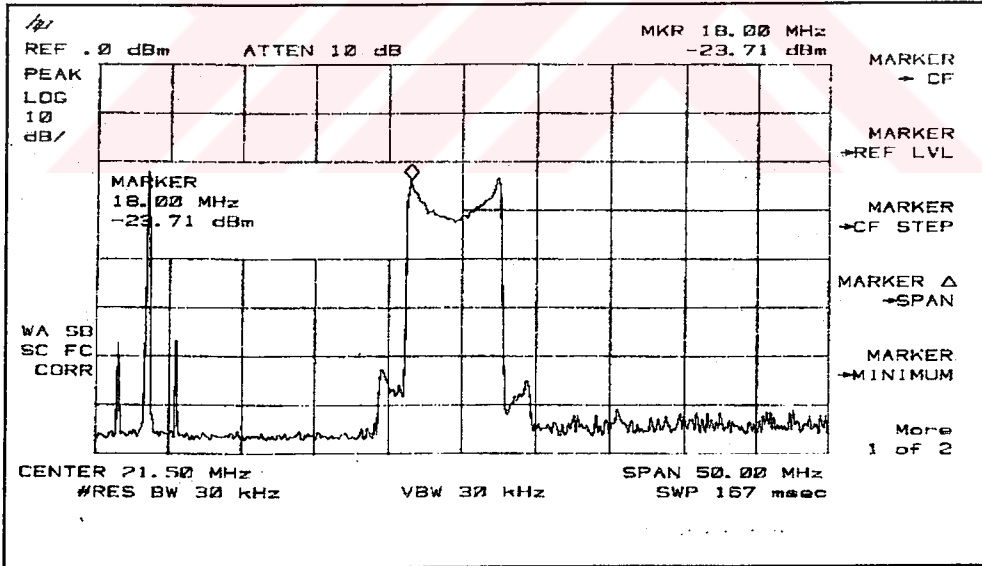


Şekil 3.1.2.2 : UME’de Kalibre Edilmiş Aynı Tip Lazerin Kararlılığı

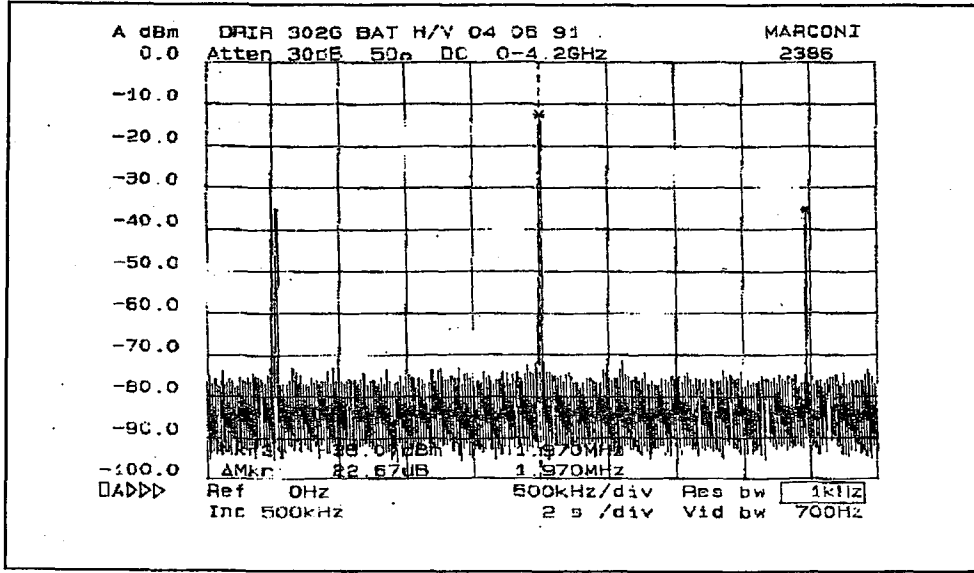




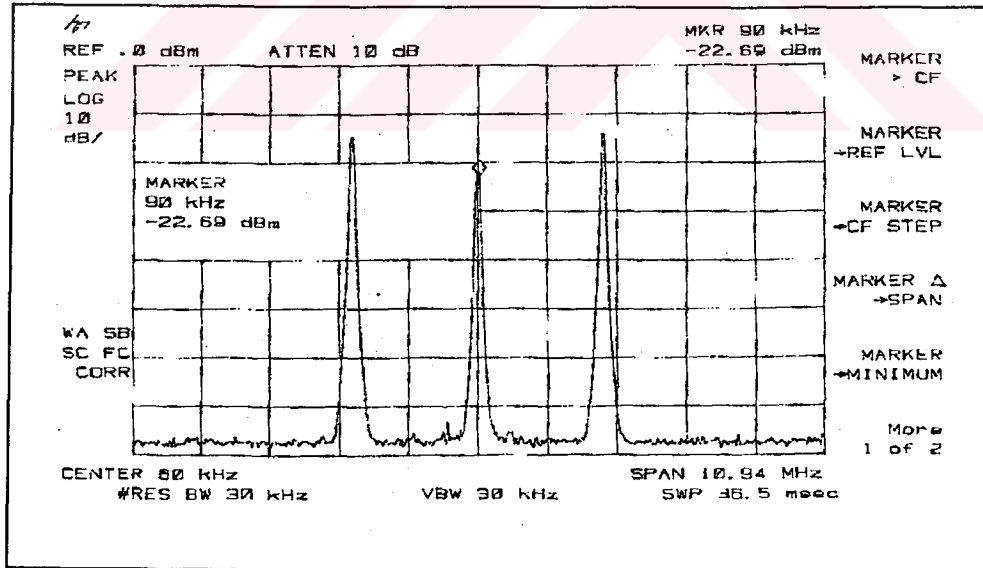
Şekil 3.1.2.3 : "j" Soğurma Çizgisine Stabilize Edilmiş Referans Lazerin ve Ç.F. Lazerin Dikey Polarizasyon Modu Arasındaki Girişim



Şekil 3.1.2.4 : "j" Soğurma Çizgisine Stabilize Edilmiş Referans Lazerin ve Ç.F. Lazerin Yatay Modu Arasındaki Girişim.



Şekil 3.1.2.5 : INM'de Kalibre Edilmiş Ç.F. Lazerin Dikey ve Yatay Polarizasyon Modlarının Girişimi.



Şekil 3.1.2.6 : UME'de Kalibre Edilmiş Ç.F. Lazerin Dikey ve Yatay Polarizasyon Modlarının Girişimi.

3.2 Ölçü Lokmalarının Kalibrasyonu

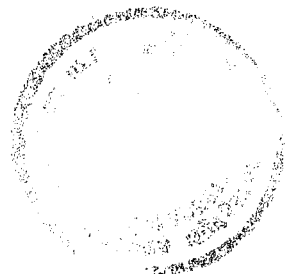
Sanayide kullanılan mekanik bir çok boyut ölçme cihazının (3DMM ölçüm makinaları, mehengir, kumpas, mikrometre v.s.) kalibrasyonu ölçü lokmaları vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir . Kalibrasyonda kullanılan ölçü lokmaları, doğruluk seviyelerine göre, bazen sanayi kuruluşunun referansı, bazen ikinci seviye bir metroloji laboratuvarının referansı, bazen bir ülkenin ulusal referansı olabilmektedir. Metroloji laboratuvarlarında kullanılan ölçü lokmaları, laboratuvarın beyan etmiş oldukları belirsizlik değerine göre ve ölçü lokmalarının sınıfına bağlı olarak enterferometrik veya Elektro-Mekanik komparatör ile kalibre edilebilmektedir. "00" ve "K" sınıfında bulunan bu tip ölçü lokmalarının kalibrasyonu hiyerarşik seviyesine bağlı olarak enterferometrik yöntemle yapılması gerekmektedir. Ancak klasik enterferometrelerin maliyetlerinin yüksek olması (yaklaşık 450 000 US\$) ve birincil seviye referans ölçü lokmalarının enterferometrik yöntem ile kalibrasyon ücretinin yaklaşık 5000 US\$ olması ve bu ölçü lokmalarının özel ortam koşullarında muhafaza edilmeleri gerektiğinden, araştırmacıları, ölçü lokmalarının kalibrasyonunu sağlayacak daha ucuz yöntem, metod ve cihaz arayışına sevk etmiştir.

Bu çalışma kapsamında ölçü lokmalarının Ç.F lazer enterferometresi kullanılarak kalibrasyon imkanı araştırılmış ve bu kapsamda bir matematiksel model geliştirilmiştir. Ayrıca 1988'den beri boyut değişimi incelenmekte olan 860703 numaralı ölçü lokma seti için minimum kalibrasyon periyodunu tespit etmek üzere bir model geliştirilmiştir.

Ölçü lokmalarının kalibrasyonunun yapıldığı deney düzeneği (Şek. 3.2.1) de gösterildiği gibi Ç.F lazer, 100 mm'lik hareketli bir tablaya sahip CCD kameralı bir mikroskop ve ölçüm süresince ölçü lokmasının sıcaklığını ölçen ısıcıftlerden oluşmaktadır. Mikroskobun hareketli tablası üzerine enterferometrenin hareketli kolunu oluşturan "retroreflektör" ve aynı tabla üzerine ölçü lokması yatay konumunda yerleştirilir. Daha sonra referans ölçü lokması ve kalibre edilecek ölçü lokması üzerinde her biri " 1 " sayıda iki ölçüm serisi gerçekleştirilir. Şekil 3.2.1'de gösterilen deney düzeneğinde, bir mikroskop, hareketli bir tabla ve lazer yardımı ile referans mastarın sağ ve sol yüzeyleri arasındaki mesafe ölçümü için, her bir ölçü lokması için 5 defa tekralanan 20 ölçüm yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçları aşağıda sunulmuş ve bu çalışma için geliştirilmiş matematik model yardımı ile değerlendirilmiştir;

$$L_{ell} - L_{erl} = l_e + \delta l_{el}$$

.....



$$L_{el2} - L_{er2} = l_e + \delta l_{e2}$$

.....

.....

$$L_{el3} - L_{er3} = l_e + \delta l_{e3}$$

.....

.....

.....

.....

.....

$$L_{eli} - L_{eri} = l_e + \delta l_{ei}$$

(3.2.1)

.....

.....

$$L_{eln} - L_{ern} = l_e + \delta l_{en}$$

Burada; L_{eli} ve L_{eri} , Lazerin göstergesinde okunan referans ölçü lokmasının sağ ve sol yüzeyleri arasındaki mesafe değeri,

l_e :Referans ölçü lokmasının gerçek değeri (sertifika değeri),

δl_{ei} :Referans ölçü lokmasının boyut sapma değerini gösterir.

Benzer şekilde kalibre edilecek ölçü lokması için aynı işlem tekrarlanır ve matematik model kalibre edilecek ölçü lokması için aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$L_{xl1} - L_{xr1} = l_x + \delta l_{x1}$$

.....

$$L_{xl2} - L_{xr2} = l_x + \delta l_{x2}$$

.....



$$L_{xli} - L_{xri} = l_x + \delta l_{xi}$$

.....

$$L_{xli} - L_{xri} = l_x + \delta l_{xi} \quad (3.2.2)$$

.....

$$L_{xli} - L_{xri} = l_x + \delta l_{xi}$$

Burada da ; L_{xli} ve L_{xri} , Lazerin göstergesinde okunan, kalibre edilecek ölçü lokmasının sağ ve sol yüzeyleri arasındaki mesafe değerini,

l_x : Kalibre edilecek ölçü lokmasının tesbit edilmesi istenen değeri,

δl_{xi} : Kalibre edilecek ölçü lokmasının boyut sapma değerini (tüm etki faktörlerini içermektedir) göstermektedir.

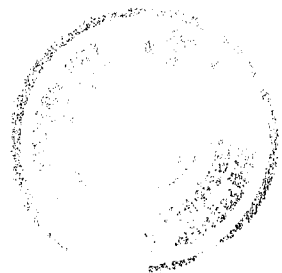
Yapılan "n" sayıda iki ölçüm serisi yardımı ile kalibre edilecek ölçü lokmasının l_x uzunluğunun gerçek değerini tespit edebiliriz. 3.2.1 numaralı ifadede, sistemin sağ ve sol kısımlarını toplar ve " n " ölçüm sayısına bölündüğünde, aşağıdaki denklem yazılabilir;

$$\sum \frac{(L_{eli} - L_{eri})}{n} = \sum \frac{\delta l_{en}}{n} \quad (3.2.3)$$

Aynı ifadeyi 3.2.2 numaralı denklem sistemi için de yazıldığında;

$$\sum \frac{(L_{xli} - L_{xri})}{n} = \sum \frac{\delta l_{xn}}{n} \quad (3.2.4)$$

denklemini elde edilir.

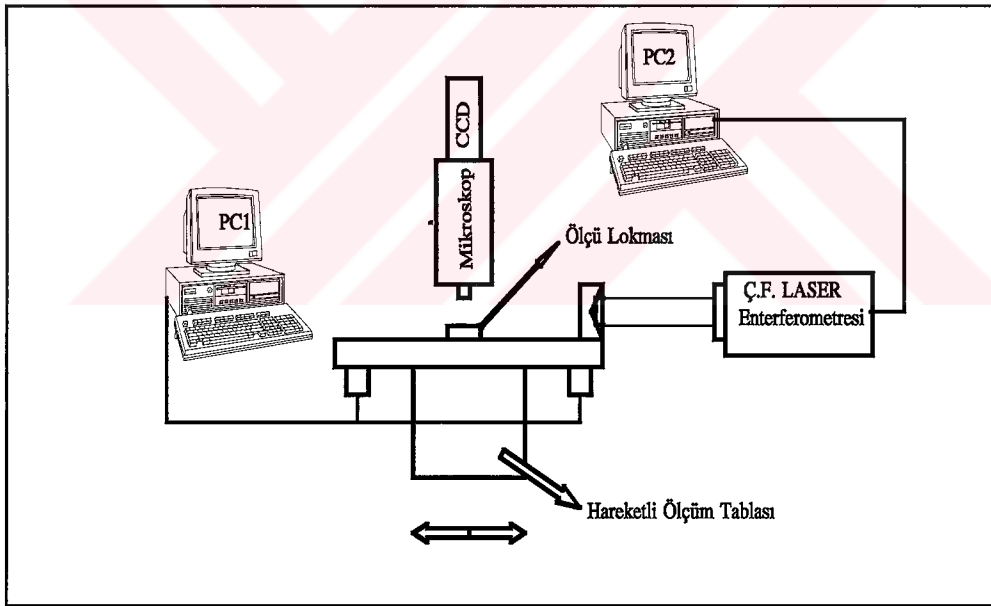


Bu yöntemle temel sistematik hatalar bertaraf edilmesi sağlanmıştır. Δ_i ikinci dereceden sistematik hatalarının ihmal edilebileceği düzeyde "n" ölçüm tekrar sayısını yeterince büyük alırsa ve δ_i rastgele hatalarını denklem sisteminde karşılıklı bertaraf edilirse, aşağıdaki ifade yazılabilir:

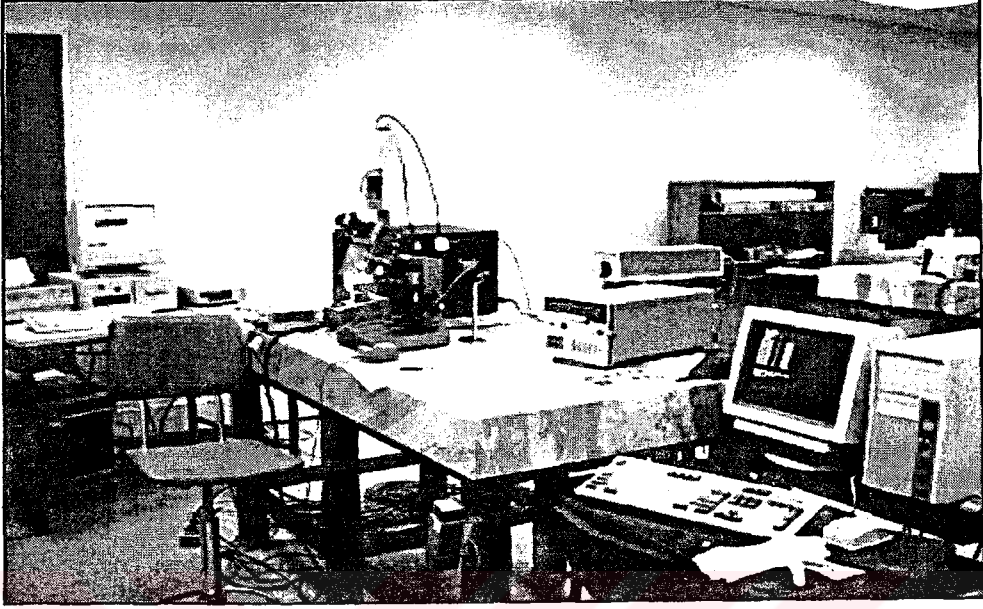
$$\sum \frac{L_{xli}}{n} \approx \sum \frac{L_{eli}}{n} \approx \sum \frac{(\Delta_i + \delta_i)}{n} \approx \sum \Delta_i \approx 0 \quad (3.2.5)$$

3.2.3 ve 3.2.4 numaralı denklemlerin yardımıyla ve Δ_i ile ilgili yapılan kabul çerçevesinde, kalibre edilecek ölçü lokmasının uzunluğu aşağıdaki gibi ifade edilir :

$$l_x = \left[\frac{\sum (L_{xli} - L_{xri})}{n} \right] - \left[\frac{\sum (L_{eli} - L_{eri})}{n} \right] + l_e \quad (3.2.6)$$



Şekil 3.2.1 : Ölçü Lokmalarının Kalibre Edildiği Ölçme Düzeninin Şematik Gösterim



Şekil 3.2.2 : Ölçü Lokmaları Kalibrasyonu İçin Laboratuvarda Kurulmuş Olan Ölçme Düzenegi

3.2.1 Ölçüm Sonuçlarının Düzeltilmesi

Bölüm 3.2’de belirtilmiş yöntem ile kalibre edilen ölçü lokmalarının ölçüm sonuçlarının, standart ortam koşullarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle 20°C derece sıcaklık, 101325 Pa atmosferik basınç, tozsuz ve titreşimsiz ortam koşulları gerçekleşmiyorsa, bu durumda ölçüm sonuçlarında düzeltmeler yapılması gerekmektedir. Ölçü lokmalarının uzunluğunu etkileyen düzeltme (D_i) faktörleri arasında sıcaklık düzeltmesi, basınç düzeltmesi, ölçü lokmasının yüzey kalitesi gibi etkenler gözönünde bulundurulmalıdır. Bu durumda düzeltilmiş ölçüm sonuçları aşağıdaki gibi ifadeye göre verilir:

$$L = L_m \pm \sum D_i \quad (3.2.1.1)$$

3.2.2 Sıcaklık Düzeltmesi

Kalibre edilecek ölçü lokmaları, temizlendikten sonra ölçümlerin yapıldığı ortamda en az 4 saat ısı dengeye gelmesi için bekletilmelidir. Ölçüm odasının sıcaklığı 20°C ve ölçüm esnasında sıcaklık değişim hızı saat başına ± 0.2 K’dan az olmalıdır. Ortamın ve ölçü lokmalarının sıcaklık değerleri ölçüm öncesi, ölçme esnasında ve ölçüm sonrası kaydedilir ve ölçü lokmasının L_m uzunluk değerine D_i düzeltmesi yapılarak ölçüm sonucu 20°C’deki değere indirgenir (Zelbinstein, 1980):

$$D_i = [\alpha(t-20) + \beta(t-20)]L_m \quad (3.2.2.1)$$

Burada; α lineer uzama katsayısı ve β ikinci dereceden lineer uzama katsayısıdır.

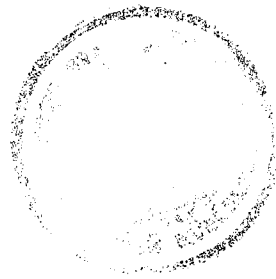
Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm sistemi sıcaklık etkisinden doğan farkları, lazere bağlı olan sıcaklık, nem ve basınç sensörleri aracılığı ile otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

3.2.3 Ölçüm Sonuçları

Kurulan ölçme düzeneğinde, "00" sınıfı D 11386 5mm, C 85379 10 mm , D 63285 15mm, C 68313 20mm, B 99494 25mm, B 64286 50mm'lik referans ölçü lokmaları ve " 0 " sınıfı 860703 numaralı setin 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm ve 50 mm'lik ölçü lokmaları kullanılmıştır. Bölüm 3.2 de belirtilen yöntemle göre gerçekleştirilmiş ölçümler, sıcaklık düzeltmeleri yapılarak sunulmuştur. Deney esnasında ölçümleri etkileyecek tüm etkenler kontrol altına alınarak, etkileri asgariye indirilmiştir. Ölçümlerin tekrarlanabilirliği ve çözünürlüğü ise $\pm 0.01 \mu\text{m}$ olup çevre koşullarının ölçümü otomatik olarak bilgisayar destekli yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Ek 11'de sunulmuştur.

3.2.3.1 Ölçüm Belirsizliği

Daha önce belirtildiği üzere ölçüm sonucu, ölçüm metoduna, ölçme ortam koşullarına ve ölçmede kullanılan ölçme teçhizatlarına ve ölçümü gerçekleştirene bağlıdır. Ancak ölçümleri etkileyen tüm faktörler ve bunların her birinin ölçüm sonuçları üzerindeki etkileri kolayca ifade edilememektedir. BIPM ölçüm sonuçlarını, A ve B tipi olarak iki gruba ayırarak uygulamada belli bir kolaylık sağlamıştır. Ölçüm sonucunun belirsizliği, ölçülen büyüklüğün kesin değerinin bilinmesindeki eksikliği yansıtır. Tespit edilen sistematik hataların düzeltilmesinden sonra ölçüm sonucu içinde bulunan A ve B tipi hatalardan dolayı ortaya çıkan belirsizlik değeri, sadece bir tahminden ibarettir. Bölüm 2.7.2'de anlatılmış olan belirsizlik hesap yöntemine uygun olarak, bu çalışmada ölçülen her bir ölçü lokması için belirsizlik değeri hesap edilmiştir. Belirsizlikle ilgili sonuçlar tablo 3.2.3.1.1'den 3.2.3.1.6'ya kadar tablolar halinde verilmiştir.



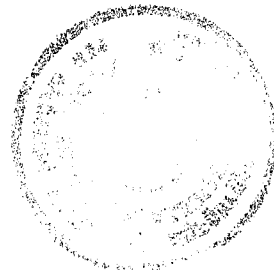
$U(X_i)$ Tipi	Belirsizlik Kaynakları	Belirsizlik Değeri (X_i) [nm]	β_i	$\frac{\partial G}{\partial X_i}$ [nm]	Serbestlik Derecesi
U_{Ref}	He-NE/ $^{127}\text{I}_2$ Lazerin Belirsizliği	$3 \cdot 10^{-5}$	1	$3 \cdot 10^{-5}$	19
U_{CF}	Çift Frekans Lazerin Belirsizliği	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$1 \cdot 10^{-4}$	19
$U(l_s)$	Referans Ölçü Lokmasının Belirsizliği	15	1	15	19
$U(d)$	Boyut Farkı	8.2	1	8.2	29
$U(d_0)$	Tekrarlı Ölçüm	6.5			19
$U(d_1)$	Deney Düzenegi	4			5
$U(d_2)$	Sistematik Hata	3			8
$U(\delta\alpha)$	Ölçü Lokmalarının Uzama Katsayıları Arasındaki Fark	$0.6 \cdot 10^{-6}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$l\alpha$	2	19
$U(\delta\theta)$	Ölçü Lokmaları Arasındaki Sıcaklık Farkı	0.07°C	$-\theta$	7	2

Tablo 3.2.3.1.1 : 50 mm lik Ölçü Lokmasının Belirsizlik Bütçesi

$$U_T(l) = \sqrt{U_{Ref}^2 + U_{CF}^2 + U^2(l_s) + U^2(d) + l_s^2 \theta^2 U^2(\delta\alpha) + l_s^2 U^2(\delta\theta)} = 17.8 \text{ nm}$$

(3.2.3.1.1)

$$v_{Eff} = 24$$

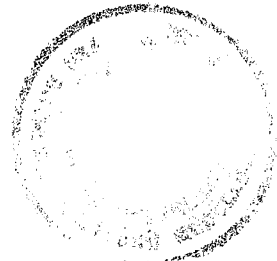


$U(X_i)$ Tipi	Belirsizlik Kaynakları	Belirsizlik Değeri (X_i) [nm]	β_i	$\frac{\partial G}{\partial X_i}$ [nm]	Serbestlik Derecesi
U_{Ref}	He-NE/ $^{127}\text{I}_2$ Lazerin Belirsizliği	$3 \cdot 10^{-5}$	1	$3 \cdot 10^{-5}$	19
U_{CF}	Çift Frekans Lazerin Belirsizliği	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$1 \cdot 10^{-4}$	19
$U(l_s)$	Referans Ölçü Lokmasının Belirsizliği	12.5	1	12.5	19
$U(d)$	Boyut Farkı	5.4	1	5.4	14
$U(d_o)$	Tekrarlı Ölçüm	2.3			19
$U(d_i)$	Deney Düzeneği	4			5
$U(d_s)$	Sistematik Hata	3			8
$U(\delta\alpha)$	Ölçü Lokmalarının Uzama Katsayıları Arasındaki Fark	$0.6 \cdot 10^{-6}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$l\alpha$	2	19
$U(\delta\theta)$	Ölçü Lokmaları Arasındaki Sıcaklık Farkı	0.07°C	$-l\theta$	7	2

Tablo 3.2.3.1.2 : 25 mm lik Ölçü Lokmasının Belirsizlik Bütçesi

$$U_T(l) = \sqrt{U_{Ref}^2 + U_{CF}^2 + U^2(l_s) + U^2(d) + l_s^2 \theta^2 U_2(\delta\alpha) + l_s^2 U^2(\delta\theta)} = 15 \text{ nm} \quad (3.2.3.1.2)$$

$$v_{Eff} = 20$$



$U(X_i)$ Tipi	Belirsizlik Kaynakları	Belirsizlik Değeri (X_i) [nm]	β_i	$\frac{\partial G}{\partial X_i}$ [nm]	Serbestlik Derecesi
U_{Ref}	He-NE/ $^{127}\text{I}_2$ Lazerin Belirsizliği	$3 \cdot 10^{-5}$	1	$3 \cdot 10^{-5}$	19
U_{CF}	Çift Frekans Lazerin Belirsizliği	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$1 \cdot 10^{-4}$	19
$U(l_s)$	Referans Ölçü Lokmasının Belirsizliği	10	1	10	19
$U(d)$	Boyut Farkı	6.8	1	6.8	24
$U(d_o)$	Tekrarlı Ölçüm	4.7			19
$U(d_i)$	Deney Düzenegi	4			5
$U(d_s)$	Sistematik Hata	3			8
$U(\delta\alpha)$	Ölçü Lokmalarının Uzama Katsayıları Arasındaki Fark	$0.6 \cdot 10^{-6}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$l\alpha$	2	19
$U(\delta\theta)$	Ölçü Lokmaları Arasındaki Sıcaklık Farkı	0.07°C	$-l\theta$	7	2

Tablo 3.2.3.1.3 : 20 mm lik Ölçü Lokmasının Belirsizlik Bütçesi

$$U_T(l) = \sqrt{U_{Ref}^2 + U_{CF}^2 + U^2(l_s) + U^2(d) + l_s^2 \theta^2 U_2(\delta\alpha) + l_s^2 U^2(\delta\theta)} = 14 \text{ nm}$$

(3.2.3.1.3)

$$v_{Eff} = 21$$



$U(X_i)$ Tipi	Belirsizlik Kaynakları	Belirsizlik Değeri (X_i) [nm]	β_i	$\frac{\partial G}{\partial X_i}$ [nm]	Serbestlik Derecesi
U_{Ref}	He-NE/ $^{127}\text{I}_2$ Lazerin Belirsizliği	$3 \cdot 10^{-5}$	1	$3 \cdot 10^{-5}$	19
U_{CF}	Çift Frekans Lazerin Belirsizliği	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$1 \cdot 10^{-4}$	19
$U(l_s)$	Referans Ölçü Lokmasının Belirsizliği	8	1	8	19
$U(d)$	Boyut Farkı	6.5	1	6.5	28
$U(d_o)$	Tekrarlı Ölçüm	2.7			19
$U(d_i)$	Deney Düzenegi	4			5
$U(d_s)$	Sistemik Hata	3			8
$U(\delta\alpha)$	Ölçü Lokmalarının Uzama Katsayıları Arasındaki Fark	$0.6 \cdot 10^{-6}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$l\alpha$	2	19
$U(\delta\theta)$	Ölçü Lokmaları Arasındaki Sıcaklık Farkı	0.07°C	$-\theta$	7	2

Tablo 3.2.1.1.4 : 15 mm lik Ölçü Lokmasının Belirsizlik Bütçesi

$$U_T(l) = \sqrt{U_{Ref}^2 + U_{CF}^2 + U^2(l_s) + U^2(d) + l_s^2 \theta^2 U_2(\delta\alpha) + l_s^2 U^2(\delta\theta)} = 13 \text{ nm}$$

(3.2.3.1.4)

$$v_{Eff} = 19$$

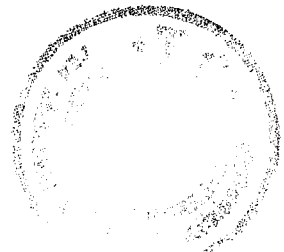


$U(X_i)$ Tipi	Belirsizlik Kaynakları	Belirsizlik Değeri (X_i) [nm]	β_i	$\frac{\partial G}{\partial X_i}$ [nm]	Serbestlik Derecesi
U_{Ref}	He-NE/ $^{127}I_2$ Lazerin Belirsizliği	$3 \cdot 10^{-5}$	1	$3 \cdot 10^{-5}$	19
U_{CF}	Çift Frekans Lazerin Belirsizliği	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$1 \cdot 10^{-4}$	19
$U(l_s)$	Referans Ölçü Lokmasının Belirsizliği	8	1	8	19
$U(d)$	Boyut Farkı	5.8	1	5.8	17
$U(d_o)$	Tekrarlı Ölçüm	2.8			19
$U(d_i)$	Deney Düzeneği	4			5
$U(d_s)$	Sistematik Hata	3			8
$U(\delta\alpha)$	Ölçü Lokmaların Uzama Katsayıları Arasındaki Fark	$0.6 \cdot 10^{-6}$ $^{\circ}C^{-1}$	$l\alpha$	2	19
$U(\delta\theta)$	Ölçü Lokmaları Arasındaki Sıcaklık Farkı	$0.07^{\circ}C$	$-l\theta$	7	2

Tablo 3.2.3.1.5 : 10 mm lik Ölçü Lokmasının Belirsizlik Bütçesi

$$U_T(l) = \sqrt{U_{Ref}^2 + U_{CF}^2 + U^2(l_s) + U^2(d) + l_s^2 \theta^2 U_2(\delta\alpha) + l_s^2 U^2(\delta\theta)} = 12nm \quad (3.2.3.1.5)$$

$$v_{Eff} = 14$$



$U(X_i)$ Tipi	Belirsizlik Kaynakları	Belirsizlik Değeri(X_i) [nm]	β_i	$\frac{\partial G}{\partial X_i}$ [nm]	Serbestlik Derecesi
U_{Ref}	He-NE/ 127 I ₂ Lazerin Belirsizliği	$3 \cdot 10^{-5}$	1	$3 \cdot 10^{-5}$	19
U_{CF}	Çift Frekans Lazerin Belirsizliği	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$1 \cdot 10^{-4}$	19
$U(l_s)$	Referans Ölçü Lokmasının Belirsizliği	10	1	10	19
$U(d)$	Boyut Farkı	5.2	1	5.2	12
$U(d_0)$	Tekrarlı Ölçüm	1.8			19
$U(d_1)$	Deney Düzeneği	4			5
$U(d_2)$	Sistematik Hata	3			8
$U(\delta\alpha)$	Ölçü Lokmalarının Uzama Katsayıları Arasındaki Fark	$0.6 \cdot 10^{-6}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$l\alpha$	2	19
$U(\delta\theta)$	Ölçü Lokmaları Arasındaki Sıcaklık Farkı	0.07°C	$-l\theta$	7	2

Tablo 3.2.3.1.6 : 5 mm lik Ölçü Lokmasının Belirsizlik Bütçesi

$$U_T(l) = \sqrt{U_{Ref}^2 + U_{CF}^2 + U^2(l_s) + U^2(d) + l_s^2 \theta^2 U_2(\delta\alpha) + l_s^2 U^2(\delta\theta)} = 13 \text{ nm} \quad (3.2.3.1.6)$$

$$v_{Eff} = 19$$

Bu çalışmada kullanılmış ölçü lokmalarının % 99'luk güvenilirlik sınırları için hesap edilmiş olan serbestlik derecesine uygun olarak toplam belirsizlik değeri U_T , serbestlik derecesi v_{Eff} , serbestlik derecesine bağlı olarak tespit edilmiş olan k değeri ve U_{99} belirsizlik değerleri tablo 3.2.3.1.7' de verilmiştir .

Ölçü Lokmasının Nominal Değeri (l_N) [mm]	$U_T(l)$ [nm]	v_{Eff}	k	$U_{99}=kU_T(l)$ [nm]
5	13	18	2.15	28
10	12	14	2.20	26.5
15	13	19	2.86	37
20	14	21	2.81	39
25	15	20	2.85	43
50	17.8	24	2.8	49.8

Tablo 3.2.3.1.7 : Belirsizlik Değerleri

NIST, PTB, NPL, LNE gibi bir çok metroloji laboratuvarları, enterfrometrik yöntem ile kalibre edilen

1. seviye K ve 0 sınıfı ölçü lokmalarının belirsizlik değerini $U_T=\pm(0.05+0.05\cdot L)\mu m$, 2.ci

seviye K ve 0 sınıfı ölçü lokmalarının belirsizlik değerini ise $U_T=\pm(0.1+1.0\cdot L)\mu m$ nominal

boyuta bağlı olarak vermektedir. Deney sonucu, elde edilen belirsizlik değeri, müsaade edilen değer ile karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar bu değerlerden küçük olduğu bulunmuştur. Ayrıca ölçüm sonuçları ISO 3650 standardında "0" sınıfı masterlar için belirlenmiş nominal boyut değişim aralığı ve müsaade edilen toleranslar içinde olduğu tesbit edilmiştir. Bu çerçevede kalibrasyon sonuçları Tablo 3.2.3.1.8'de gösterilmiştir.

$5.00007 \pm 0.028 \mu m$	$5 \pm (0.05 + 0.05L)\mu m$
$10.00003 \pm 0.0265 \mu m$	$10 \pm (0.05 + 0.05L)\mu m$
$15.00003 \pm 0.037 \mu m$	$15 \pm (0.05 + 0.05L)\mu m$
$19.99998 \pm 0.039 \mu m$	$20 \pm (0.05 + 0.05L)\mu m$
$25.00004 \pm 0.043 \mu m$	$25 \pm (0.05 + 0.05L)\mu m$
$49.99998 \pm 0.0498 \mu m$	$50 \pm (0.05 + 0.05L)\mu m$

Tablo 3.2.3.1.8 : Ölçüm Sonuçları

İzlenebilirlik açısından ise, Tablo 3.2.3.1.9 incelendiğinde, normlaştırılmış hata değeri, ölçüm sonuçları ile uyum içinde olduğunu tespit edilmiştir.

l_N [mm]	$LAB_{sonuç}$ [mm]	$Ref.Deger$ [mm]	U_{LAB} [μm]	U_{REF} [μm]	$E_n = \frac{(LAB_{sonuç} - Ref.Deger)}{\sqrt{(U_{lab}^2 + U_{ref}^2)}}$
5	5.00007	5.00000	0.028	0.021	$2 \cdot 10^{-3}$
10	10.00003	10.00001	0.0265	0.022	$5.88 \cdot 10^{-4}$
15	15.00003	15.00004	0.037	0.023	$-2.32 \cdot 10^{-4}$
20	19.99998	20.00007	0.039	0.024	$-2 \cdot 10^{-3}$
25	25.00004	25.00005	0.043	0.025	$-2 \cdot 10^{-4}$
50	49.99998	49.99992	0.0498	0.03	$1 \cdot 10^{-3}$

Tablo 3.2.3.1.9 : Normlaştırılmış Hata Değeri

3.2.5 Kalibrasyon Periyodu

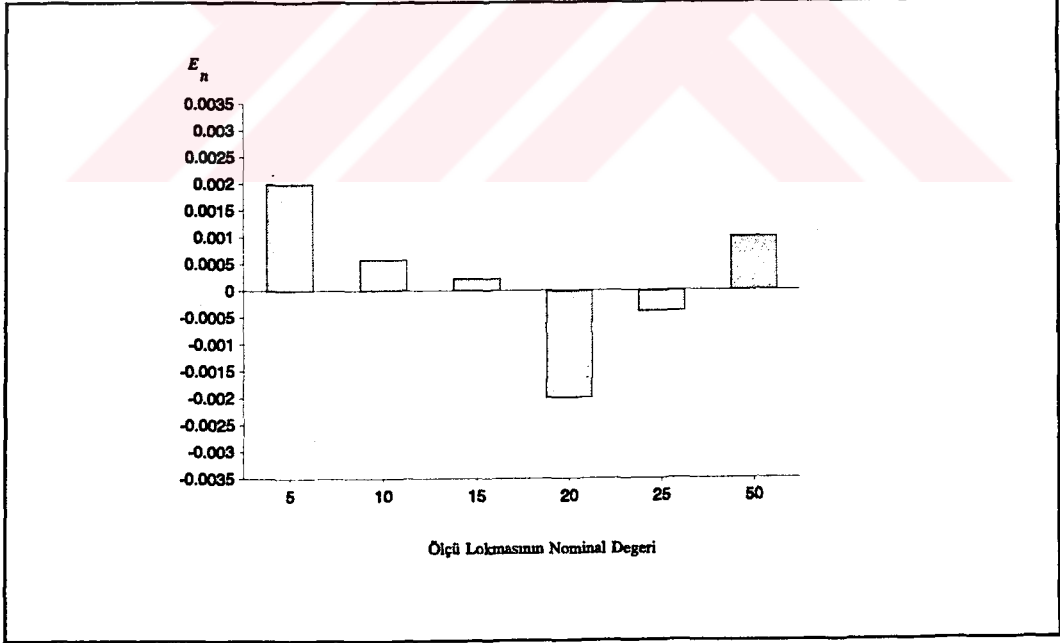
Metroloji uygulamalarında önemli diğer bir parametre ise kalibrasyon periyodudur. Ölçme işlemlerinde kullanılan ölçme teçhizatı ve ölçü referans standartları uygun aralıklarla kontrol edilerek doğrulanmalıdır. Kontrol aralıklarının seçilmesinde teçhizatın ölçüm kararlılığı, kullanım amacı, sıklığı ve kullanım yeri göz önünde bulundurulmalıdır. Kontrol aralıklarının, iki kontrol arasında ölçüm doğruluğu ve güvenilirliği etkileyecek önemli bir değişiklik olmayacak şekilde belirlenmesi gerekir. Bir önceki kalibrasyon sonuçlarına bakılarak kalibrasyon sıklığı belirlenebilir. Kalibrasyon periyoduna karar verilirken göz önünde bulundurulması gereken etkenler; kalibrasyon maliyeti, kalibre edilecek teçhizatın imalatçısının tavsiyeleri, kullanım sıklığı, kullanım şekli ve ortam koşullarıdır. Bu bilgiler ve istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak kalibrasyon periyodu tespit edilir.

Ölçü lokmalarının kalibrasyonunun yüksek maliyetli olması ve uzun sürmesi sebebi ile uygun kalibrasyon aralıklarının tespit edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon aralığının tespiti için, 1988'den beri izlenmekte olan 860703 numaralı ölçü lokma setinin zaman içinde gösterdiği boyut değişimleri incelenerek bir model geliştirilmiştir. Bu modele göre, ölçü lokmalarının değerleri belirli aralıklarla (6 ay, 12 ay, 18 ay, 24 ay gibi), arasındaki farklar takip edilerek ölçü lokmalarının zaman içindeki davranışları tespit edilmiştir. Tablo 3.2.5.1 'de deneyde kullanılmış olan referans ölçü lokmaların 1988 - 1994 yılları arasında yapılmış ölçümlerin sonuçlarını vermektedir.

Kal. Yılı	1988 (μm)	1989 (μm)	1990 (μm)	1991 (μm)	1992 (μm)	1993 (μm)	1994 (μm)
L_N (mm)							
5	-0.05	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
10	0.06	0.09	0.07	0.09	0.10	0.00	0.01
15	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04
20	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	0.07
25	-0.02	-0.05	-0.05	-0.05	0.04	0.08	0.05
50	-0.13	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07	-0.09	-0.08

Tablo 3.2.5.1 : Ölçü Lokmalarının Yıllara Göre Nominal Boyut (L_N) Değişimi.

EK 10'de kalibrasyon periyodunu tesbiti için geliştirilmiş olan program ve grafik gösterimler sunulmuştur. Buna göre kalibrasyon süresi, uygun kullanım ve ortam koşulları altında, ikinci seviye kabiliyetlerine sahip metroloji laboratuvarları için 18 ayda bir, sanayi kuruluşlarında bulundurulan çalışma lokmalar için en az yılda bir olarak tespit edilmiştir. Ancak kalibrasyon periyodu, kullanım sıklığı, termal etkiler, kullanım sırasında tespit edilen aşınmalar v.s gibi etkilere dolayı gerek görüldüğü takdirde artırılabilir veya azaltılabilir.



Şekil 3.2.3.1.1 : Normlaştırılmış Hata Değerleri

BÖLÜM IV

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışma şekli daha kolay olan Ç.F. lazer enterferometresi, ölçme hassasiyeti bakımından klasik enterferometre ile yapılan kalibrasyonlar ile aynı seviyede olmasına rağmen ölçme belirsizliği bakımından mutlak ölçüm metodu kullanan diğer enterferometrelere göre belirsizlik değerleri daha büyüktür.

Ölçü Lokmasının Nominal Boyutu	Klasik Enterferometre Ölçüm Sonuçları	Ç.F. Lazer Ölçüm Sonuçları	Elektro-Mekanik Komparatör Ölçüm Sonuçları
5	5.00002 ± 0.025	5.00007 ± 0.028	5.00002 ± 0.052
10	10.00000 ± 0.03	10.00003 ± 0.026	10.00001 ± 0.055
15	15.00005 ± 0.035	15.00003 ± 0.037	15.00004 ± 0.057
20	20.00008 ± 0.04	19.99998 ± 0.039	20.00007 ± 0.06
25	25.00008 ± 0.045	25.00004 ± 0.043	25.00004 ± 0.062
50	49.99991 ± 0.05	49.99998 ± 0.0498	49.99992 ± 0.075

Tablo 4.1 : Klasik, C.F Lazer Enterferometresi ve Elektro-Mekanik Komparatör ile Ölçülmüş Olan 860703 Nr.lı Ölçü Lokmalarının Ölçüm Sonuçları

Ancak, yine de Ç.F lazer ile gerçekleştirilen ölçümler, Elektro-Mekanik komparatör ile yapılanlarla karşılaştırıldığında; ölçme belirsizlik bakımından daha iyi olduklarını görülmektedir (Tablo 4.1). İzlenebilirlik bakımından incelendiğinde, metrenin tanımına uygun olarak, uzunluk biriminin, He-Ne/¹²⁷I₂ lazerden sanayinin referansı olan ölçü lokmalarına, ışığın dalgaboyu kullanılarak transferi sağlanmıştır. Deney düzeneğinde kullanılmış olan Ç.F. lazerin ikincil seviye transfer standardı olarak kullanılabileceği ölçüm sonuçları ile teyid edildi. 1983 yılından beri bir çok ülke, metre'yi " YENİ" tanımına uygun olarak gerçekleştirme çabasına girişmişlerdir. Ülkemizde uzunluk birimi 10⁻¹² [Hz/Hz] kararlılıkla gerçekleştirilmiş olup transfer ve ikincil seviye standardı olan Ç.F. lazerin kararlılığı yapılan ölçümler sonucu 10⁻¹⁰ [Hz/Hz] olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarını benzer çalışmalarla karşılaştırdığımızda, uzunluk referans standardı konusunda, gelişmiş ülkeler ile aynı seviyededir (Titov² et al.). Uzunluk birimi, birincil ulusal uzunluk referans standardından, ikincil seviye referans standardına, fark frekans tekniği kullanılarak transfer edilmiş ve sonuçlar benzeri çalışmalar ile karşılaştırılarak aynı seviyede olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Ç.F. lazerlerin, Pérez S.A.M. et al. tarafından önerilmiş alternatif kalibrasyon yöntemi ile karşılaştırıldığında sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür

Kalibrasyon Yöntemi	Referans Lazere Göre Belirsizlik Değeri	Lazerin Tespit Edilen Kararlılığı
Ç.F. Lazer Fark Frekans Yöntemi	40 kHz	$5 \cdot 10^{-10}$
Ç.F Lazerin Fark Frekans Yöntemi ile INM'de Yapılmış Kalibrasyon	93 kHz	$6 \cdot 10^{-10}$
Ç.F. Lazerlerin Perez'in Yöntemi ile Kalibrasyon Sonuçları	568 kHz	$4 \cdot 10^{-9}$

Tablo 4.2 : C.F. Lazerlerin Kalibrasyon Sonuçları

Bu çalışma sonunda elde edilmiş diğer sonuçlar ve değerlendirmeler şöyle özetlenebilir;

1. Ulusal uzunluk referans standardının kararlılığı yalnızca lazerin frekansının kararlılığına bağlı değildir. Kararlılık, sistemi oluşturan mekanik yapının, İyod hücresinin iç basıç değerine, İyodun saflık derecesine ve elektronik servo kontrol sisteminin kararlılığına da bağlıdır.

2. Kalibre edilen Ç.F. lazer enterferometresi ile izlenebilirlik, ölçü lokmaları dışında boyutsal ölçümlerde kullanılan üç boyut ölçüm makinalarına, universal boyut ölçme tezgahlarına ve mehengir gibi ölçme teçhizatlarına da transfer edilebilir. Ç.F lazer vasıtasıyla, ulusal uzunluk referans standardından, ışığın dalga boyu kullanarak bu teçhizatlarada izlenebilirlik doğrudan sağlanabilir.

3. Ölçü lokmalarının önerilen yeni yöntemle kalibrasyonu sonucunda, elde edilen verileri iyileştirmek ve ölçme belirsizliğini azaltma amacına yönelik olarak, deney düzeneğinde kullanılan mikroskobun hareketli tablası bilgisayar destekli bir servomotor ve gözle ölçüm yapılması yerine, bir fotoelektrik mikroskop kullanıldığı takdirde, ölçüm sonuçlarındaki belirsizlik değerleri azaltılabilir ve tekrarlanabilirlik artırılabilir. Ayrıca Ç.F. lazere sahip metroloji laboratuvarları, bu çalışmada önerilmiş kalibrasyon yöntemi "0", "1" ve "2".ci sınıf ölçü lokmalarının kalibrasyonu için uygulayabilirler. Ancak bu yöntem "00" ve "K" sınıfında bulunan ölçü lokmalarının toleranslarının hassasiyetinden dolayı uygulanamaz.

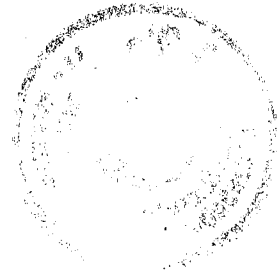
4. Son beş yıl içinde ülkemizde, sanayi kuruluşlarının kurdukları metroloji laboratuvarlarının yanısıra yalnızca kalibrasyon hizmeti veren özel metroloji laboratuvar sayısında da büyük bir artış gözlenmiştir. Özellikle ölçü lokmaları kalibrasyonu yapılan laboratuvarlarda, kalibrasyonlar, ölçme hassasiyetine uygun ölçü lokmaları kullanılmalı ve belirsizlik hesapları etki faktörleri göz önüne alınarak gerçekleştirilmelidir. Bu amaçla Şekil 4.1'de ölçüm ve kalibrasyonlarda kullanılan ölçü lokmalarının, grafik olarak pratik bir seçim yöntemi önerilmiştir.

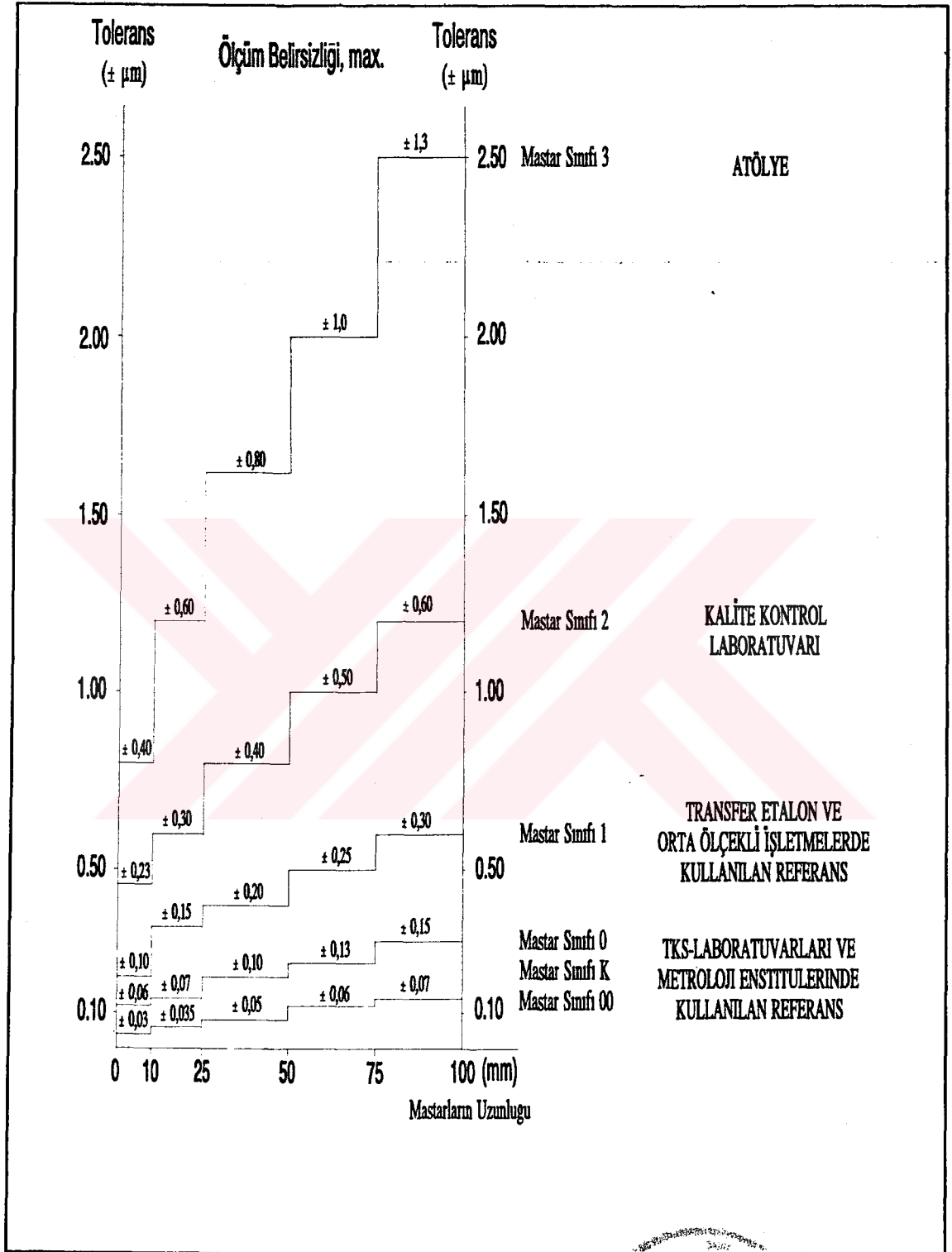
5. Ölçümlerde kullanılan teçhizatının kalibrasyonu ölçüm belirsizliği açısından önem taşır. Bu teçhizatlar, hedeflenen ölçme belirsizliğine bağlı olarak, özel ortam koşullarını sağlayan akredite edilmiş metroloji laboratuvarlarında kalibre edilmelidir.

6. Kalibrasyon periyodu ikincil seviye ve sanayinin metroloji laboratuvarlarının referans ölçü lokmaları için iki yıl, sanayide kullanılan çalışma standartları için ise kullanım sıklığına bağlı olarak 12-18 ay olarak önerilmektedir. Ayrıca bu çalışmada sunulmuş olan kalibrasyon periyodunun belirlenmesi için geliştirilmiş yöntem ile bu konuya sistematik çözüm teklif edilmektedir. EK 12 kalibrasyon periyodunu belirlemek için bir bilgisayar programı sunulmuştur. Şekil E 12.1'de ölçü lokmalarının 1988-1994 aralığında boyut değişimi gösterilmiş, Şekil E 12.2, Şekil E 12.3 ve Şekil E 12.4'te kalibre edilen lokmaların, kalibrasyon aralığını göstermektedir. Bu yöntem ikinci seviye ve sanayinin kalibrasyon laboratuvarlarında kolaylıkla uygulanabilir. Önerilen metodun, imalat ortamında uygulanması, daha verimli ve daha ucuz bir kalibrasyon sağlayacaktır.

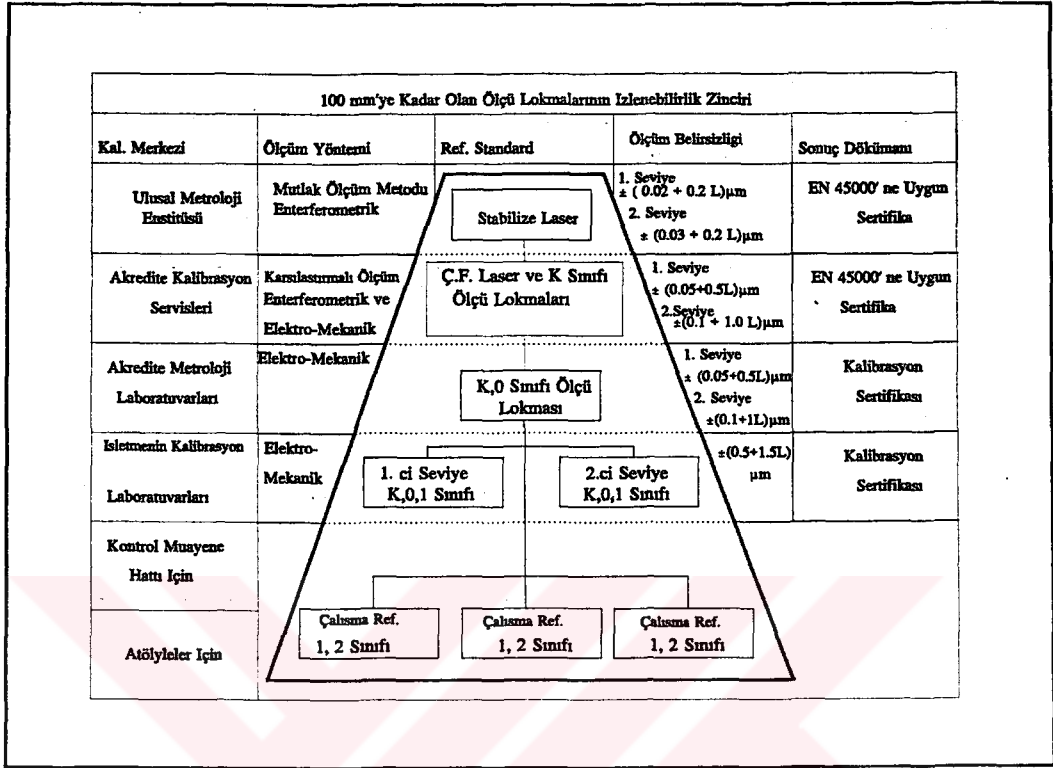
7. Ölçme referans standartlarının kararlılığı ve izlenebilirliği, ancak metroloji laboratuvarlarının, aralarında (ulusal ve / veya uluslararası seviyede) yapacakları karşılaştırmalı ölçümlerle sağlanabilir (Şekil 4.2'de 100 mm'ye kadar olan ölçü lokmalarının izlenebilirlik zinciri gösterilmiştir).

9. Rekabet gücünü artırmanın bir yolu kalite kontrol tekniklerini geliştirmektir. Kalite temininde kullanılan teçhizatların %99'u ithal edilmektedir. DPT'nin 1994 yılı için yayınladığı bilgiler çerçevesinde ülkemiz yıllık yaklaşık olarak 100 milyon US\$'lık ölçme kontrol teçhizatı ithal etmektedir (DPT, 1994). Dolayısıyla, bu durumda ülkemizde ölçme-kontrol teçhizatları imalatı yapan sanayinin kurulması gereğini ortaya koymaktadır. Bugün ülkemizde metroloji ile ilgili sistemli bir eğitim düzeninin olduğu ve mevcut imkanların tam olarak kullanıldığı tam olarak söylenemez. Ne teknik eğitimde ne de endüstride yeteri incelemeye ve araştırmaya dayalı metroloji eğitimi yoktur. Ancak altyapısı tümüyle tamamlanmış bir metroloji sistemi sayesinde teknolojinin çağdaş, ileri seviyesine ulaşmanın mümkün olabileceği gerçeği gözden kaçırılmamalıdır.





Şekil 4.1 : Ölçü Lokmalarının Pratik Seçim Metodu.



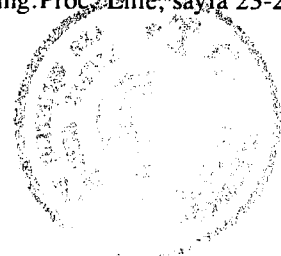
Şekil 4.2 Uzunluk Biriminin İzlenebilirlik Zinciri



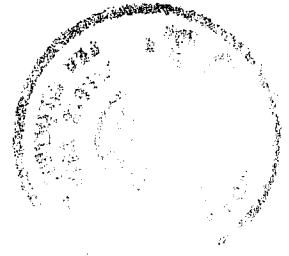
KAYNAKÇA

1. ABRAMOVA.Yu., V.M. BARATOV, and V.L.SHUR " Certification of Laser Interferometres For The Measurement of Linear Displacement" Izmeritel naya Tekhnika No.6 sayfa 16-17, June 1992.
2. AGALETSKI P.A., " The Scope and Objectives of Metrology " Tr. Metrolog.Inst. SSSR, Issue 119, No. 179 1974.
3. AKIMOTO Y., " Lasers a He-NE Asservis Sur le Methane en Utilisant la Methode d'Absorption Linéaire " CCDM, 5.eme Session, sayfa M114, 1973.
4. ALLAN D.W., " Statistics of Atomic Frequency Standards" Proc. IEEE. 54 sayfa 220-231, 1966.
5. ALTAN A.B., "Metroloji Organizasyonu: Kalite Kontrolde Yeri, Türkiye'deki Gelişme Durumu "Mühendis ve Makina " Cilt 28 Sayı 329, Haziran 1987.
6. ALTAN A.B., " On the Establishment of on an NMC in Support of Turkish Quality Control System" OECD Symposium, September Dubrovnik 1983.
7. BARBATO G., " Basic Metrology and Application " C.N.R. Lavrotto & Bell Torino, 1994.
8. BARNES J.A., CHI A.R and CUTLER L.S " Carcterisation of Frequency Stability " IEEE Trans. Instrumentation Measurements " vol. IM -20, sayfa 105-120, 1971.
9. BAYER H.F., " Gauge Blocks : Concept, Standardization, Measurement" PTB -Opt'8e, Braunschweig, Februar 1989.
10. BAYER H.F., J-M CHARTIER, J HELMCKE and A.J.WALLARD Evaluation of the International Intercoparison Measurements (March 1976) With Iodine Stabilized Lasers" PTB- ME 17, sayfa 139-146, 1977.
11. BAYER H.F., " Flexion des Etalon a Boutes Places Horizontalement sur des Couteaux" PTB Mitteilongen, 1970.
12. BELANGER B.C. and KIEFFER L.J., " Regional Measurement Assurance Programs For Physical Measurements" ACTA IMEKO sayfa 649-656, 1979.
13. BERTINETTO F, REBAGLIA B.I., LIVERANI M., and GUALINI S., " Pressent Development of Iodine Stabilized Laser at the Instituto Di Metrologia G. Colonnetti" Alta Frequenza Vol XLIV N. 19 Octobre sayfa 279- 283, 1975.
14. BİLGİÇ E., SADIKOV E., " Gürültü ve Titreşim " TUBİTAK UME 008, 1994.
15. BIPM¹, " Recommendations of the Int . Committee for Weights and Measures on the Realization of the Meter " PTB- Mitt. 94 sayfa 345-348, 1984.

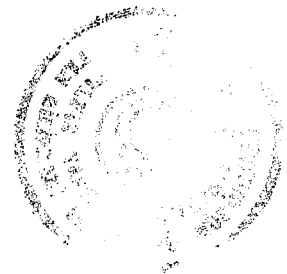
16. BIPM², "Vocabulaire International des Termes Fondamentaux et Généraux de Metrologie" BIPM 1984.
17. BIPM, " Le Bureau International Des Poids et Mesures 1875-1975 " BIPM Sevres, sayfa 10-45, 1975 .
18. BIPM³, " Documents Concerning the New Definition of the Metre " Metrologia Number 2, Volume 19, November 1984.
19. BIPM⁴, " Procès-Verbaux de la 73^e session- TOME 52 " CIPM 1984 Sevres, sayfa 21-41, 1984.
20. BIPM, "Proc.-Verb. COM. Int. Poids et Mesures" 51, sayfa 25-28, Recommendation (CI), 1983.
21. BIRCH K.G., " Uncertainty in the Measurement of Gauge Blocks by Interferometry " NPL Report MOM 29, 1979.
22. BNM., " Echelle Internationale De Temperature 1990 " Monografi, Janvier 1990.
23. BÖHME H., " Der Einfluss Der Lage Der Unterstützungsstellen Von Langen Parallelenmassen auf die Längenmessung " PTB - Mitteilungen 96 3/86 , sayfa 159-165, 1980.
24. BONNIER G., " An International Intercomparison of Temperature Fix Points " Metrologia 27, sayfa 101-106 , 1990.
25. BONNIER G., RONSI H, and MOSER A., " A Water Triple Point in a Multicompartment Cell" Proc. of Thermal and Temperature Measurement in Science and Industry , Temp/Imeko 87, Sheffield, 1987.
26. BOSCH R., " Metrologie Dimensionnelle " OCERP Edition, 1973.
27. BOUCHAREINE¹ P., "Spectrometrie de Metrologie Interferentielles" Cours de Metrology C.Opt'on D.E.A. Conservatoire National des Arts et Metiers Departement de Physique - Metrologie, sayfa 1-8, 1988.
28. BOUCHAREINE² P., " Interferometre a Laser ,Instrument de Mesure", Fiche Technique. Conservatoire National des Arts et Metiers. Departement de Physique-Metrologie sayfa 10-41, 1988.
29. BRAY A., "New Methods And Research Trends In The Dissemination of The Standards of Measurement Units " ACTA IMEKO , sayfa 627 - 642, 1979.
30. BRIGODIOT G., " Optimisation de la Frequence des Etalonnages ou des Verification Periodique Des Instruments Des Mesures" CIM, Comg. Proc. Lille, sayfa 23-29, 1993.



31. BRUHART G., " Cours de Physique General ".Masson & Cie. Publication-PARIS, sayfa 5-325, 1965.
32. CAMERON J.M., " Measurement Assurance" NBS internal Report Nr. 77-1240, April 1977.
33. CEREZ P., and FELDER R., " Gas-Lens Effect and Cavity Design of Same Frequency Stabilized He-Ne Lasers ". Appl. Opt. 22 sayfa 1251-1256, 1983.
34. CHARTIER¹ J.-M., ROBERTSSON L., SOMMER M., PETRU F. VESELA Z., BANRETI E., and VITUSHKIN L.F., " International Comparison of Iodine Cells" Metrologia Volume 29 sayfa 361-367, 1992.
35. CHARTIER² J.-M DARNEDDE H., PENDRILL L., PETERSEN J.C., POULSENO., RIEHLE F., and WAHLGREN H., " Intercomparison of Northern European Iodine Stabilized He-Ne Lasers at 633nm ". Metrologia 29, sayfa 331-339, 1992.
36. CHARTIER J.-M., FREDIN-PICARD S., and CHARTIER A. " Recent Activities at BIPM in the Field of Stabilized Laser-Radiation Recommended for the Definition of the Meter " IEEE Trans. Instrum. Meas., Im 40 sayfa 181 -184, 1991.
37. CHARTIER³ J.-M., FREDIN-PICARD S., and CHARTIER A. " Intercomparison of Iodine Cells " Metrologia 29, sayfa 361-367, 1992.
38. CHEBOTAYEV V.P., KLEMENTYEV V.M., NIKITIN M.V., TIMCHENKO B.A., and ZAKHARYASH V.F., " Comparison of Frequency Stabilities of the Rb Standard and of the He-Ne/CH₄ Laser Stabilized to the Line in Methane " Applied Physics B Volume 36, sayfa 59 61, 1985.
39. CNAM -Musée National Des Techniques " Les Artes et Metiers en Révolution L'Aventure du Mètre " CNAM Paris 1989.
40. CROARKIN C., BEERS J. and TUCKER C " Measurement Assurance for Gauge Blocks" NBS Monographi 163, January 1979.
41. DARNEDDE H., " High-Precision Calibration of Longe Blocks Using the Vacuum Wavelength Comparator " Metrologia 29 sayfa 349-359, 1992.
42. DPT., " Gümrük Tarife İstatistik Pozisyon Numaraları " 1994.
43. EDLEN B., " Calculation of Air Refractiv Index ". Metrologia vol. 2 No.2 , sayfa 71-80, 1966.
44. EKERİM A., " Ülkemizde Ölçme ve Kalibrasyon Durumu Üzerine Bir Araştırma " Makina Sempozyumu Sayfa 609-611, 1988.



45. EN 29000-1., " Quality Management And Quality Assurance Standards Guidelines For Selection And Use" 1994
46. EN 45000., " General Criteria For The Operation Of Testing Laboratories " 1994.
47. ENGELHARD E., " In Metrology of Gauge Blocks" NBS Circular 581 Washington,D.C., sayfa 1-20, 1957.
48. GENCELİ O.F., " Ölçme Tekniği " Birsen Yayınevi, Istanbul 1994.
49. GIACOMO P., " Accuracy in Length Measurement " ACTA IMEKO, sayfa 643-648, 1979.
50. GILL P., " NPL-PTB Intercomparison of Iodine -Stabilized Ion Lasers" NPL Report MOM 42 sayfa 1-13, November 1979.
51. GLÄSER M., " Properties of a He-Ne Laser at 612 nm Stabilized by Means of an External Iodine Absorption Cell" IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Volume IM-36,No. 2, sayfa 604-609, June 1987.
52. GOLUBEV A.N., CHKHOVSKI A.M., and ZAKROISCHIKOV S.N., " Refinement of the Metrological Chain for Calibration of Long-Distance Measurement Systems " Metrologia Number 4, Volume 31 June 1994.
53. GONELLA L., " The Unit of Measurement in The Operational Approach to Measurement " IMEKO Proc. sayfa 6-11, 1994.
54. HANES G.R.,and DAHALSTROM C.E. " Iodine Hyperfine Structure Observed in Saturated Absorption at 633nm " Applied Physics Letters Volume 14, No. 11 sayfa 362 -364, June 1969.
55. HARTMANN O.,SCHENK W F., and SUSKA J. " The Gauge Block Interferometer of The DAMW of GDR Used for Testing Precision Scales" DAMW Report 1989.
56. HELMCKE J., " Stability and Reproducibility of He-Ne Lasers" AMCO-5, 1975.
57. HEWITT P.L., " Modern Techniques in Metrology ",World Scientific sayfa 1-24,1984.
58. HOFMANN D.,and TARBEYEV Yu. V. " Theoretical, Physical and Metrological Problems of Further Development of Measurement Techniques and Instrumentation in Science And Technology" ACTA IMEKO sayfa 607-627, 1979.
59. HOLMES P.,and HARRISON E.R. " STD. Ref. Temperature for Industrial Length Measurements " Microtecnic 7(1), 8. ISO -1 1963.
60. HP., " HP Laser Interferometer User Guide and Technical Specification" HP Book,1991.



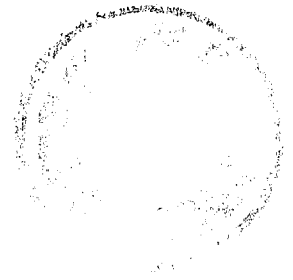
61. IKONEN E. and RISKI K., " Gauge-Block Intrferometer Based on One Stabilized Laser and a White-Ligth Source" Metrologia 30, sayfa 95-104, 1993.
62. ISHIKAWA S., " Phase Shiting Interferometry with Coupled Interferometres" PTB 1994.
63. ISO ., " Guide to the Expresion of Uncertainty in Measurement" ISO/TAG 4/ WG 3, sayfa 92, June 1992.
64. ISO., " ISO 3650 Gauge Blocks Standard. " 1978.
65. IWASAKI S.,and CHARTIER J-M., " Comparison of the Iodine Stabilized He-Ne Lasers at 633 nm Wavelength of the NRL of Japan and the BIPM " Metrologia 26,sayfa 257-261 , 1989.
66. KATOH T., SAWABE M., SAKAMOTO K., SEINO S., " Present Status of Traceability and Accuracy of Dimentional Measurement in Japan" Report of NRLM, 1978.
67. KING R.J., " Polarized Light: Definition and Nomenclature " NPL Report MOM 25 sayfa 1-15, 1977.
68. KIYOTO M., " Laser Principles and Application " Notes of the Training Cours in Metrology and Measurement Standards, Tusukuba, sayfa1-10, 1982.
69. KÖSTERS W., "Der Gegenwartige Stand der Meter- Definition", Werkstattstechnik und Werksleiter, Berlin 1938.
70. KRAMER B., " The Art of Measurement " PTB Braunschweig sayfa 18-21, 161-197, 1988.
71. KRAMER B., " The Art Of Measurement Metrology in Fundamental and Applied Physics " PTB VCH, 1987.
72. LAYER H.P., " A Portable Iodine Stabilized He- Ne Laser " IEEE Trans. Instrum. Meas.Vol. IM 29, No. 4 sayfa 358-361, December 1980.
73. LECOLLINET M., RONSIN M., and NEGRO M., " Metrologie Instrumentation Travaux Pratiques " CNAM, Cours Universiter, Paris 1991.
74. LECOLLINET M., " Traitement des Donnees Experimentales " CNAM Cours Universiter, Paris 1989.
75. MATSUMOTO H., and HONDA T., " High Accuracy Length Measuring Interferometer Using the Tow-Colour Method of Compensating for the Refractiv Index of Air " Meas. Sci. Technol., 3 ,sayfa 1084 -1086, 1992.
76. MATSUMOTO H., "Length Measurement of Gauge Blocks Using a 3.39 μm He-Ne Laser Interferometer " JPN. J.Appl. Phys., 19 sayfa 713-718, 1980.

77. MICHELSON.A.A., " Valeur du Mètre en Longuers D'Ondes Lumineuses " BIPM Paris 1894.
78. MİLLEA A., " Metode de Productivitate Ridicata Pentru Etalonari și Verificari Metrologice " Metrologie Aplicata vol. XXXIV Nr.3 1987.
79. MİLLEA A., " Cartea Metrologului " Editura Tehnica, București 1984.
80. MİLLEA A., " Masurari Electrice Principi și Metode" Editura Tehnica, București 1980.
81. MOORER.W., "Foundation of Mechanical Accuracy " Connecticut 1970 sayfa 98-108.
82. MOSER A., " La Mesure des Températures a L'INM et au LNE " R.G.E Tome 79 No. 10 November 1968.
83. NASH W. A., " Strength of Materrrial " MIT, Book, 1977.
84. NPL , " Length bar Interferometry " NPL MOM 83, 1987.
85. NPL , " Laser Interferometer Calibration at NPL ", Quality Today, 35, MAY 1984.
86. NRLM ., " NRLM- TUSUGAMİ Interferometer " PTB Mit. Rep.,1978.
87. OILM ., " Int. Rec. NO. 30, End Standards of Length (Gauge Blocks), June 1980.
88. PAU L.F. " Control Statistic de Qualite Pour L'Instrumentation " Edition Chiron Paris 1978.
89. PENDRILL L.R., CHARTIER J-M., PETERSEN J.C., POULSEN O.,
"Intercomparison of Optical Frequencies at 473 THz of Iodine Stabilized He-Ne Lasers from the Swedish N.T.R. Institute and BIPM " Metrologia, 28 sayfa 95-98, 1991
90. PEREZ S.A.M., De VINCENTE J., MADRONA J.A., " Calibration of Laser Interferometres as Variable Length Standards " 6.th International Metrology Congress Proc. sayfa 205-201, October 1993.
91. Periodiques Des Instruments de Mesure " CIM, Cong. Proc. Lille , sayfa 23- 29, 1993.
92. PETRU F., POPELA B., VESELA Z., " Iodine Stabilized He-Ne Lasers at 633nm of a Compact Construction" Metrologia 29, sayfa 301-307, 1992.
93. PETRU F., VESELA Z.,DARNEDDE H., HELMCKE J. et al., " Intercomparison of Iodine Stabilized He-Ne Lasers of The Institute of Scientific Instruments, CSSR, and the PTB, FRG." Metrologia 27, sayfa 19-23, 1990.
94. PICARD F.S., " Study of Contamination in Iode Cell Using Laser -Induced Fluorescence" Metrologia 26, sayfa235-244, 1989.
95. POTULSKI E., " Ein Meter Endmasskomparator " Feinwerktechnik & Messtechnik 94 1 sayfa 43- 45, 1986.

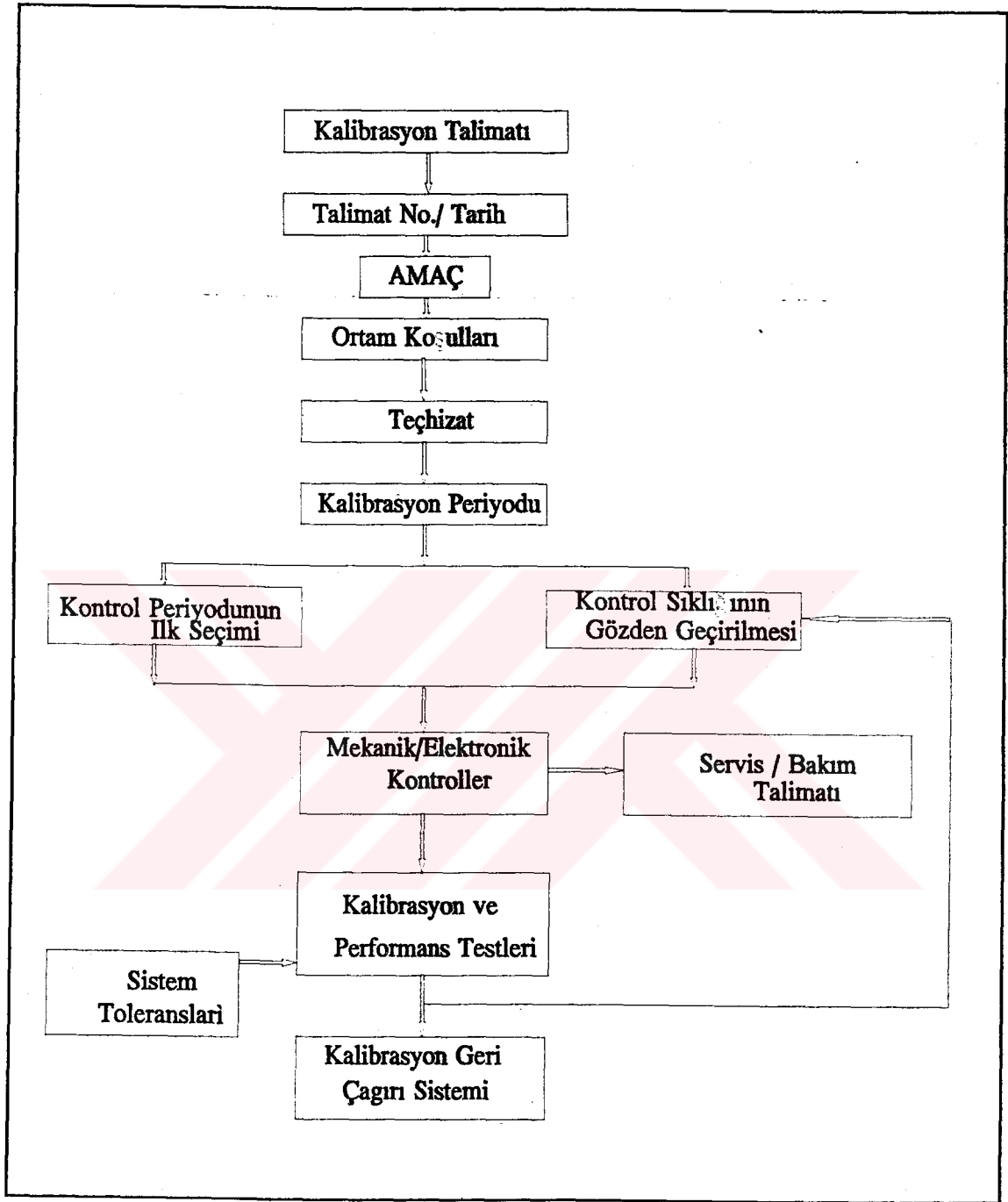
96. PRIEL M., " Etalonnage et Verification des Instruments de Mesures " CIM Cong. Proc. Lille , sayfa 9-22, 1993.
97. PUTTOCK M.J., " Calibration of Standards of Length "Modern Techniques in Metrology " 81.Worald Sciantific, sayfa 79-101, 1984.
98. QUINN¹ T.J., " Metrology, its Role in Today's World" BIPM May 1994.
99. QUINN² T.J., " Mise en Pratique of the Definition of the Metre (1992)" Metrologia Number 5, Volume 30, January 1994.
100. RANDALL R.B., et al., " Frequency Analysis " B&K ,September 1987.
101. RAZET A., JUNCARE P., MILLARIEUX Y., " Hyperfine Structure Analysis of the 33 P(6-3) Line of Iodine at 633 nm Using Continuouse -Wave Tunable Day Laser" Metrologia 30 sayfa 61-65, 1993.
102. ROBERTSSON L.,PICARD S.F.,CHARTIER " International Comparison of Iodine Stabilized He-Ne Lasers at 633 nm Involving Seven Laboratoris " Metrologia 28, sayfa 19-25, 1991.
103. ROWLEY¹ W.R.C., " Wavelength Values of the 633 nm Laser, Stabilized with ¹²⁷I₂ Saturated Absorption " Metrologia Volume 8 sayfa 647-651, 1973.
104. ROWLEY² W.R.C.,and WALLARD A.J., " Frequency Stabilization of the Helium Neon Laser Stabilized to An Iodine Hyperfine Component" App. Opt.,vol.12, sayfa 1600 , 1973.
105. SCHATZ B., " Control et Etalonnage Des Cales Etalon " Mesure Dimentional R 1 245-1 Sayfa 1-24, 1981.
106. SEINO S., " Comparison of Interferometric Measurement of a Gauge Block Made Among the Length Measurement Laboratories. NRLM Report 2(29) 1980.
107. SELIVANOV M.N., " Definition of METROLOGY, QUANTITY and MEASUREMENT" Izmeritel Tekhnika,No. 2, sayfa 11-15, February 1992.
108. SIMONSEN H.,and POULSEN O., " Frequency stabilization of an Internal Mirror He-Ne Laser at 543.5 nm to I₂-Saturated Absorptions " Applied Physics B 50, sayfa 7 12, 1990.
109. SPIEWECK F., " Influence of Small Impurities in Absorption Cells of Iodine Stabilized Lasers Upon Their Frequency " IEEE Trans. Instrum. Meas. IM 34 sayfa 246- 248, 1980.
110. SPIEWECK F., " Length Measurements " IEEE Trans. Instr. Meas. IM-34, sayfa 246 248, 1985.

111. STOCK H.M.P., " Laser Interferometry and the Measurement of Length" Modern Techniques in Metrology Worald Sciantific, sayfa 123-157, 1984.
112. SYDENHAM P.H., " Measurement of Length " Handbook of Measurement Science Vol.2 sayfa 48-65, 1985.
113. THOMAS H.P., " The International Temperature Scale of 1990 (ITS90)"Metrologia 27, sayfa 3-10 , 1990.
114. TITOV¹ A., MALINOVSKI I., RIEHLE F., " Progress in Stabilization of the He-Ne/¹²⁷I₂ Wavelength Standard at 633 nm and Results of an International Comparison between the Physikalisch-Technisch Bundesanstalt (PTB) and National Metrology Institute Of Turkey (UME). Metrologia. 1995,32,3.
115. TITOV² A., ERİN M., I. MALINOVSKI.,KARABÖCE B. "Intercomparison of the BIPM and UME Primary Laser Wavelength Standards Operating at 633 nm. Metrologia,1995,32,4.
116. TITOV A., " Second-Order Doppler Shift in Lasers Stabilized by Saturated Absorption" Optics Communication Volume 66, No. 4 sayfa 207-210, May 1988.
117. TOFFIN P., " Etalon Industrielles de Longuer et D'Angles " Etalon Ind. R1 240 1,sayfa 1-18, 1978.,
118. TSE , " Milli Kalite Sistemi Projesi II.nci Safhası " Mühendis ve Makina Cilt: 28 Sayı:329 sayfa 17-20,1987.
119. TÜKEL N., " Ölçme Kontrol Tekniği " İ.D.M.M.A, İstanbul 1980.
120. VENCESLAV F.K., " Approximating Frequency Synthesizer " IEEE Vol I NR.4 sayfa 521- 531, 1974
121. WALLARD A.J., " Frequency Stabilization of the Helium Neon Laser by Saturated Apsorption " ,Physics E. Sci. Inst. 5, sayfa 926-930, 1972.
122. WALLARD A.J., " The Reproducibility of 633 nm Lasers Stabilized by Iodine " IEEE Tans. INST. Meas. , Vol. IM-23 No. 4 , Sayfa 532-535, 1974.
123. WARNECKE H.J." Fertigungs-Messtechnik " Springer-Verlag Berlin 1984 sayfa 713 732.
124. WEISS C.O.,KRAMER B., LIPPHARDT B., and GARCIA E. " Frequency Measurement of a CH₄ Hyperfine Line at 88 THz/" Optical Clock" " IEEE Jurnal of Quantum Electronics,Volume 24, Number 10, October 1988.
125. ZASTROGIN Yu.F., " Laser Two coordinate Interferometers in Industry " Izmertial naya Tekhnika, Nr.4 sayfa 21-23, April 1992

126. ZELBSTEIN U., " Introduction aux Techniques de Conditonnement des Laboratoires
" Editions Chiron sayfa 7-65, 1980.



EK 1.



Şekil E 1 : Dokümanite İzlenebilirliğin Akış Diyagramı

Ölçü Lokmalarının Kalite Sınıfı	"00"	"K"	0	1	2	3
Kalibrasyon için Gerekli Cihaz	Enterferometre	Enterferometre veya Komparatör	Komparatör	Komparatör	Komparatör	Komparatör
Kalibrasyon için Gerekli Referans Ölçü Lokma Seti	Referans Monokromatik Işık Kaynağı	"00"	"K" veya "00"	"0"	"1"	"2"

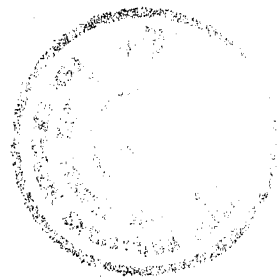
TABLO E 2.1 : Ölçü Lokmalarının Kalibrasyon Hiyerarşik Seviyesi

Nominal Boyut Aralıkları (mm)		"OO" ve "K" (μm)	"O" (μm)	"1" (μm)	"2" (μm)	"3" (μm)
den	kadar					
0.5	10	0.05	0.10	0.16	0.30	0.30
10	25	0.05	0.10	0.16	0.30	0.30
25	50	0.06	0.10	0.18	0.30	0.30
50	75	0.06	0.12	0.18	0.35	0.40
75	100	0.07	0.12	0.20	0.35	0.40
100	150	0.08	0.14	0.20	0.40	0.40
150	200	0.09	0.16	0.25	0.40	0.40
200	250	0.10	0.16	0.25	0.45	0.45
250	300	0.10	0.18	0.25	0.50	0.50
300	400	0.12	0.20	0.30	0.50	0.50
400	500	0.14	0.25	0.35	0.60	0.60
500	600	0.16	0.25	0.40	0.70	0.70
600	700	0.18	0.30	0.45	0.70	0.80
700	800	0.20	0.30	0.50	0.80	0.80
800	900	0.20	0.35	0.50	0.90	0.90
900	1000	0.25	0.40	0.60	1.00	1.00

Tablo E 3.1 :ISO 3650'e Göre Ölçü Lokmalarının Nominal Boyutun Değişim Aralığı

Nominal Boyut Aralığı (mm)		"00" (μm)	"0" (μm)	K ve 1 (μm)	2 (μm)	3 (μm)
0.5	10	± 0.06	± 0.12	± 0.20	± 0.45	± 0.80
10	25	± 0.07	± 0.14	± 0.30	± 0.60	± 1.20
25	50	± 0.10	± 0.20	± 0.40	± 0.80	± 1.60
50	75	± 0.12	± 0.25	± 0.50	± 1.00	± 2.00
75	100	± 0.14	± 0.30	± 0.60	± 1.20	± 2.50
100	150	± 0.20	± 0.40	± 0.80	± 1.60	± 3.00
150	200	± 0.25	± 0.50	± 1.00	± 2.00	± 4.00
200	250	± 0.30	± 0.60	± 1.20	± 2.40	± 5.00
250	300	± 0.35	± 0.70	± 1.40	± 2.80	± 6.00
300	400	± 0.45	± 0.90	± 1.80	± 3.60	± 7.00
400	500	± 0.50	± 1.10	± 2.20	± 4.40	± 8.00
500	600	± 0.60	± 1.30	± 2.60	± 5.00	± 10.00
600	700	± 0.70	± 1.50	± 3.00	± 6.00	± 11.00
700	800	± 0.80	± 1.70	± 3.40	± 6.50	± 13.00
800	900	± 0.90	± 1.90	± 3.80	± 7.50	± 14.00
900	1000	± 1.00	± 2.00	± 4.20	± 8.00	± 16.00

Tablo E 3.2 : ISO 3650'e Göre Ölçü Lokmalarının Müsaade Edilen Tolerans Değerleri



EK 4

Nr.1 : BIPM 7 (124 Nr.lı Hücre ile)

Nr.2 : BIPM 4

	Nr.1	Nr.2	
Modulasyon Genliği	: 6	6	MHz
Iyod Hücresinin Sıcaklığı	: 15	15	°C
Lazer Çıkış Gücü	: 139	120	μ W
Besleme Gerilimi	: 1.55	1.55	KV
Besleme Akımı	: 4.10	3.56	mA
Entegrasyon Süresi τ	: 3x10	3x10	s

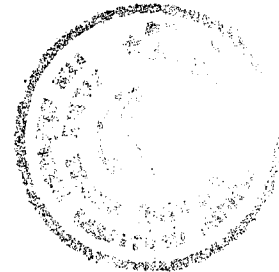
Nr.1/Nr.2	d	e	f	g
d		$\Delta f=12.8595$ $\sigma =2.0$ $\delta f=-3.9$	$\Delta f=26.2225$ $\sigma =2.1$ $\delta f=-4.45$	$\Delta f=39.4219$ $\sigma =1.9$ $\delta f=-5.4$
e	$\Delta f=12.8595$ $\sigma =1.6$ $\delta f=3.9$		$\Delta f=13.3592$ $\sigma =2.8$ $\delta f=-4.95$	$\Delta f=26.5583$ $\sigma =1.0$ $\delta f=-3.8$
f	$\Delta f=26.2314$ $\sigma =1.5$ $\delta f=4.45$	$\Delta f=13.3691$ $\sigma =0.7$ $\delta f=4.95$		$\Delta f=13.1965$ $\sigma =0.7$ $\delta f=-2.7$
g	$\Delta f=39.4327$ $\sigma =1.8$ $\delta f=5.4$	$\Delta f=26.5659$ $\sigma =1.0$ $\delta f=3.8$	$\Delta f=13.2019$ $\sigma =1.1$ $\delta f=2.7$	

Tablo E 4.1: BIPM 7 ve BIPM 4 Karşılaştırma Sonuçları

$$f(\text{Nr.1})-f(\text{Nr.2}) = -4.20 \text{ KHz.}$$

$$s = 0.96 \text{ KHz.}$$

$$V_R = 7 \cdot 10^{-12}$$



EK 4

Nr.1 : BIPM 7 (124 Nr.lı Hücre ile)

Nr.2 : BIPM 4

	Nr.1	Nr.2	
Modulasyon Genliği	: 6	6	MHz
Iyod Hücresinin Sıcaklığı	: 15	15	°C
Lazer Çıkış Gücü	: 123	121	μ W
Besleme Gerilimi	: 1.55	1.55	KV
Besleme Akımı	: 4.10	3.56	mA
Entegrasyon Süresi τ	: 3x10	3x10	s

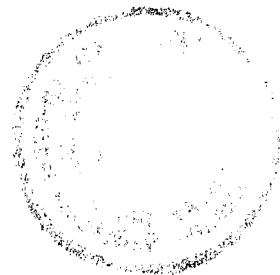
Nr.1/Nr.2	d	e	f	g
d		$\Delta f=12.8578$ $\sigma =1.37$ $\delta f=-5.25$	$\Delta f=26.2213$ $\sigma =0.45$ $\delta f=-5.55$	$\Delta f=39.4204$ $\sigma =1.08$ $\delta f=-5.8$
e	$\Delta f=12.8683$ $\sigma =0.68$ $\delta f=5.25$		$\Delta f=13.3588$ $\sigma =1.05$ $\delta f=-4.15$	$\Delta f=26.5564$ $\sigma =2.06$ $\delta f=-4.35$
f	$\Delta f=26.2324$ $\sigma =0.65$ $\delta f=5.55$	$\Delta f=13.3671$ $\sigma =1.18$ $\delta f=4.15$		$\Delta f=13.1942$ $\sigma =0.79$ $\delta f=-4.45$
g	$\Delta f=39.4320$ $\sigma =1.30$ $\delta f=5.8$	$\Delta f=26.5651$ $\sigma =1.30$ $\delta f=4.35$	$\Delta f=13.2031$ $\sigma =0.70$ $\delta f=4.45$	

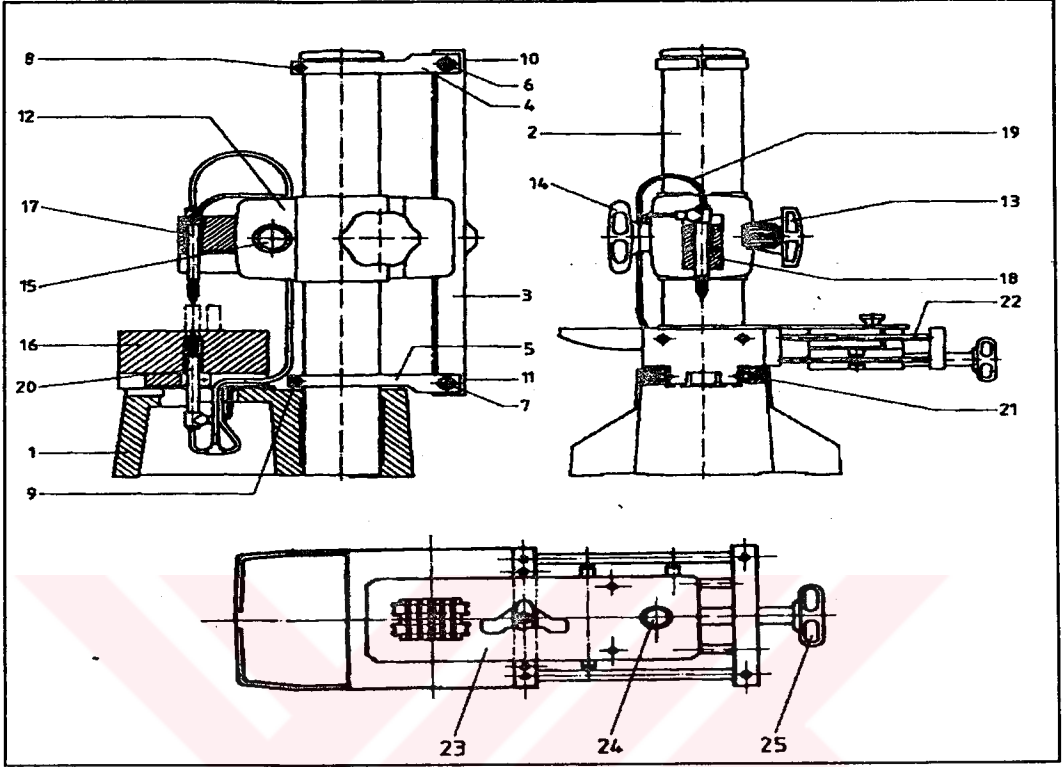
Tablo E 4.2: BIPM 7 ve BIPM 4 Karşılaştırma Sonuçları

$$f(Nr.1)-f(Nr.2) = -4.92 \text{ KHz.}$$

$$s = 0.70 \text{ KHz.}$$

$$V_R = 5 \cdot 10^{-12}$$

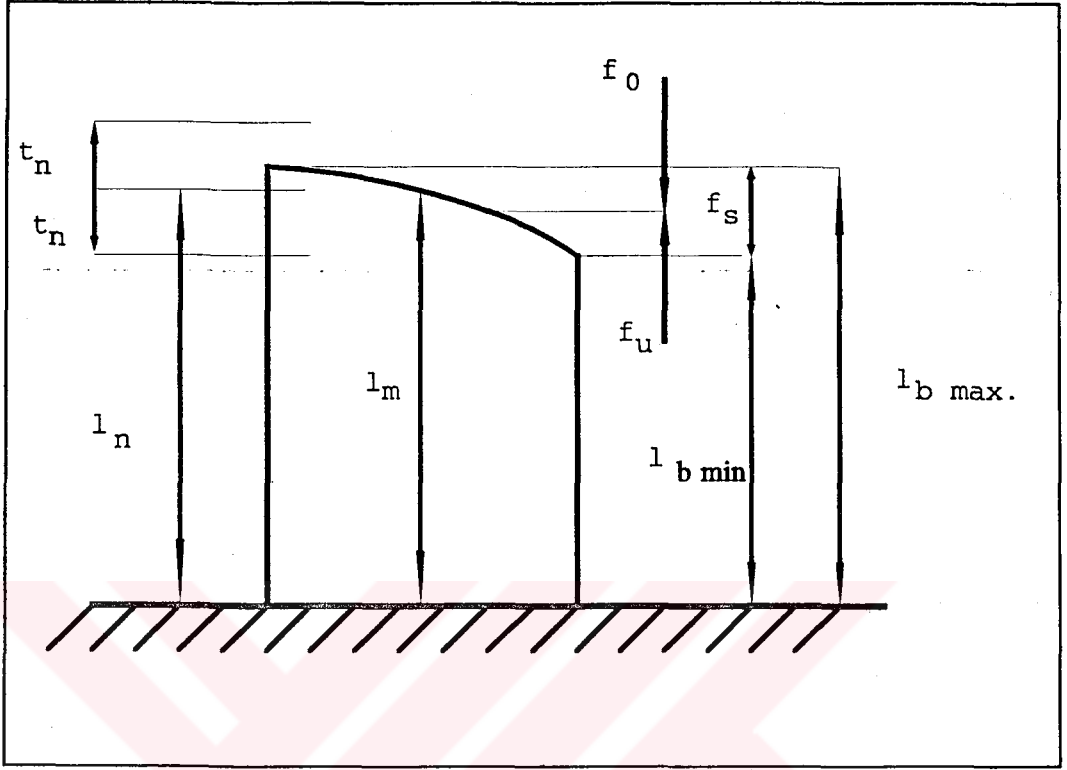




Şekil E 5.1 : Elektromekanik Ölçü Lokma Komparatörü

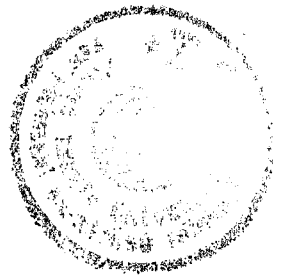
- | | | |
|---------------------|---------------------------------|------------------------|
| 1- Ana Gövde | 13- İnce Ayar Kolu | 25- Tabla Hareket Kolu |
| 2- Kolon | 14- Ayar Vidası | |
| 3- Dişli Mil | 15- İnce Ayar Vidası | |
| 4- Üst Flanş | 16- Ölçme Tablası | |
| 5- Alt Flanş | 17- Üst Ölçme Probu | |
| 6- Dişli Üst Vidası | 18- Prob Sıkıştırma Vidası | |
| 7- Dişli Alt Vidası | 19- Vakum Borusu | |
| 8- Flanş Üst Vidası | 20- Alt Ölçme Probu | |
| 9- Flanş Alt Vidası | 21- Ölçme Tablanın sıkma Vidası | |
| 10- Üst Ayar Vidası | 22- Master Transfer Aparatı | |
| 11- Alt Ayar Vidası | 23- Hareketli Tabla | |
| 12- Ölçme Kolu | 24- Tabla Değiştirme Vidası | |

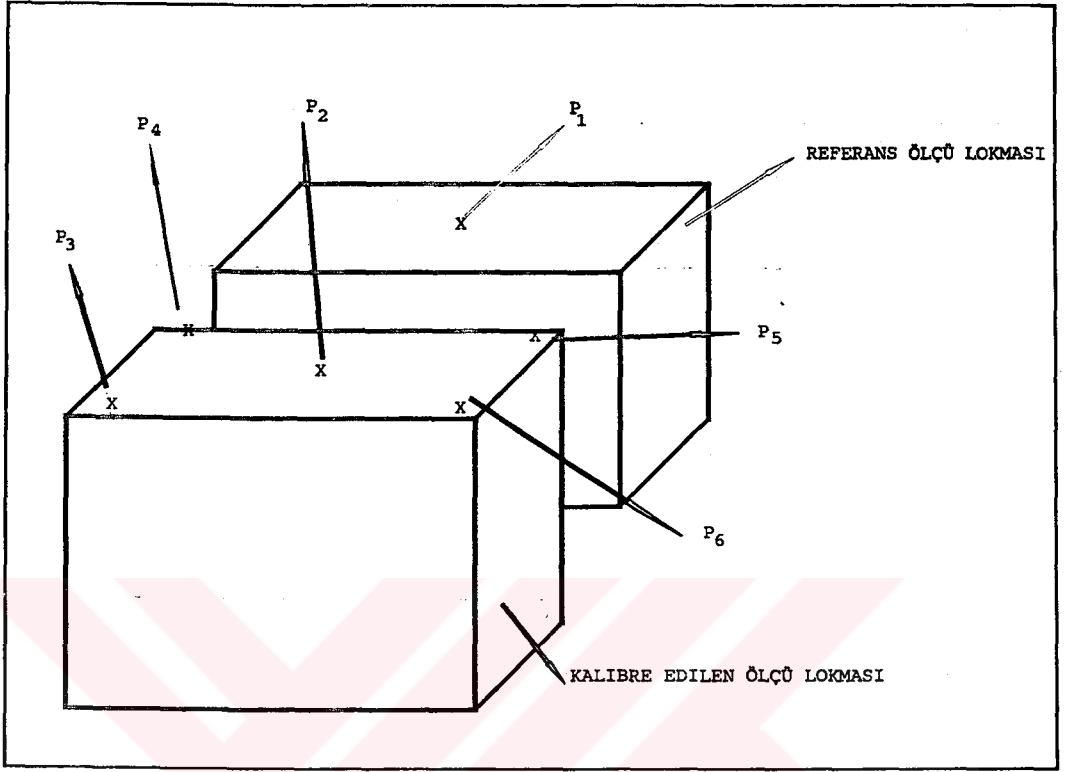




Şekil E 5.2 : Ölçü Lokmalarının Ölçümünde Kullanılan Terimlerin Şematik Gösterimi

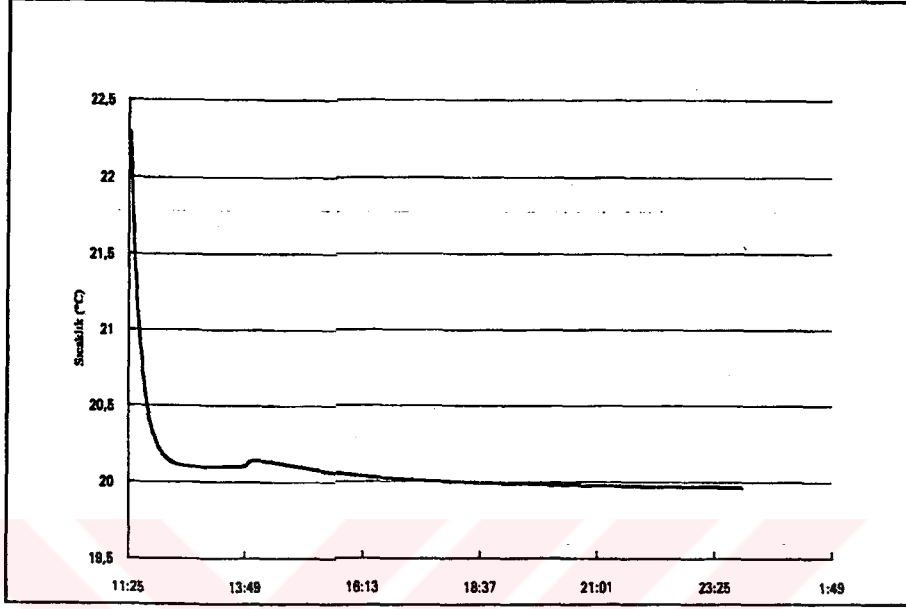
- l_m Ölçme Yüzeyinin orta noktasının ölçü lokmasının boyu,
- l_b Ölçme Yüzeyinin herhangi bir noktasında ölçü lokmasının boyu,
- f_u , l_b uzunluğunun sapma aralığı,
- l_n , Nominal boyut,
- $\pm t_n$ Müsaade edilen maksimum sapma,
- $f_s = l_{b \max} - l_{b \min}$,
- $f_0 = l_{b \max} - l_m$,
- $f_u = l_m - l_{b \min}$



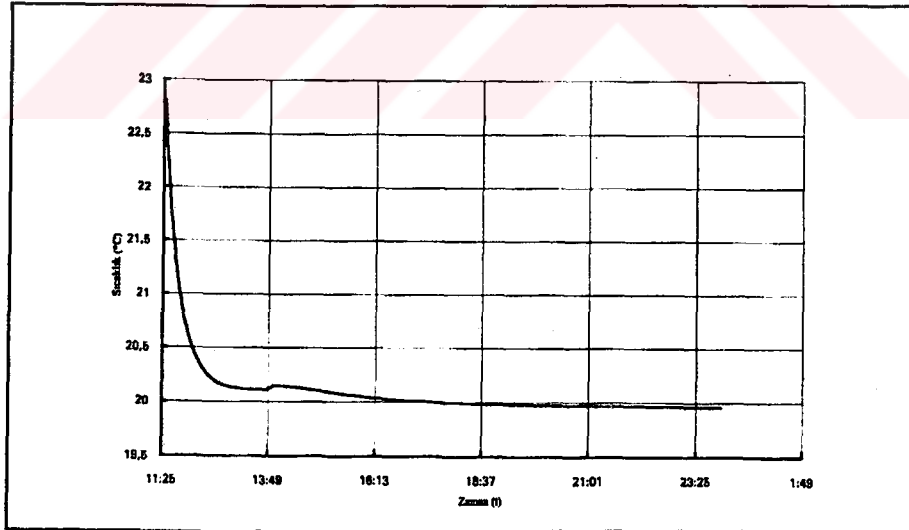


Şekil E 5.3 : Elektro- Mekanik Komparatör ile Yapılan Ölçümlerde, Ölçüm Noktalarının Şematik Gösterimi

- P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, P₆ : Ölçüm Noktaları

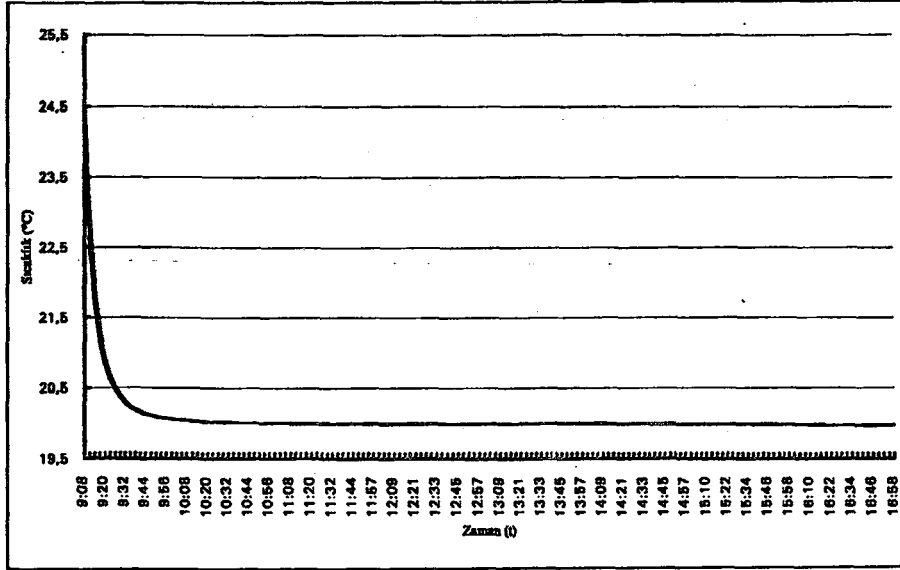


Şekil E 6.1: 15 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi

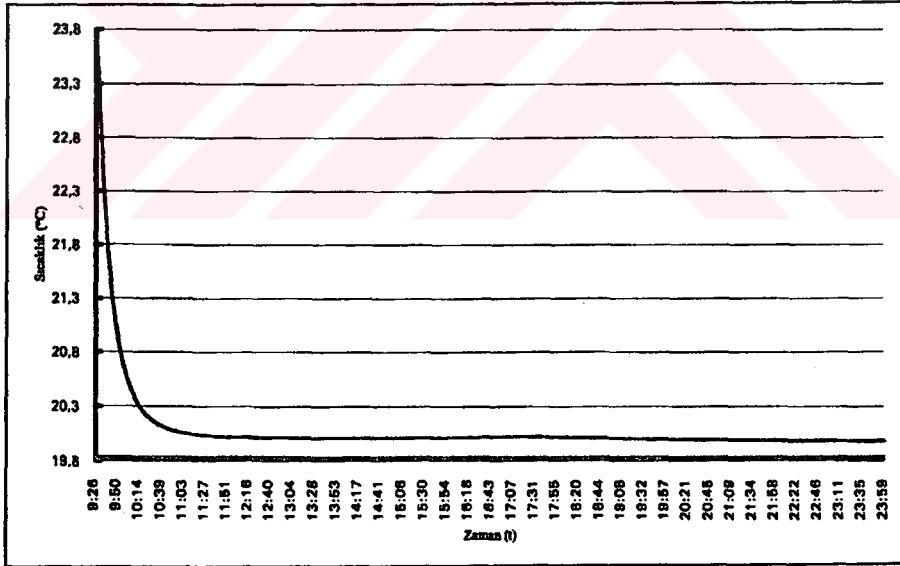


Şekil E 6.2: 20 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi





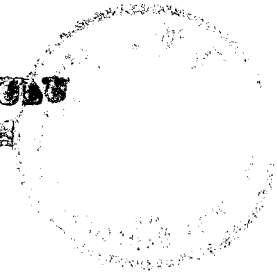
Şekil E 6.3: 25 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi

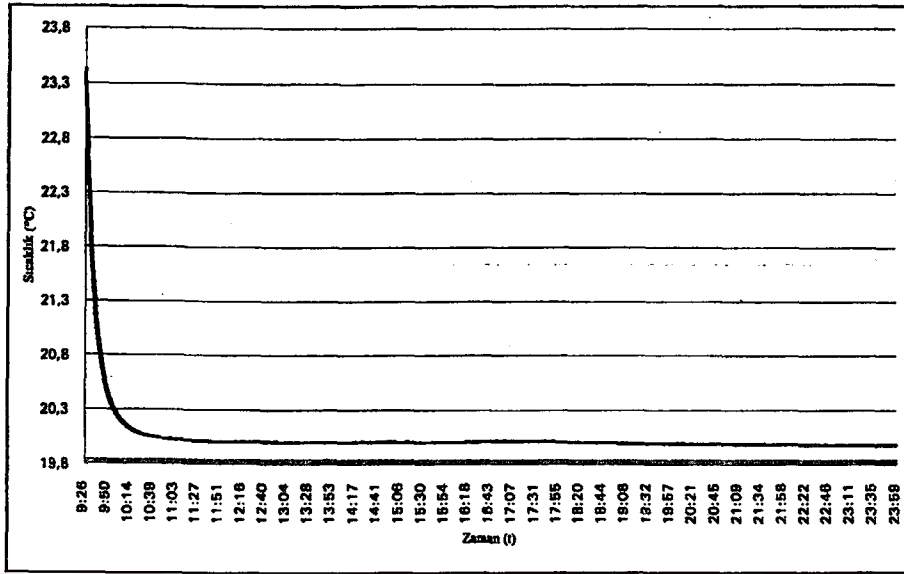


Şekil E 6.4: 50 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi

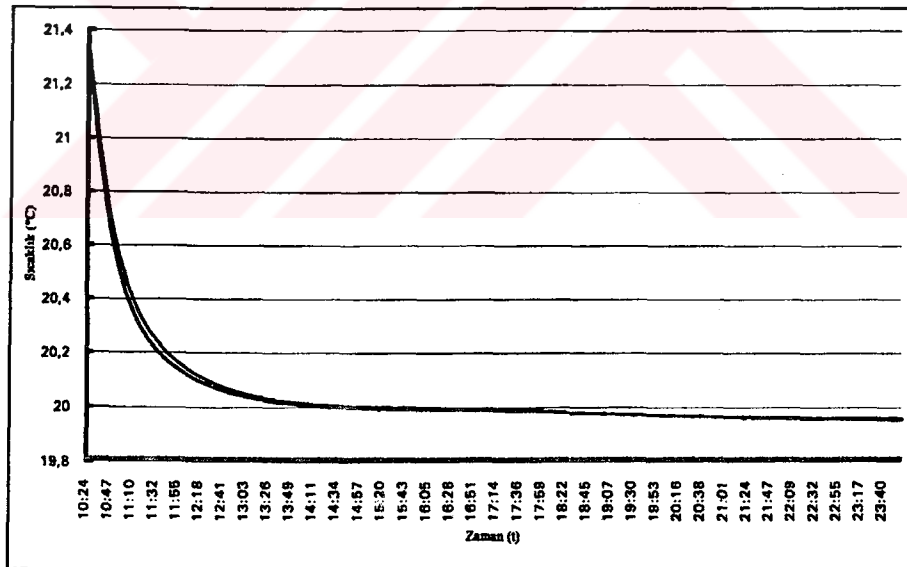
H.C. ZÜTÜ
DENEY

ŞEKİL E 6.3
DENEY



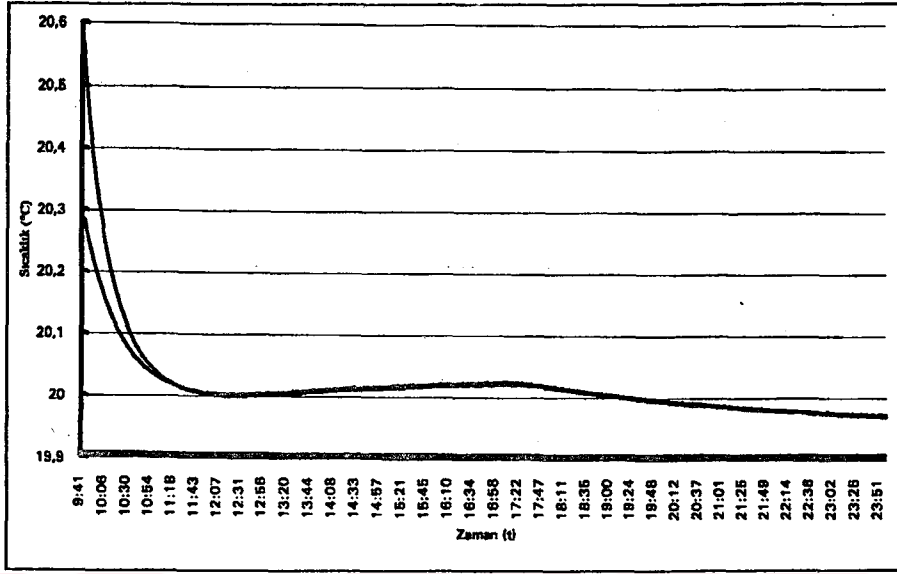


Şekil E 6.5: 100 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi

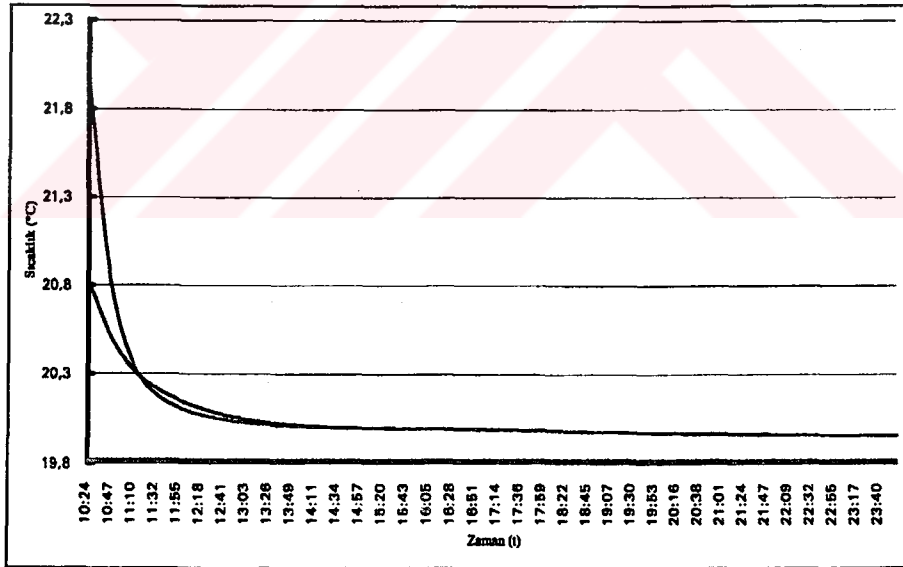


Şekil E 6.6: 200 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi



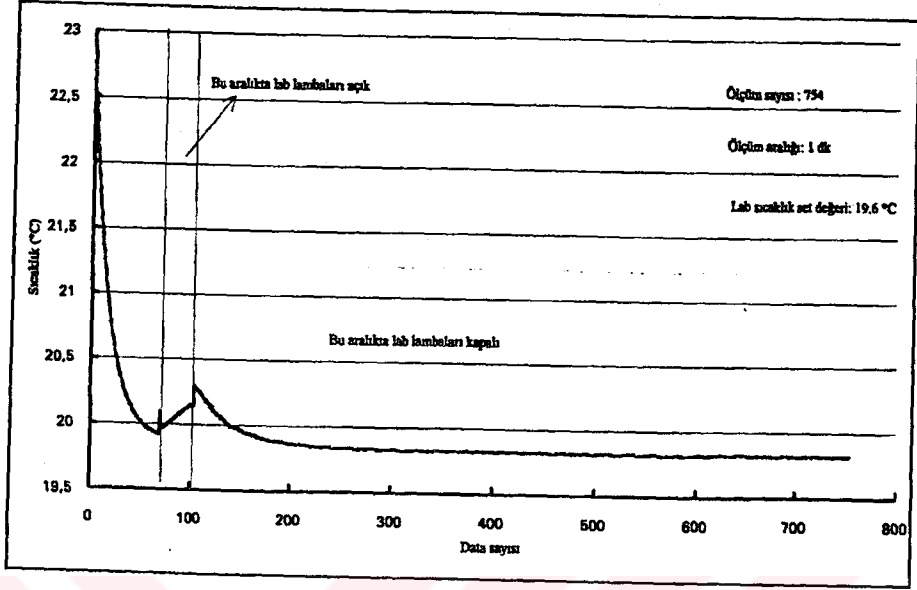


Şekil E 6.7: 300 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi

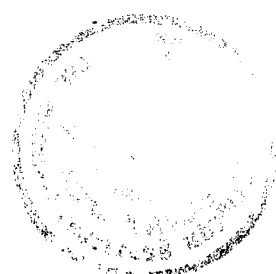


Şekil E 6.8: 500 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi





Şekil E 6.9: 1000 mm'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklık Stabilizasyon Eğrisi



δL (μm)	t ($^{\circ}C$)	δt ($t-20$) ($^{\circ}C$)
27.825	24.945	4.945
24.079	24.211	4.211
24.083	24.215	4.215
18.506	23.209	3.209
18.599	23.228	3.228
11.273	21.954	1.954
11.547	21.962	1.962
6.195	20.978	0.978
6.178	20.973	0.973
0.746	19.992	-0.008
0.580	19.962	-0.038
-4.248	19.085	-0.915
-4.827	18.982	-1.018
-9.705	18.090	-1.910
-9.481	18.134	-1.866
-14.977	17.133	-2.867
-14.747	17.175	-2.825
-20.678	16.091	-3.909
20.474	16.130	-3.870

Tablo E 7.1 : 500 mm 'lik Ölçü Lokmasının Sıcaklıkla Boyut Değişimi



EK 7

K	α_i	β_i	ϕ_i	$V(\phi)/\sigma^2$
0	0	0	1.14505	$0.5 \cdot 10 \cdot E^{-1}$
1	0.0642	0	5.49796	$0.58039 \cdot E^{-2}$
2	0.0871	8.61488	+0.001637	$0.79210 \cdot E^{-3}$
3	-0.3514	7.6152	-0.0003245	$0.10409 \cdot E^{-3}$
4	-0.3526	7.3219	-0.00037741	$0.14171 \cdot E^{-4}$
5	-0.00297	7.3448	-0.00025752	$0.207152 \cdot E^{-5}$
6	0.16990	6.84129	-0.00011779	$0.377261 \cdot E^{-6}$
7	0.30302	5.49095	-0.00001755	$0.755987 \cdot E^{-7}$
8	0.58385	4.99030	-0.0000102	$0.191995 \cdot E^{-7}$

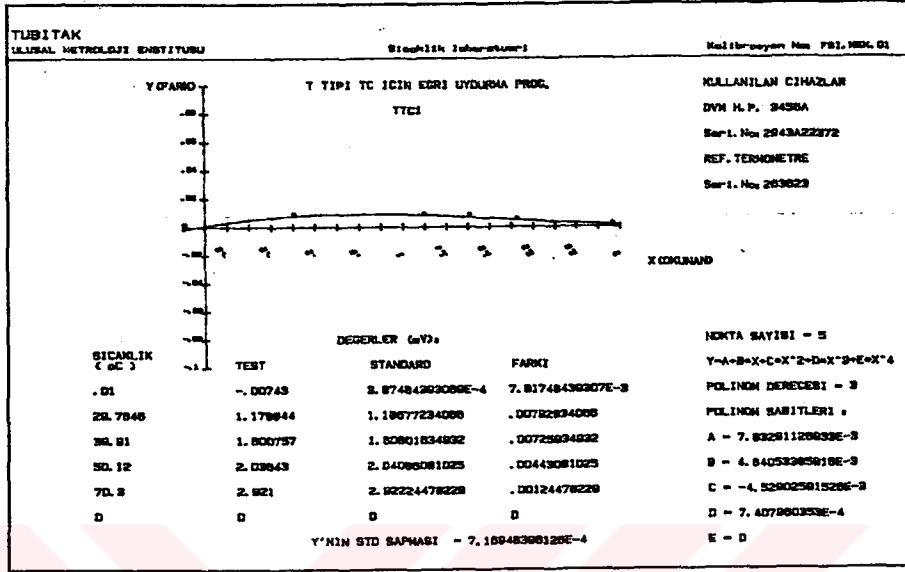
Tablo E 7.2 : Forstythe Polinomun Katsayıları

K	σ	$S(\phi)$	ϕ
1	0.0877	0.00668	5.49796
2	0.0891	0.00246	0.00164
3	0.0915	0.00093	-0.00032
4	0.0855	0.00032	-0.00038
5	0.811	0.00012	-0.00026
6	0.0652	0.00004	-0.00012
7	0.0653	0.00002	-0.00002
8	0.0644	0.00001	-0.00001

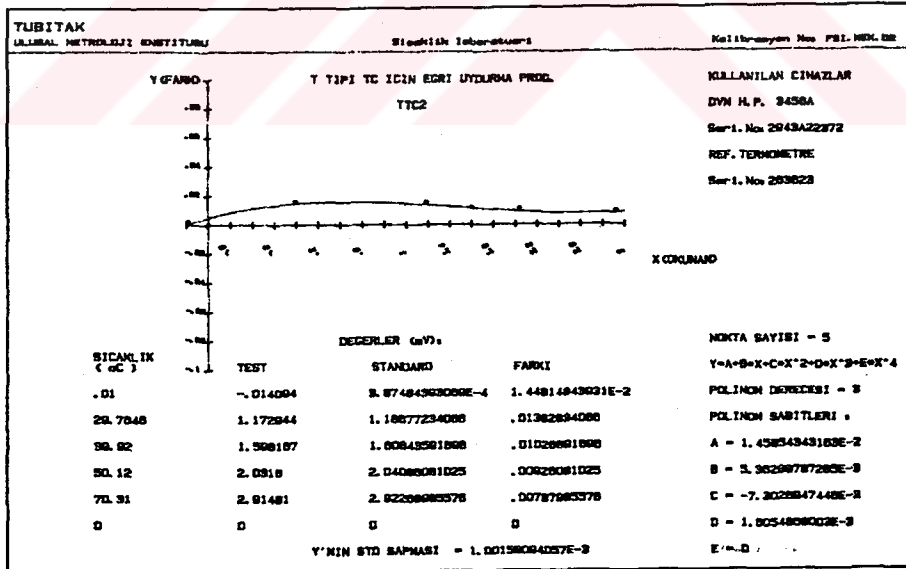
Tablo E 7.3 : Forsythe Polinomu ile Hesaplanan Standart Sapma Değerleri



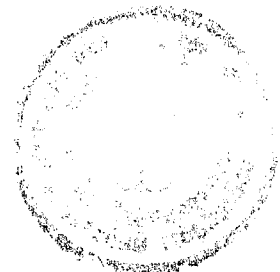
EK 8



Şekil E 8.1 : 1.ci T Tipi Isılçiftin Kalibrasyon Eğrisi



Şekil E 8.2 : 2.ci T Tipi Isılçiftin Kalibrasyon Eğrisi



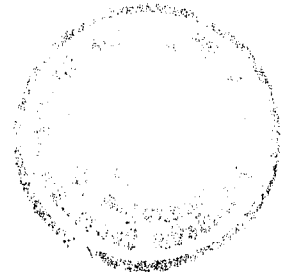
TTC1 seri nolu ısılcıftı için

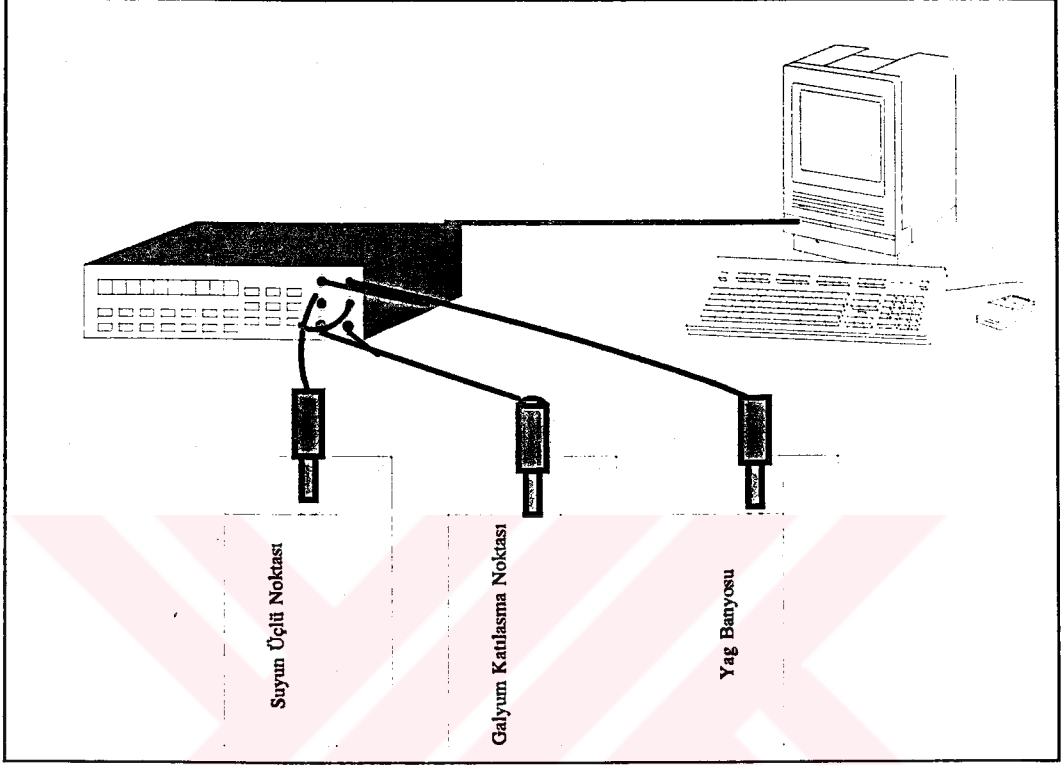
Sıcaklık değeri (°C)	EMF değeri (mV)
0.01	-0.00743
29.7646	1.178844
39.91	1.600757
50.12	2.03643
70.30	2.92100

TTC2 seri nolu ısılcıftı için

Sıcaklık değeri (°C)	EMF değeri (mV)
0.01	-0.014094
29.7646	1.172944
39.92	1.598167
50.12	2.03160
70.31	2.91481

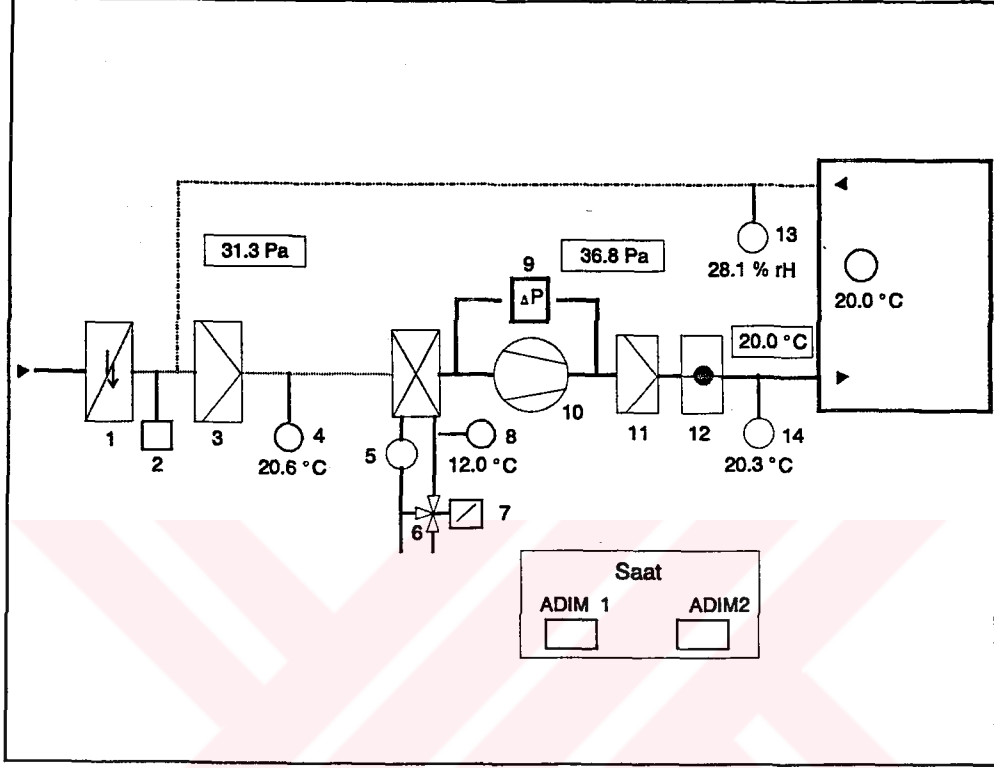
Tablo E 8.1 : 1.ci ve 2.ci T Tipi ısılcıftların Kalibrasyon Sonuçları





Şekil E 8.3: Isılçiftlerin Kalibrasyon Düzenegİ





Şekil E 9.1 : UME Laboratuvarlarında Kullanılan İklimlendirme Sisteminin Şematik Gösterimi

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 1. Isıtıcı, | 8. Soğuk Su Sıcaklık Sensörü, |
| 2. Isıtıcı Güvenlik Termostadı, | 9. Vantilatör Basınç Kontrolü, |
| 3. Filtre, | 10. Vantilatör, |
| 4. Giriş Hava Sıcaklık Sensörü, | 11. Filtre, |
| 5. Soğuk Su Pompası, | 12. Yangın Damperi, |
| 6. Üç Yollu Vana | 13. Nem Sensörü, |
| 7. Üç Yollu Vana Motoru, | 14. Besleme Hava Sensörü, |



EK 10

UME'de Yapılan Fark Frekans Ölçüm Sonuçları

PHILIPS, TimeView V1.10, PM6680 REF. Laser i Component
 # FREQUENCY A Ç.F. Lazer Vertical Mode
 # Mon Sep 26 05:15:09 1994
 # Measuring time interval: 100.00s Single: Off
 # Input A: Auto, 50Ω, AC, X1, Pos Filter: On
 # Input B: Auto, 1MΩ, AC, X1, Pos Common: Off
 # Ext.arm: On Ref.osc: Internal
 # Hold off: Off Statistics: On

Time [s]	Frequency[MHz]
0.000000000000e+000	2.059773140955e+008
1.000004653931e+002	2.060369160056e+008
2.000009307861e+002	2.060779360421e+008
3.000013961792e+002	2.063457942787e+008
4.000018615723e+002	2.060408166882e+008
5.000023269653e+002	2.063691069634e+008
6.000027923584e+002	2.065955290309e+008
7.000032577515e+002	2.063675849877e+008
8.000037231445e+002	2.061998925938e+008
9.000041885376e+002	2.062835534496e+008
1.000004653931e+003	2.062093715416e+008
1.100005119324e+003	2.062862348904e+008
1.200005584717e+003	2.064833270707e+008
1.300006050110e+003	2.064717081923e+008
1.400006515503e+003	2.062440664289e+008
1.500006980896e+003	2.064924069816e+008
1.600007446289e+003	2.067208709842e+008
1.700007911682e+003	2.066386418676e+008
1.800008377075e+003	2.066881883866e+008
1.900008842468e+003	2.065393127596e+008
2.000009307861e+003	2.065291562100e+008



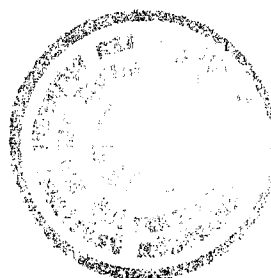
EK 10

2.100009773254e+003 2.066058978489e+008
2.200010238647e+003 2.065911534298e+008
2.300010704041e+003 2.065733243169e+008
2.400011169434e+003 2.064996257411e+008
2.500011634827e+003 2.064729147598e+008
2.600012100220e+003 2.066990843737e+008
2.700012565613e+003 2.068529155278e+008
2.800013031006e+003 2.067017737103e+008
2.900013496399e+003 2.065907035674e+008
3.000013961792e+003 2.066595203206e+008
3.100014427185e+003 2.067459016107e+008
3.200014892578e+003 2.067145804425e+008
3.300015357971e+003 2.068063386116e+008
3.400015823364e+003 2.069940977811e+008
3.500016288757e+003 2.071439594631e+008
3.600016754150e+003 2.072504465887e+008
3.700017219543e+003 2.073106753173e+008
3.800017684937e+003 2.073642334359e+008
3.900018150330e+003 2.073878686610e+008
4.000018615723e+003 2.073675713657e+008
4.100019081116e+003 2.072731436005e+008
4.200019546509e+003 2.074294604823e+008
4.300020011902e+003 2.073235392387e+008
4.400020477295e+003 2.073464119694e+008
4.500020942688e+003 2.074141515678e+008
4.600021408081e+003 2.074203601048e+008
4.700021873474e+003 2.075474437905e+008
4.800022338867e+003 2.076024512340e+008
4.900022804260e+003 2.075382541109e+008
5.000023269653e+003 2.075314723052e+008
5.100023735046e+003 2.074632172365e+008
5.200024200439e+003 2.074380599396e+008



EK 10

5.300024665833e+003 2.073245083733e+008
5.400025131226e+003 2.072885928640e+008
5.500025596619e+003 2.072647067185e+008
5.600026062012e+003 2.072986747776e+008
5.700026527405e+003 2.073426818506e+008
5.800026992798e+003 2.072672949385e+008
5.900027458191e+003 2.073048952937e+008
6.000027923584e+003 2.072009824706e+008
6.100028388977e+003 2.072361996941e+008
6.200028854370e+003 2.072076729538e+008
6.300029319763e+003 2.072125768267e+008
6.400029785156e+003 2.071638298913e+008
6.500030250549e+003 2.071632294881e+008
6.600030715942e+003 2.072555129946e+008
6.700031181335e+003 2.072855456861e+008
6.800031646729e+003 2.073554691856e+008
6.900032112122e+003 2.073005506802e+008
7.000032577515e+003 2.072953458541e+008
7.100033042908e+003 2.072950060398e+008
7.200033508301e+003 2.073290265503e+008
7.300033973694e+003 2.072480337679e+008
7.400034439087e+003 2.072377578393e+008
7.500034904480e+003 2.071453591706e+008
7.600035369873e+003 2.071773805275e+008
7.700035835266e+003 2.071299501147e+008
7.800036300659e+003 2.071432396327e+008
7.900036766052e+003 2.072725028886e+008
8.000037231445e+003 2.072426063473e+008
8.100037696838e+003 2.072922582971e+008
8.200038162231e+003 2.072949713433e+008
8.300038627625e+003 2.070921833684e+008
8.400039093018e+003 2.069740397644e+008



EK 10

8.500039558411e+003 2.069482397331e+008
8.600040023804e+003 2.070118737739e+008
8.700040489197e+003 2.071178275819e+008
8.800040954590e+003 2.071460694238e+008
8.900041419983e+003 2.071875138961e+008
9.000041885376e+003 2.073014956745e+008
9.100042350769e+003 2.073048586991e+008
9.200042816162e+003 2.073112373196e+008
9.300043281555e+003 2.074022223196e+008
9.400043746948e+003 2.074144371155e+008
9.500044212341e+003 2.075079852299e+008
9.600044677734e+003 2.074719832817e+008
9.700045143127e+003 2.074817533076e+008
9.800045608521e+003 2.073625486900e+008
9.900046073914e+003 2.074988648171e+008
1.000004653931e+004 2.074618292428e+008
1.010004700470e+004 2.073447477744e+008
1.020004747009e+004 2.072585828709e+008
1.030004793549e+004 2.071672971663e+008
1.040004840088e+004 2.072624892046e+008
1.050004886627e+004 2.073209163845e+008
1.060004933167e+004 2.072450971333e+008
1.070004979706e+004 2.073266193946e+008
1.080005026245e+004 2.072515336325e+008
1.090005072784e+004 2.072299094000e+008
1.100005119324e+004 2.072108375762e+008
1.110005165863e+004 2.070969698174e+008
1.120005212402e+004 2.070790783835e+008
1.130005258942e+004 2.071430090767e+008
1.140005305481e+004 2.069893632177e+008
1.150005352020e+004 2.069584823707e+008
1.160005398560e+004 2.069675588306e+008



EK 10

1.170005445099e+004 2.070010062995e+008
1.180005491638e+004 2.070191175340e+008
1.190005538177e+004 2.069540897001e+008
1.200005584717e+004 2.070420448415e+008
1.210005631256e+004 2.070181624190e+008
1.220005677795e+004 2.070215471920e+008
1.230005724335e+004 2.069863609007e+008
1.240005770874e+004 2.070172121410e+008
1.250005817413e+004 2.069727774546e+008
1.260005863953e+004 2.069866220509e+008
1.270005910492e+004 2.069712565881e+008
1.280005957031e+004 2.068683680887e+008
1.290006003571e+004 2.067016848714e+008
1.300006050110e+004 2.066871196125e+008
1.310006096649e+004 2.065813523651e+008
1.320006143188e+004 2.066636392667e+008
1.330006189728e+004 2.067804757783e+008
1.340006236267e+004 2.066922600080e+008
1.350006282806e+004 2.067230980152e+008
1.360006329346e+004 2.068347794851e+008
1.370006375885e+004 2.067333059793e+008
1.380006422424e+004 2.068138358190e+008
1.390006468964e+004 2.067974649184e+008
1.400006515503e+004 2.067829068941e+008
1.410006562042e+004 2.068730324349e+008
1.420006608582e+004 2.068306430710e+008
1.430006655121e+004 2.068164754930e+008
1.440006701660e+004 2.068226451716e+008
1.450006748199e+004 2.068263486381e+008
1.460006794739e+004 2.068640222775e+008
1.470006841278e+004 2.070276652070e+008
1.480006887817e+004 2.071628972924e+008



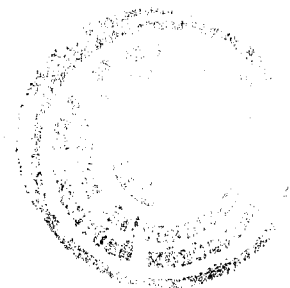
EK 10

1.490006934357e+004 2.072347667909e+008
1.500006980896e+004 2.072839720802e+008
1.510007027435e+004 2.072414798423e+008
1.520007073975e+004 2.072726058007e+008
1.530007120514e+004 2.072517443720e+008
1.540007167053e+004 2.071315257534e+008
1.550007213593e+004 2.070061525566e+008
1.560007260132e+004 2.068980750784e+008
1.570007306671e+004 2.069601021114e+008
1.580007353210e+004 2.069383623617e+008
1.590007399750e+004 2.068803760450e+008
1.600007446289e+004 2.069323160181e+008
1.610007492828e+004 2.069723560351e+008
1.620007539368e+004 2.070579250168e+008
1.630007585907e+004 2.070567080554e+008
1.640007632446e+004 2.070142951941e+008
1.650007678986e+004 2.069997345545e+008
1.660007725525e+004 2.069577402112e+008
1.670007772064e+004 2.069175209472e+008
1.680007818604e+004 2.069404089160e+008
1.690007865143e+004 2.069546714995e+008
1.700007911682e+004 2.069104699259e+008
1.710007958221e+004 2.068788674453e+008
1.720008004761e+004 2.068835914485e+008
1.730008051300e+004 2.068053764161e+008
1.740008097839e+004 2.067878642270e+008
1.750008144379e+004 2.068525881748e+008
1.760008190918e+004 2.068157361936e+008
1.770008237457e+004 2.068300261723e+008
1.780008283997e+004 2.067671970363e+008
1.790008330536e+004 2.068371215972e+008
1.800008377075e+004 2.069859605113e+008



EK 10

1.810008423615e+004 2.070264938725e+008
1.820008470154e+004 2.070329519332e+008
1.830008516693e+004 2.071263599787e+008
1.840008563232e+004 2.070288682535e+008
1.850008609772e+004 2.069645029551e+008
1.860008656311e+004 2.071101312583e+008
1.870008702850e+004 2.071589775634e+008
1.880008749390e+004 2.070426337675e+008
1.890008795929e+004 2.071792306176e+008
1.900008842468e+004 2.072474937352e+008
1.910008889008e+004 2.071902690960e+008
1.920008935547e+004 2.072048876164e+008
1.930008982086e+004 2.072027034598e+008
1.940009028625e+004 2.071239416119e+008
1.950009075165e+004 2.071352805306e+008
1.960009121704e+004 2.070748120300e+008
1.970009168243e+004 2.070635297289e+008
1.980009214783e+004 2.070227479563e+008
1.990009261322e+004 2.070047362991e+008
2.000009307861e+004 2.070425376801e+008
2.010009354401e+004 2.070040693494e+008
2.020009400940e+004 2.070777020194e+008
2.030009447479e+004 2.071746766184e+008
2.040009494019e+004 2.071997761342e+008
2.050009540558e+004 2.070533350956e+008
2.060009587097e+004 2.070788703792e+008
2.070009633636e+004 2.070645129759e+008
2.080009680176e+004 2.072539080458e+008
2.090009726715e+004 2.073351822339e+008
2.100009773254e+004 2.073868207604e+008
2.110009819794e+004 2.073250249495e+008
2.120009866333e+004 2.073508601115e+008



EK 10

2.130009912872e+004 2.072702654729e+008
2.140009959412e+004 2.072310133704e+008
2.150010005951e+004 2.073304619404e+008
2.160010052490e+004 2.073745858243e+008
2.170010099030e+004 2.073485019801e+008
2.180010145569e+004 2.073366170018e+008
2.190010192108e+004 2.073762996097e+008
2.200010238647e+004 2.073875682787e+008
2.210010285187e+004 2.072940460971e+008
2.220010331726e+004 2.072638977311e+008
2.230010378265e+004 2.074267945372e+008
2.240010424805e+004 2.074343164067e+008
2.250010471344e+004 2.075177791128e+008
2.260010517883e+004 2.074826135405e+008
2.270010564423e+004 2.074220333550e+008
2.280010610962e+004 2.074311825031e+008
2.290010657501e+004 2.072793543081e+008
2.300010704041e+004 2.071597044673e+008
2.310010750580e+004 2.072723069472e+008
2.320010797119e+004 2.073328009254e+008
2.330010843658e+004 2.073134835679e+008
2.340010890198e+004 2.073013247791e+008
2.350010936737e+004 2.071318981969e+008
2.360010983276e+004 2.071885828152e+008
2.370011029816e+004 2.072105478752e+008
2.380011076355e+004 2.072310139924e+008
2.390011122894e+004 2.073875554930e+008
2.400011169434e+004 2.074195665134e+008
2.410011215973e+004 2.075672657054e+008
2.420011262512e+004 2.075579751008e+008
2.430011309052e+004 2.076325828796e+008
2.440011355591e+004 2.077910766942e+008



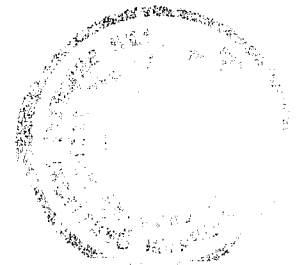
EK 10

2.450011402130e+004 2.075477071043e+008
2.460011448669e+004 2.075032132000e+008
2.470011495209e+004 2.077108934788e+008
2.480011541748e+004 2.076440439100e+008
2.490011588287e+004 2.077228785135e+008
2.500011634827e+004 2.077339500728e+008
2.510011681366e+004 2.077667930323e+008
2.520011727905e+004 2.075989726388e+008
2.530011774445e+004 2.076530844200e+008
2.540011820984e+004 2.077653094335e+008
2.550011867523e+004 2.076375158665e+008
2.560011914063e+004 2.078788060017e+008
2.570011960602e+004 2.079910307170e+008
2.580012007141e+004 2.079715019769e+008
2.590012053680e+004 2.080411768349e+008
2.600012100220e+004 2.080587160405e+008
2.610012146759e+004 2.081173442867e+008
2.620012193298e+004 2.080614397025e+008
2.630012239838e+004 2.081230374086e+008
2.640012286377e+004 2.081040199085e+008
2.650012332916e+004 2.079985317936e+008
2.660012379456e+004 2.077810955032e+008
2.670012425995e+004 2.078885181608e+008
2.680012472534e+004 2.078001242363e+008
2.690012519073e+004 2.077640060826e+008
2.700012565613e+004 2.078748255405e+008
2.710012612152e+004 2.079661618022e+008
2.720012658691e+004 2.080028614792e+008
2.730012705231e+004 2.080367130251e+008
2.740012751770e+004 2.080437329730e+008
2.750012798309e+004 2.078347298654e+008
2.760012844849e+004 2.079654614434e+008



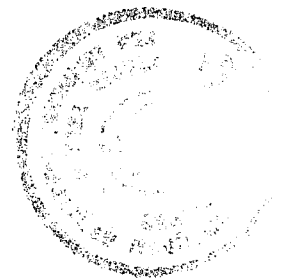
EK 10

2.770012891388e+004 2.078206988144e+008
2.780012937927e+004 2.078520222927e+008
2.790012984467e+004 2.078470906530e+008
2.800013031006e+004 2.079876627399e+008
2.810013077545e+004 2.081262942093e+008
2.820013124084e+004 2.082954834380e+008
2.830013170624e+004 2.081840216545e+008
2.840013217163e+004 2.080799850830e+008
2.850013263702e+004 2.079138368382e+008
2.860013310242e+004 2.078885877118e+008
2.870013356781e+004 2.079122792443e+008
2.880013403320e+004 2.079888678174e+008
2.890013449860e+004 2.079787793827e+008
2.900013496399e+004 2.080401359751e+008
2.910013542938e+004 2.081407860764e+008
2.920013589478e+004 2.080911279746e+008
2.930013636017e+004 2.082082351667e+008
2.940013682556e+004 2.081612076272e+008
2.950013729095e+004 2.083316179709e+008
2.960013775635e+004 2.084660394601e+008
2.970013822174e+004 2.086004189390e+008
2.980013868713e+004 2.086992808710e+008
2.990013915253e+004 2.086999726551e+008
3.000013961792e+004 2.086856621125e+008
3.010014008331e+004 2.086194924707e+008
3.020014054871e+004 2.086245067428e+008
3.030014101410e+004 2.083900493808e+008
3.040014147949e+004 2.082878331341e+008
3.050014194489e+004 2.083365434646e+008
3.060014241028e+004 2.084657786025e+008
3.070014287567e+004 2.086654859642e+008
3.080014334106e+004 2.085180671556e+008



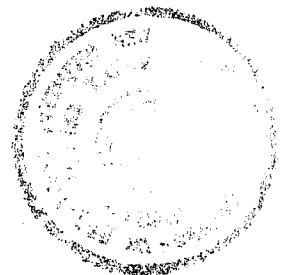
EK 10

3.090014380646e+004 2.083919845526e+008
3.100014427185e+004 2.085075231655e+008
3.110014473724e+004 2.087938350382e+008
3.120014520264e+004 2.087584291542e+008
3.130014566803e+004 2.087126646467e+008
3.140014613342e+004 2.086675159318e+008
3.150014659882e+004 2.085888550761e+008
3.160014706421e+004 2.086632612455e+008
3.170014752960e+004 2.088579144003e+008
3.180014799500e+004 2.087622721466e+008
3.190014846039e+004 2.087510830290e+008
3.200014892578e+004 2.087877403686e+008
3.210014939117e+004 2.088227298118e+008
3.220014985657e+004 2.088274634242e+008
3.230015032196e+004 2.088649340685e+008
3.240015078735e+004 2.088429455939e+008
3.250015125275e+004 2.085924332510e+008
3.260015171814e+004 2.085793893744e+008
3.270015218353e+004 2.085272640862e+008
3.280015264893e+004 2.085417895352e+008
3.290015311432e+004 2.087501360522e+008
3.300015357971e+004 2.089314124330e+008
3.310015404510e+004 2.088126468234e+008
3.320015451050e+004 2.087437406772e+008
3.330015497589e+004 2.086003369289e+008
3.340015544128e+004 2.086110901279e+008
3.350015590668e+004 2.087588620704e+008
3.360015637207e+004 2.088437364916e+008
3.370015683746e+004 2.089659888566e+008
3.380015730286e+004 2.091132370926e+008
3.390015776825e+004 2.092349821403e+008
3.400015823364e+004 2.090929088645e+008



EK 10

3.410015869904e+004 2.091830858422e+008
3.420015916443e+004 2.091963169510e+008
3.430015962982e+004 2.091532666893e+008
3.440016009521e+004 2.092342378456e+008
3.450016056061e+004 2.093070243154e+008
3.460016102600e+004 2.092421089568e+008
3.470016149139e+004 2.092573571453e+008
3.480016195679e+004 2.092704708358e+008
3.490016242218e+004 2.093989163883e+008
3.500016288757e+004 2.096797609211e+008
3.510016335297e+004 2.097085250432e+008
3.520016381836e+004 2.095668568713e+008
3.530016428375e+004 2.094933807928e+008
3.540016474915e+004 2.093123533168e+008
3.550016521454e+004 2.092218612408e+008
3.560016567993e+004 2.091911791590e+008
3.570016614532e+004 2.092802292953e+008
3.580016661072e+004 2.092980473707e+008
3.590016707611e+004 2.094119268186e+008
3.600016754150e+004 2.093871916680e+008
3.610016800690e+004 2.095387157498e+008
3.620016847229e+004 2.094945009554e+008
3.630016893768e+004 2.094053050387e+008
3.640016940308e+004 2.094295098472e+008
3.650016986847e+004 2.095603730208e+008
3.660017033386e+004 2.094521004956e+008
3.670017079926e+004 2.093284138652e+008
3.680017126465e+004 2.093817020692e+008
3.690017173004e+004 2.094439085954e+008
3.700017219543e+004 2.094692701524e+008
3.710017266083e+004 2.094776657487e+008
3.720017312622e+004 2.093690307353e+008



EK 10

3.730017359161e+004 2.091634330080e+008
3.740017405701e+004 2.091041637414e+008
3.750017452240e+004 2.089928125915e+008
3.760017498779e+004 2.089858886776e+008
3.770017545319e+004 2.091095002040e+008
3.780017591858e+004 2.092338958488e+008
3.790017638397e+004 2.093843734695e+008
3.800017684937e+004 2.094612678421e+008
3.810017731476e+004 2.094407880995e+008
3.820017778015e+004 2.093692206519e+008
3.830017824554e+004 2.094024163160e+008
3.840017871094e+004 2.092312410461e+008
3.850017917633e+004 2.092145111005e+008
3.860017964172e+004 2.093442540620e+008
3.870018010712e+004 2.096261566472e+008
3.880018057251e+004 2.096072048685e+008
3.890018103790e+004 2.095324176463e+008
3.900018150330e+004 2.094036251279e+008
3.910018196869e+004 2.092809747030e+008
3.920018243408e+004 2.093854735671e+008
3.930018289948e+004 2.094193655432e+008
3.940018336487e+004 2.092655748386e+008
3.950018383026e+004 2.092054458026e+008
3.960018429565e+004 2.093479958316e+008
3.970018476105e+004 2.094537817816e+008
3.980018522644e+004 2.094349410783e+008
3.990018569183e+004 2.094525382972e+008
4.000018615723e+004 2.096553171931e+008
4.010018662262e+004 2.095066144991e+008
4.020018708801e+004 2.093898682364e+008
4.030018755341e+004 2.093011751262e+008
4.040018801880e+004 2.094691612333e+008

EK 10

4.050018848419e+004 2.096410802957e+008
 4.060018894958e+004 2.096634178066e+008
 4.070018941498e+004 2.097128293553e+008
 4.080018988037e+004 2.097459974855e+008
 4.090019034576e+004 2.097030142773e+008
 4.100019081116e+004 2.097458740583e+008
 4.110019127655e+004 2.097467558135e+008
 4.120019174194e+004 2.097001349207e+008
 4.130019220734e+004 2.095683603633e+008
 4.140019267273e+004 2.096137926121e+008
 4.150019313812e+004 2.094637710815e+008
 4.160019360352e+004 2.095232760444e+008
 4.170019406891e+004 2.094009533549e+008
 4.180019453430e+004 2.093152152873e+008
 4.190019499969e+004 2.094179426518e+008
 4.200019546509e+004 2.094682132718e+008
 4.210019593048e+004 2.093750309837e+008
 4.220019639587e+004 2.094972786437e+008
 4.230019686127e+004 2.095763651122e+008
 4.240019732666e+004 2.096343628995e+008
 4.250019779205e+004 2.095230543792e+008
 4.260019825745e+004 2.094024663380e+008
 4.270019872284e+004 2.092150872284e+008
 4.280019918823e+004 2.092718958253e+008
 4.290019965363e+004 2.093019227942e+008
 4.300020011902e+004 2.094710615052e+008
 4.310020058441e+004 2.094747096246e+008

Frequency Difference

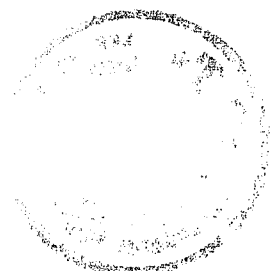
Allan Variance

Std.Deviation

2.0783124 MHz

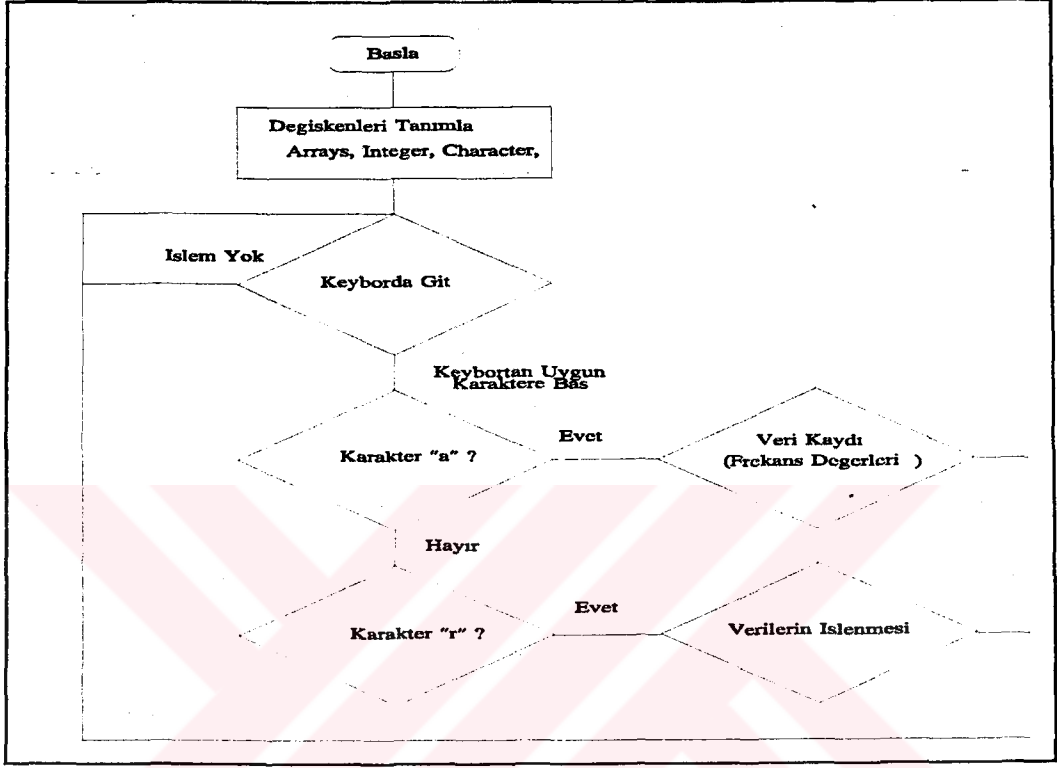
8 kHz

100 kHz

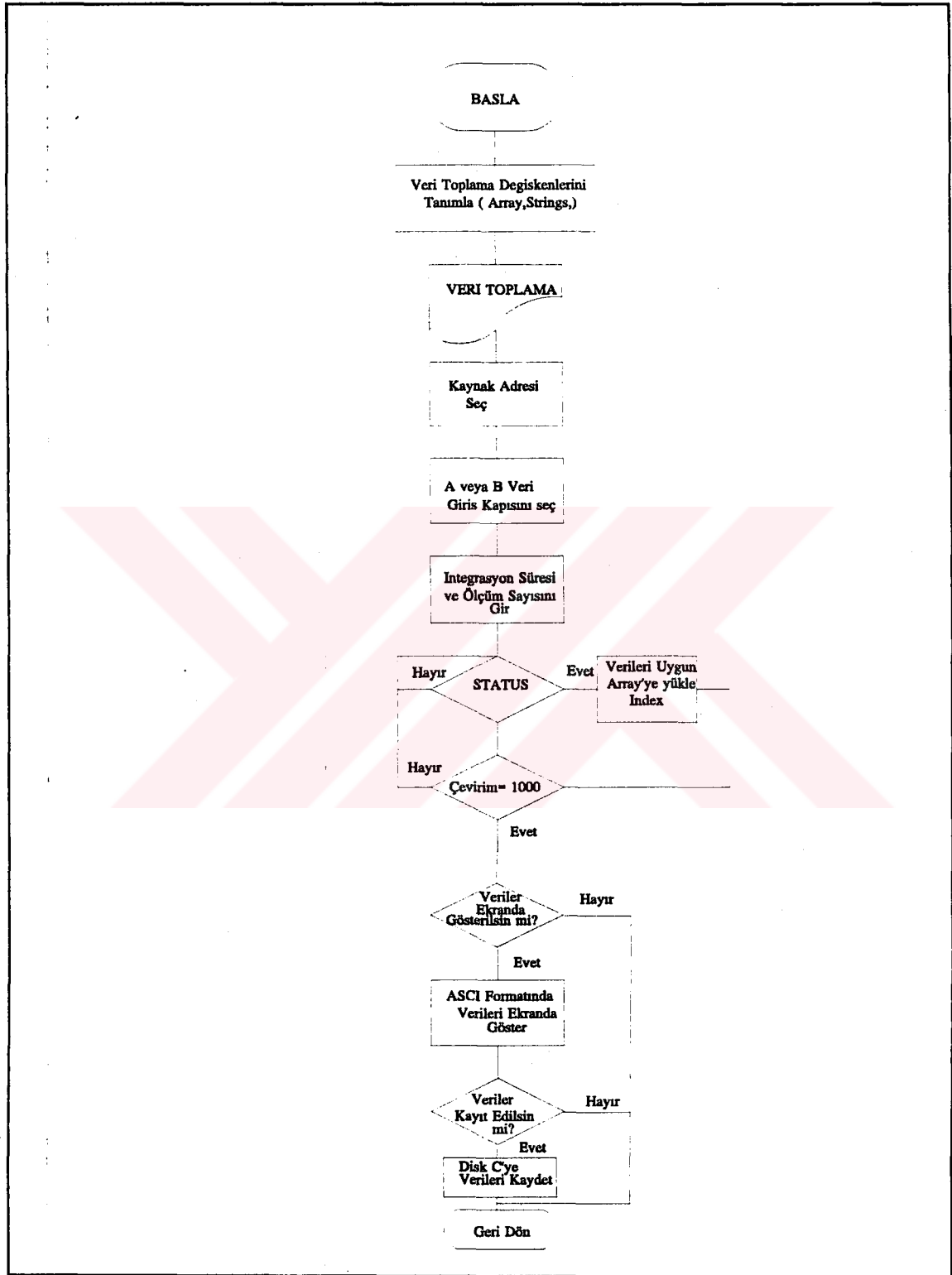


EK 10

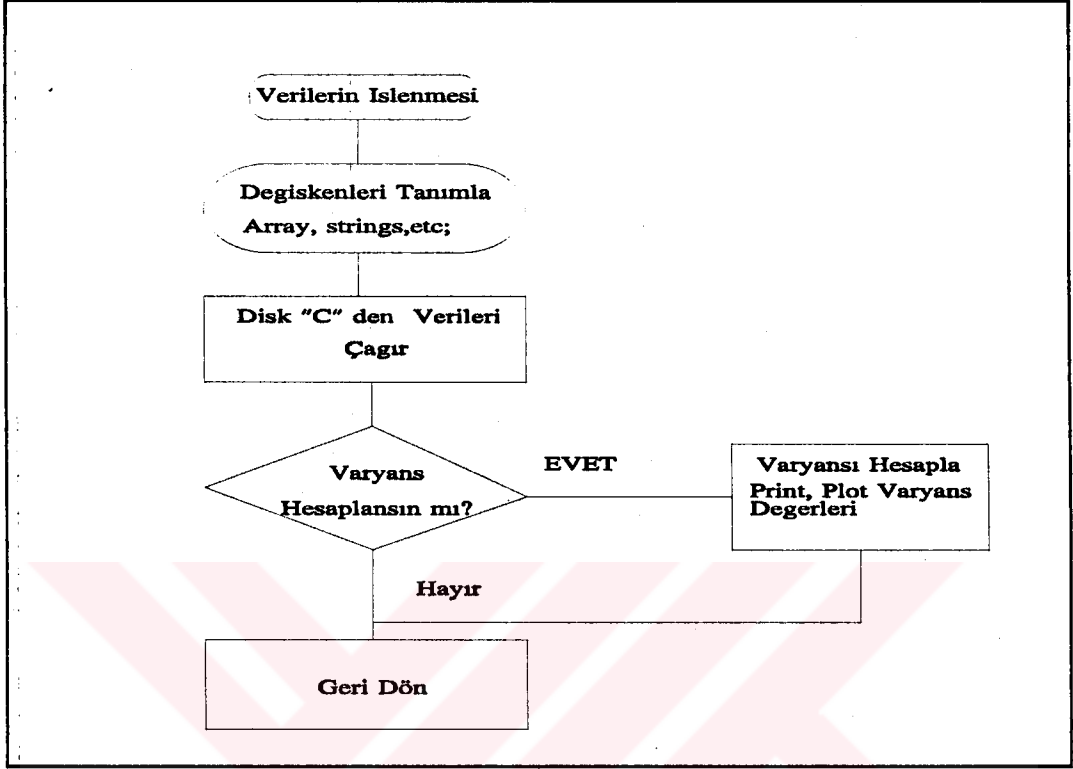
INM'de Yapılmış Ölçümler İçin Geliştirilmiş Program ve Ölçüm Sonuçları



Şekil E 10.1: Ana Program



Şekil E 10.2 : Veri Toplama Altprogramı



Şekil E 10.3 : Veri İşleme Altprogramı

EK 10

{ Ce programme permet de faire des mesures de fréquences par battements de fréquences. }

{ \$R+ }

```
type sdesc = record len : byte; addr : integer ; end;
```

```
pc = ^tabc;
```

```
tabc = array[1..1000] of string[21];
```

```
ptabc = array[1..10] of pc;
```

```
pr = ^tabr;
```

```
tabr = array[1..1000] of real;
```

```
ptabr = array[1..10] of pr;
```

```
l80 = string[80];
```

```
l21 = string[21];
```

```
tab2 = array[1..15] of real;
```

```
var adr,level,status,len,n,n2,deb,fin,i,nb : integer;
```

```
cmddesc,recvdsc : sdesc;
```

```
cmd,recv : l80;
```

```
rep : char;
```

```
mesc : ptabc;
```

```
mesr : ptabr;
```

```
tcomp : array[1..30] of real;
```

```
max,min,pas : real;
```

```
f1 : text;
```

```
vr2 : tab2;
```

```
procedure initialize(var adr,level : integer);
```

```
external 't488init';
```

```
procedure transmit(var cmd : sdesc;var status : integer);
```

```
external 't488xmit';
```

```
procedure receive(var r : sdesc;var len,status : integer);external 't488recv';
```

```
{ $I araqb.pas }
```

```
{ $I arconvb.pas }
```

```
{ $I arhistb.pas }
```

```
{ $I ardvar.pas }
```

EK 10

```

{$I arvarb.pas}
{$I arelimb.pas}
begin
  clrscr;
  writeln;
  writeln;
  writeln('          BATTEMENTS DE FREQUENCES');
  writeln;
  writeln;
  repeat
    writeln(' ACQUISITION DE DONNEES -----> a');
    writeln;
    writeln(' RECUPERATION DE DONNEES -----> r');
    writeln;
    readln(rep);
  until (rep='a') or (rep='r') or (rep='A') or (rep='R');
  if (rep='a') or (rep='A')
  then begin
    acquisition;
    repeat
      writeln;
    writeln;
    writeln(' VOULEZ-VOUS VISUALISER LES DONNEES ? O/N ');
    readln(rep);
    until (rep='o') or (rep='O') or (rep='n') or (rep='N');
    if (rep='o') or (rep='O') then visualisation;
    condon;
    repeat
      writeln;
      writeln;
      writeln(' VOULEZ-VOUS SAUVEGARDER LES DONNEES ? O/N ');
      readln(rep);

```

EK 10

```

until (rep='o') or (rep='O') or (rep='n') or (rep='N');
if (rep='o') or (rep='O') then sauvegarde;
conversion;
repeat
  writeln;
  writeln;
  writeln(' VOULEZ-VOUS FAIRE UN HISTOGRAMME ? O/N ');
  readln(rep);
until (rep='o') or (rep='O') or (rep='n') or (rep='N');
if (rep='o') or (rep='O') then begin
  hist;
  elimination;
end
else {rien};

repeat
  writeln;
  writeln;
  writeln(' VOULEZ-VOUS CALCULER LES VARIANCES ? O/N ');
  readln(rep);
until (rep='o') or (rep='O') or (rep='n') or (rep='N');
if (rep='o') or (rep='O') then calvar;
end
else begin
  recuperation;
  repeat
    writeln;
    writeln;
    writeln(' VOULEZ-VOUS VISUALISER LES DONNEES ? O/N ');
    readln(rep);
    until (rep='o') or (rep='O') or (rep='n') or
(rep='N');
    if (rep='o') or (rep='O') then visualisation;

```

EK 10

```

condon;
conversion;
repeat
  writeln;
  writeln;
writeln(' VOULEZ-VOUS FAIRE UN HISTOGRAMME ? O/N ');
  readln(rep);
  until (rep='o') or (rep='O') or (rep='n') or (rep='N');
  if (rep='o') or (rep='O') then begin
    hist;
    elimination;
  end
  else {rien};

repeat
  writeln;
  writeln;
writeln(' VOULEZ-VOUS CALCULER LES VARIANCES ? O/N ');
  readln(rep);
  until (rep='o') or (rep='O') or (rep='n') or (rep='N');
  if (rep='o') or (rep='O') then calvar;
end;

for i:=1 to ( n div 1000 + 1) do dispose(mesc[i]);
for i:=1 to ( n div 1000 + 1) do dispose(mesr[i]);
end.

{*****}
* PROCEDURE STOCKEC *
{*****}

procedure stockec(c:l80;i:integer);
  var j,k : integer;
begin
  len:=length(c);
  k:= i mod 1000;

```

EK 10

```

if k=0 then begin
    j:=i div 1000;
    k:=1000;
end
else j:=(i div 1000) +1;
mesc[j]^[k]:=copy(c,1,len);
end; {de STOCKEC}
{*****}
{*****}
* FUNCTION LITC *
{*****}
function litc(i:integer) : l21;
var j,k : integer;
begin
    k:= i mod 1000;
    if k=0 then begin
        j:=i div 1000;
        k:=1000;
    end
    else j:=(i div 1000) +1;
    litc:= mesc[j]^[k];
end; { de LITC }
{*****}

{*****}
* PROCEDURE ACQUISITION *
{*****}
procedure acquisition;
{Ce programme permet une acquisition de données à partir
d'un fréquencesmètre. }
type l80 = string[80];
var cmd1,t,ti,t2 : l80;

```

EK 10

```

i : integer;
begin {DE L'ACQUISITION}
  writeln;
  writeln(' ACQUISITION ');
  writeln;
  writeln;
  adr:=0;
  level:=0;
  initialize(adr,level);
  cmddesc.addr:=ofs(cmd)+1;
  cmd1:='REN UNT UNL MTA LISTEN 7 DATA''INFN';
  repeat
    writeln;
    writeln('TIROIR A OU C ? ');
    readln(t);
    until (t='A') or (t='a') or (t='C') or (t='c');
    if (t='A') or (t='a') then t:='1GA'
      else t:='5GA';
  writeln;
  writeln('TEMPS D''INTEGRATION EN SECONDES (expl:0.1) ');
  readln(ti);
  writeln;
  t2:='CY2'' 13 10 UNL UNT';
  cmd:=cmd1+t+ti+t2;
  cmddesc.len:=length(cmd);
  transmit(cmddesc,status);
  cmd:='MLA TALK 7';
  cmddesc.len:=length(cmd);
  recv:= ' ';
  recvdesc.len:=30;
  recvdesc.addr:=ofs(recv)+1;
  transmit(cmddesc,status);

```


EK 10

```

writeln;
writeln('DONNEZ LE NOMBRE DE MESURES ,SVP ');
readln(n);
writeln;
for i:= 1 to (n div 1000 + 1) do new(mesc[i]);
for i:=1 to n do begin
    repeat
        receive(recvdesc,len,status);
        until status=0;
        stockec(recv,i);
    end;
    cmd:='UNT UNL MTA LISTEN 7 GTL UNT UNL';
    cmddesc.len:=length(cmd);
    transmit(cmddesc,status);
end; {FIN DE L'ACQUISITION}
{*****}

{*****}
* PROCEDURE VISUALISATION *
{*****}

{Cette procédure permet la visualisation des données obtenue à partir du fréquencesmètre.}
procedure visualisation;
    const blanc = '          ';
    var encore : boolean;
        j,k,i :integer;
    begin {de VISUALISATION}
        encore:=true;
        writeln;
        writeln;
        while encore do
            begin
                j:=n div 20;

```

EK 10

```

for i:=1 to j do
  begin
    for k:=((i-1)*20)+1 to (i*20) do
      writeln(litc(k),blanc,k);
    readln
  end;
for i:=(20*j)+1 to n do writeln(litc(i),blanc,i);
writeln;
repeat
  writeln(' ENCORE ? O/N');
  readln(rep);
until (rep='o') or (rep='n') or (rep='O') or (rep='N');
if (rep='N') or (rep='n') then encore:=false
end
end; {de VISUALISATION}
{*****}

{*****}
* PROCEDURE SAUVEGARDE *
*****}

{Cette procédure sauvegarde les données sous un fichier.}
procedure sauvegarde;
const blanc = '      ';
var txt:string[250];
    nb : string[4];
    nf : string[25];
    f : text;
    i : integer;
begin {de SAUVEGARDE}
writeln;
writeln('DONNEZ LE NUMERO DU FICHIER ,SVP (0 à 9999) ');
readln(nb);

```

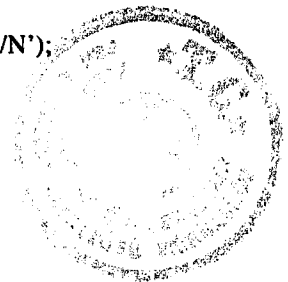


EK 10

```

nf:=concat('don',nb,'.dat');
writeln(lst);
writeln(lst,' FICHIER N° ',nb);
assign(f,nf);
rewrite(f);
writeln;
writeln('COMMENTAIRE : ');
readln(txt);
writeln(lst,' COMMENTAIRE : ',txt);
writeln(f,blanc);
writeln(f,txt);
writeln(f,blanc);
writeln(f,n);
writeln(f,blanc);
for i:=deb to fin do writeln(f,litc(i));
close(f);
writeln;
writeln(lst);
writeln('VOS DONNEES SONT DANS LE FICHIER ',nf);
    end; {de SAUVEGARDE}
{ *****
* PROCEDURE CONDON *
*****}
{ Cette procédure va récupérer les données qui seront utilisées
  par la suite. }
procedure condon;
begin
  repeat
    writeln;
    writeln;
    writeln(' VOULEZ-VOUS UTILISER TOUTES LES DONNEES ? O/N');
    readln(rep);

```

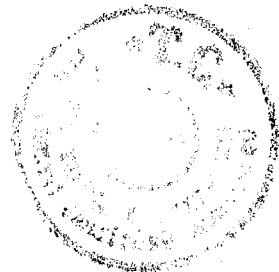


EK 10

```

until (rep='o') or (rep='n') or (rep='O') or (rep='N');
if (rep='o') or (rep='O')
  then begin
    deb:=1;
    fin:=n;
    writeln(lst);
    writeln(lst,' NOMBRES DE DONNEES UTILISEES : ',n:6);
    writeln;
    writeln(' NOMBRES DE DONNEES UTILISEES : ',n:6);
    end
  else begin
    writeln;
    writeln('TRANCHE ? Debut Ret et Fin Ret');
    readln(deb);
    readln(fin);
    writeln;
    n:=fin-deb+1;
    writeln;
    writeln(' NOMBRES DE DONNEES UTILISEES : ',n:6);
    writeln(lst);
    writeln(lst,' NOMBRES DE DONNEES UTILISEES : ',n:6);
    writeln(lst);
    writeln(lst,' PREMIERE VALEUR EN : ',deb:6);
    writeln(lst);
    writeln(lst,' DERNIERE VALEUR EN : ',fin:6);
    end;
end; {de condon}
{*****}
{*****}
* PROCEDURE RECUPERATION *
{*****}
{Cette procédure récupère les données dans un fichier.}

```



EK 10

```

procedure recuperation;
  var txt:string[250];
      nb : string[4];
      nf : string[25];
      ligne,blanc : string[80];
      f : text;
      i : integer;
begin  {de RECUPERATION}
  writeln;
  writeln(' RECUPERATION ');
  writeln;
  writeln('DONNEZ LE NUMERO DU FICHIER ,SVP (0 à 9999) ');
  readln(nb);
  nf:=concat('don',nb,'.dat');
  writeln(lst);
  writeln(lst,' FICHIER N° ',nb);
  assign(f,nf);
  reset(f);
  writeln;
  readln(f,txt);
  writeln;
  readln(f,txt);
  writeln(' COMMENTAIRE : ',txt);
  writeln(lst);
  writeln(lst,' COMMENTAIRE : ',txt);
  readln(f,txt);
  writeln;
  readln(f,n);
  writeln('NOMBRE D''ACQUISITIONS : ',n:6,' VALEURS');
  readln(f,txt);
  for i:= 1 to (n div 1000 + 1) do new(mesc[i]);
  for i:=1 to n do begin

```



EK 10

```

        readln(f,ligne);
        stockec(ligne,i);
    end;

    close(f);
    writeln;
end; {de RECUPERATION}

program arbat(input,output);
{*****}
* PROCEDURE STOCKER *
*****}
procedure stocker(don:real;i:integer);
    var j,k : integer;
    begin
        k:= i mod 1000;
        if k=0 then begin
            j:=i div 1000;
            k:=1000;
        end
        else j:=(i div 1000) + 1;

        mesr[j]^k:=don;
    end; {de stocker}
{*****}
* FUNCTION LITR *
*****}

function litr(i:integer) : real;
    var j,k : integer;
    begin
        k:= i mod 1000;
        if k=0 then begin
            j:=i div 1000;
            k:=1000;
        end

```

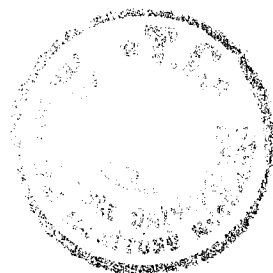
EK 10

```

        else j:=(i div 1000) + 1;
        litr:=mesr[j]^[k];
        end; {de litr}
{*****}
{*****}
* FUNCTION SUPFBCONV *
*****}

function supfbconv(ligne : l21) : real;
{ Cette procédure supprime le caractère F et les blancs au début de la ligne
  et convertit la chaîne de caractères en réels .}
var stop : boolean;
    c,k,code : integer;
    d : real;
begin
stop:=false;
while not stop do
    begin
        c:=0;
        for k:=1 to length(ligne) do
            if (ligne[k]='F') or (ligne[k]=' ') or (ligne[k]='+') then
                begin
                    c:=c+1;
                    delete(ligne,k,1);
                end;
            if c=0 then stop:=true
            end;
        val(ligne,d,code);
        supfbconv:=d;
    end;
{*****}
* PROCEDURE CONVERSION *
*****}

```



EK 10

```

procedure conversion ;
type l21 = string[21];
var i,d2 : integer;
    ligne : l21;
    don : real;
begin
    for i:=1 to (n div 1000 + 1) do new(mesr[i]);
    d2:=deb;
    for i:=1 to n do
        begin
            ligne:=litc(d2);
            don:=supfbconv(ligne);
            stocker(don,i);
            d2:=d2+1;
        end;
    end; {de conversion}
{*****}
{*****}
* PROCEDURE GRADUATION *
*****}
{Cette procédure gradue les axes.}
procedure graduation(a,p,o,d,f:integer);
{*****}
* PROCEDURE AXEH *
*****}
{Cette procédure gradue l'axe horizontal.}
procedure axeh(p,o,d,f:integer);
var i,j :integer;
begin {de axeh}
    i:=d;
    repeat
        plot(i,o,1);

```


EK 10

```

for j:=-2 to 2 do plot(i,o+j,1);
i:=i+p
until i>f
end; {de axeh}
{*****}
* PROCEDURE AXEV *
{*****}
{Cette procédure gradue l'axe vertical.}
procedure axev(p,o,d,f:integer);
var i,j:integer;
begin {de axev}
i:=d;
repeat
plot(o,i,1);
for j:=-2 to 2 do plot(o+j,i,1);
i:=i-p
until i<f
end; {de axev}
begin {de graduation}
if a=1 then axeh(p,o,d,f)
else axev(p,o,d,f)
end; {de graduation}
{*****}
{*****}
* PROCEDURE CROIX *
{*****}
{Cette procédure met des croix aux valeurs trouvées.}
procedure croix(x,y:integer);
var i:integer;
begin {de croix}
for i:=-3 to 3 do plot(x+i,y,1);
for i:=-3 to 3 do plot(x,y+i,1)

```



EK 10

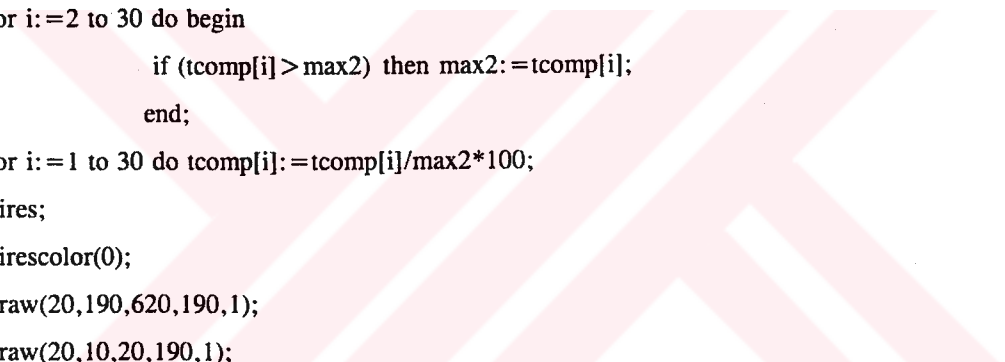
```

end; {de croix}
{*****}
{*****}
* PROCEDURE HGR *
*****}

procedure hgr;
  var i,d,f,h,j : integer;
      max2 : real;
begin
  { METTRE LE TABLEAU TCOMP SOUS FORME DE POURCENTAGE }
  max2:=tcomp[1];
  for i:=2 to 30 do begin
    if (tcomp[i]>max2) then max2:=tcomp[i];
  end;
  for i:=1 to 30 do tcomp[i]:=tcomp[i]/max2*100;
  hires;
  hirescolor(0);
  draw(20,190,620,190,1);
  draw(20,10,20,190,1);
  graduation(1,20,190,20,620);
  graduation(2,45,20,190,10);
  for i:=1 to 30 do begin
    d:=20+(20*(i-1));
    f:=20+(20*i);
    h:=190-round(tcomp[i]*180/100);
    draw(d,190,d,h,1);
    draw(f,190,f,h,1);
    draw(d,h,f,h,1);
    { for j:=h to 190 do draw(d,j,f,j,1);}
  end;

  readln;
  textmode;

```




EK 10

```

end;
{*****}
{*****}
* PROCEDURE HIST*
*****}

procedure hist;
  {Ce programme trace l'histogramme.}
  var i,j : integer;
      place : boolean;
      d,f,x,y : real;
  {*****}
begin
  clrscr;
  { RECHERCHE DU MIN ET DU MAX}
  max:=litr(1);
  min:=litr(1);
  for i:=2 to n do begin
    if (litr(i)<min) then min:=litr(i);
    if (litr(i)>max) then max:=litr(i);
  end;
  x:=max/1e+3;
  y:=min/1e+3;
  pas:=round((x-y)/30 +0.5);
  x:=x*1e+3;
  y:=y*1e+3;
  pas:=pas*1e+3;
  writeln;
  writeln;
  writeln(' MAX = ',(x*1e-6):10:4,' MHz');
  writeln(' MIN = ',(y*1e-6):10:4,' MHz');
  writeln(' PAS = ',(pas*1e-3):4:0,' kHz');
  writeln(lst);

```

EK 10

```

writeln(lst);
writeln(lst, ' MAX = ', (x*1e-6):10:4, ' MHz');
writeln(lst, ' MIN = ', (y*1e-6):10:4, ' MHz');
writeln(lst, ' PAS = ', (pas*1e-3):4:0, ' kHz');
{COMPTER LE NOMBRE DE FOIS QUE LES MESURES APPARAISSENT}
for i:=1 to 30 do tcomp[i]:=0;
for i:=1 to n do begin
    place:=false;
    d:=min;
    f:=min+pas;
    j:=1;
    while (not place) do
        begin
            if ((d <= litr(i)) and (litr(i) < f))
                then begin
                    tcomp[j]:=tcomp[j]+1;
                    place:=true;
                end
            else begin
                j:=j+1;
                d:=d+pas;
                f:=f+pas;
            end;
        end;
    end;
end;

{ DESSIN DE L'HISTOGRAMME }
hgr;
end; {de hist}

```



EK 10

Referans Laser : "i" Soğurma Çizgisi,
 Çift Frekans Laser : Yatay Polarizasyon Modu,
 Ölçüm sayısı : 100
 Groupage Par 1
 Moyenne Sur 100 Groupes : 2.27931009470000E+008 MHz
 Variance : 4.76776004111962E+003 kHz
 Variance Relative : 1.00688951584197E-010

Groupage Par 2
 Moyenne Sur 50 Groupes : 2.27931009470000E+008 MHz
 Variance : 7.89673165761943E+003 kHz
 Variance Relative : 1.66768802265628E-011

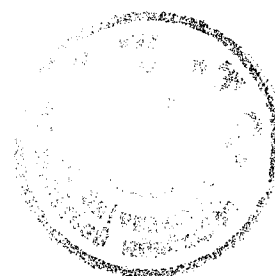
Groupage Par 3
 Moyenne Sur 33 Groupes : 2.27931860909091E+008 MHz
 Variance : 1.09541543905251E+004 kHz
 Variance Relative : 2.31337632674649E-011

Groupage Par 5
 Moyenne Sur 20 Groupes : 2.27931009470000E+008 MHz
 Variance : 6.31285136443765E+003 kHz
 Variance Relative : 1.33319290381659E-011

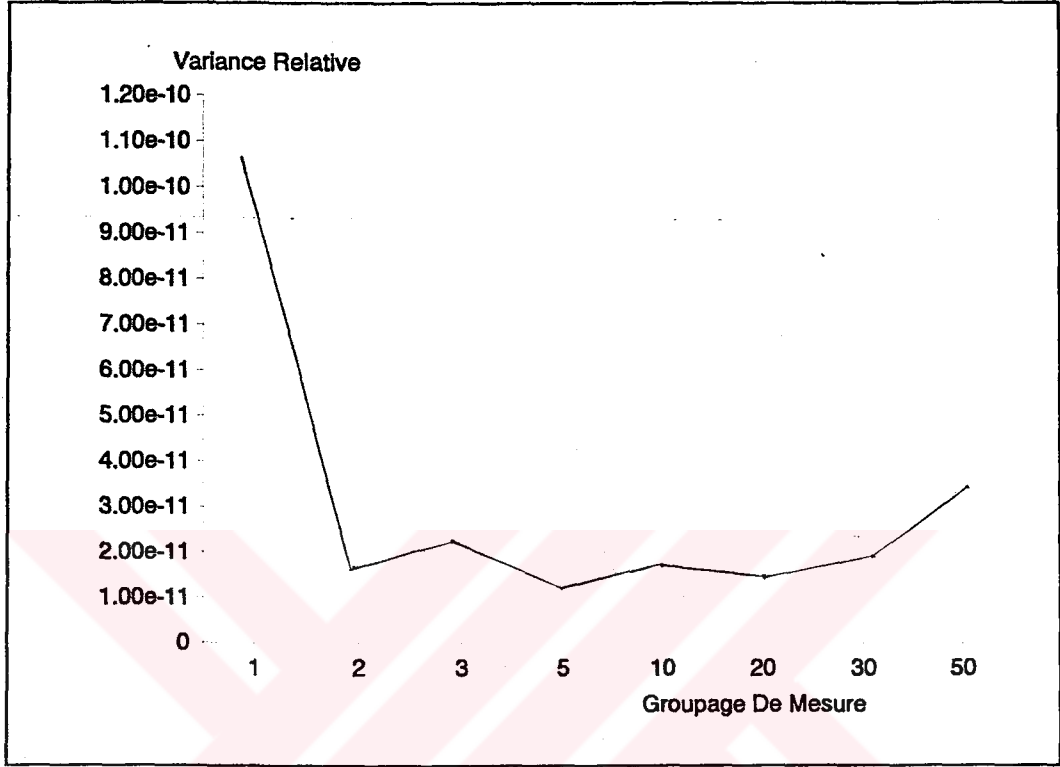
Groupage Par 10
 Moyenne Sur 10 Groupes : 2.27931009470000E+008 MHz
 Variance : 8.36312226992230E+003 kHz
 Variance Relative : 1.76618371324574E-011

Groupage Par 20
 Moyenne Sur 5 Groupes : 2.27931009470000E+008 MHz
 Variance : 7.10920616599534E+003 kHz
 Variance Relative : 1.50137278150829E-011



Groupage Par 30**Moyenne Sur 3 Groupes : 2.27934032566667E+008 MHz****Variance : 8.66727958539675E+003 kHz****Variance Relative : 1.83041782097695E-011****Groupage Par 50****Moyenne Sur 2 Groupes : 2.27931009470000E+008 MHz****Variance : 1.61533594414683E+003 kHz****Variance Relative : 3.41138147200502E-011**

EK 10



Şekil E 10.4 : INM'in Çift Frekans Laserin Bağlı Kararlılık Eğrisi



EK 11

Referans ölçü lokmasının sertifika değeri : 49.99997 [mm]

OLÇUM NUMARASI	REF. OLÇU LOKMASI	KAL. OLÇU LOKMASI
1	49.99998	49.99995
2	49.99995	49.99995
3	49.99991	49.99997
4	49.99992	49.99997
5	49.99994	49.99997
6	50.00009	49.99995
7	50.00001	50.00002
8	50.00007	50.00009
9	49.99995	49.99990
10	50.00008	49.99993
11	49.99993	50.00009
12	50.00001	50.00010
13	49.99992	50.00001
14	49.99995	50.00003
15	50.00001	50.00008
16	50.00009	50.00009
17	49.99998	50.00008
18	50.00014	50.00008
19	50.00008	49.99993
20	50.00009	50.00012
ORTALAMA	50.000005	50.000012
STANDART SAPMA	7.39E ⁻⁰⁵	6.56E ⁻⁰⁵

$$l_x = 49.99998 \text{ [mm]}$$

Tablo E 11.1 : 50 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu



EK 11

Referans ölçü lokmasının sertifika değeri : 25.00003 [mm]

OLÇUM NUMARASI	REF. OLÇU LOKMASI	KAL. OLÇU LOKMASI
1	24.99989	24.99994
2	25.00008	24.99911
3	24.99993	25.00005
4	25.00005	25.00006
5	24.99998	24.99990
6	24.99996	25.00014
7	25.00001	25.00009
8	24.99992	25.00017
9	25.00006	24.99990
10	24.99993	24.99988
11	25.00006	24.99993
12	25.00004	25.00017
13	24.99994	25.00020
14	25.00008	25.00017
15	25.00003	24.99996
16	25.00008	24.99980
17	24.99998	25.00012
18	25.00007	25.00006
19	24.99998	25.00005
20	25.00003	24.99998
ORTALAMA	25.000005	24.99998
STANDART SAPMA	5.98E ⁻⁰⁵	2.3E ⁻⁰⁵

 $l_x = 25.00004$ [mm]

Tablo E 11.2 : 25 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu



EK 11

Referans ölçü lokmasının sertifika değeri : 19.99997 [mm]

OLÇUM NUMARASI	REF. OLÇU LOKMASI	KAL. OLÇU LOKMASI
1	20.00009	20.00009
2	20.00006	19.99997
3	20.00009	20.00005
4	20.00003	19.99996
5	19.99998	19.99997
6	19.99998	19.99996
7	19.99997	20.00009
8	19.99998	19.99996
9	19.99997	20.00009
10	19.99995	19.99998
11	19.99996	19.99997
12	19.99997	19.99994
13	19.99998	19.99995
14	19.99996	19.99997
15	19.99998	19.99998
16	20.00003	19.99998
17	20.00006	19.99996
18	20.00005	19.99999
19	20.00003	20.00001
20	20.00003	20.00002
ORTALAMA	20.0000075	19.999945
STANDART SAPMA	4.4E ⁻⁰⁵	4.7E ⁻⁰⁵

$$l_x = 19.99998 \text{ [mm]}$$

Tablo E 11.3 : 20 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu

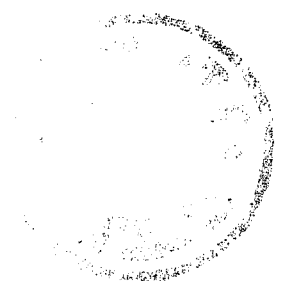
.EK 11

Referans ölçü lokmasının sertifika değeri : 14.99994 [mm]

ÖLÇÜM NUMARASI	REF. ÖLÇÜ LOKMASI	KAL. ÖLÇÜ LOKMASI
1	14.99990	14.99996
2	14.99999	14.99995
3	14.99993	15.00001
4	14.99990	14.99997
5	14.99990	14.99995
6	14.99998	14.99996
7	14.99989	14.99997
8	14.99990	14.99996
9	14.99992	14.99997
10	14.99997	14.99996
11	14.99987	14.99993
12	14.99989	14.99992
13	14.99992	15.00000
14	14.99993	14.99994
15	14.99993	14.99997
16	14.99987	14.99993
17	14.99986	14.99999
18	14.99994	14.99990
19	14.99995	14.99992
20	14.99990	14.99993
ORTALAMA	14.999918	14.9999545
STANDART SAPMA	3.41E ⁻⁰⁵	2.72E ⁻⁰⁵

$$l_x = 15.00003 \text{ [mm]}$$

Tablo E 11.4 : 15 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu



EK 11

Referans ölçü lokmasının sertifika değeri : 9.99997 [mm]

OLÇUM NUMARASI	REF. OLÇU LOKMASI	KAL. OLÇU LOKMASI
1	9.99990	10.00002
2	9.99990	10.00004
3	9.99998	9.99996
4	9.99992	9.99993
5	9.99986	9.99993
6	9.99990	9.99996
7	9.99994	9.99995
8	9.99995	9.99998
9	9.99987	9.99997
10	9.99989	9.99998
11	9.99990	9.99996
12	9.99992	9.99997
13	9.99993	9.99996
14	9.99994	9.99997
15	9.99993	9.99999
16	9.99990	9.99998
17	9.99992	9.99997
18	9.99994	9.99999
19	9.99992	10.00002
20	9.99990	10.00001
ORTALAMA	9.9999105	9.999977
STANDART SAPMA	2.39E ⁻⁰⁵	2.79E ⁻⁰⁵

 $l_x = 10.00003$ [mm]

Tablo E 11.5 : 10 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu

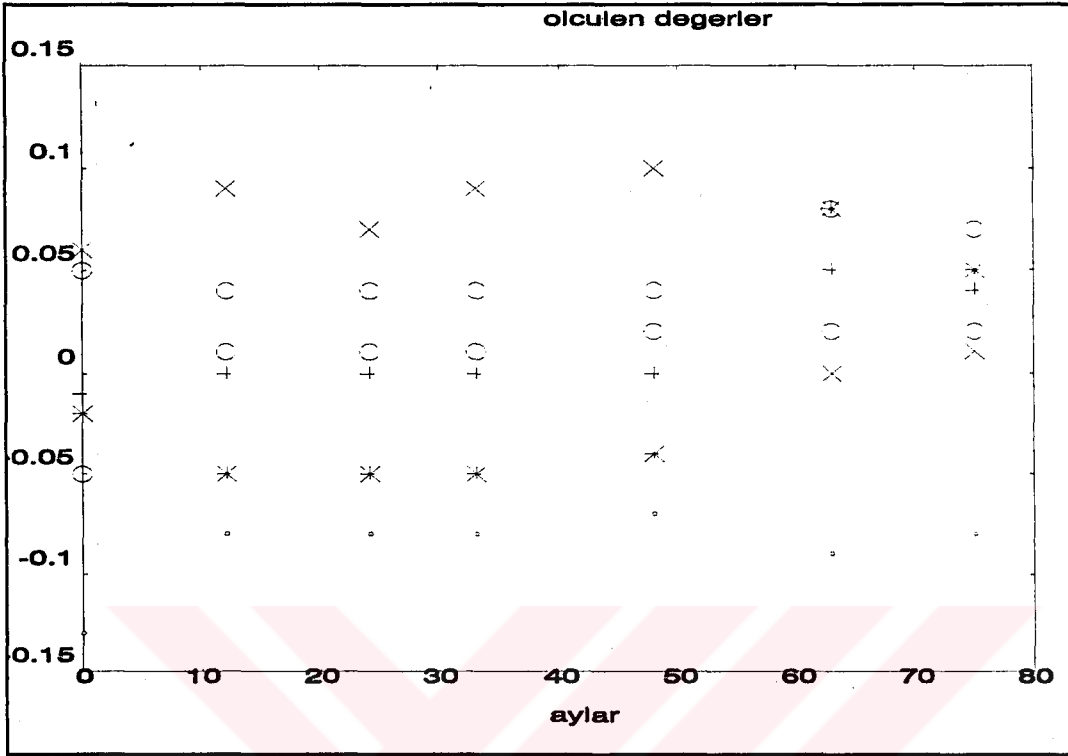
EK 11

Referans ölçü lokmasının sertifika değeri : 5.00000 [mm]

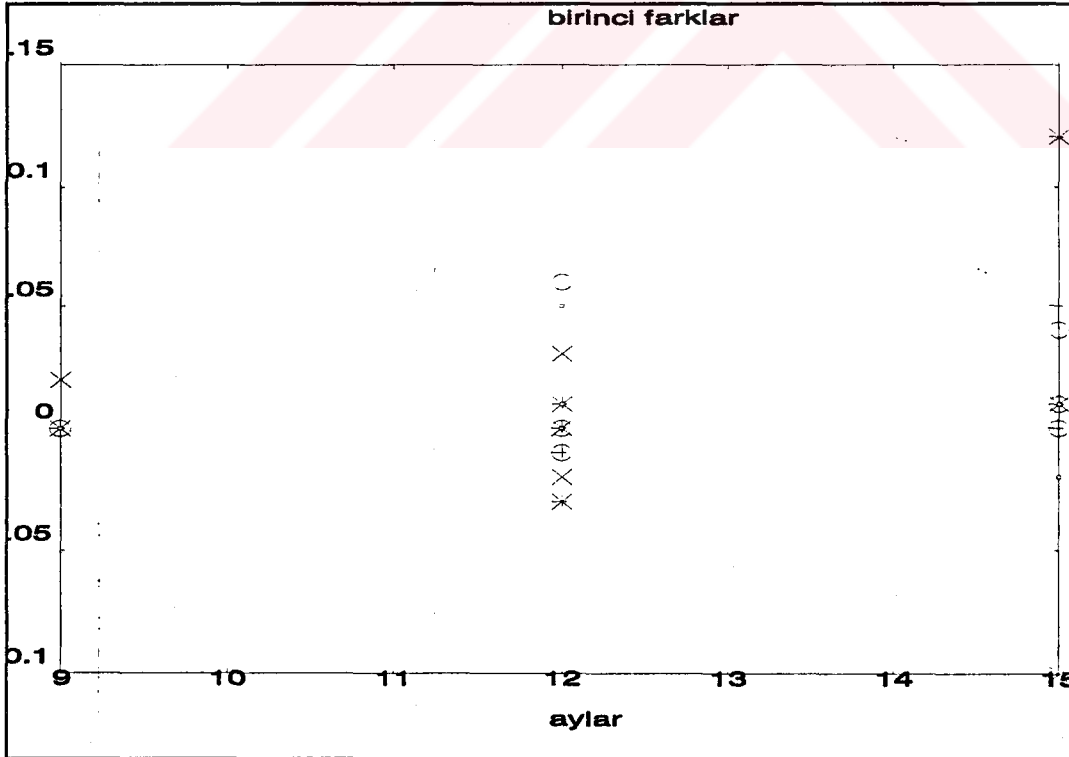
ÖLÇÜM NUMARASI	REF. ÖLÇÜ LOKMASI	KAL. ÖLÇÜ LOKMASI
1	4.99994	5.00004
2	4.99995	5.00003
3	4.99998	4.99999
4	4.99995	4.99998
5	4.99996	5.00005
6	4.99996	5.00004
7	4.99995	5.00003
8	4.99997	5.00002
9	5.00001	5.00004
10	4.99997	5.00005
11	4.99997	5.00003
12	4.99994	5.00005
13	4.99996	5.00004
14	4.99997	5.00001
15	4.99998	5.00003
16	4.99998	5.00002
17	4.99993	5.00004
18	4.99997	5.00003
19	4.99994	5.00003
20	4.99993	5.00004
ORTALAMA	4.9999605	5.0000295
STANDART SAPMA	1.93E ⁻⁰⁵	1.80E ⁻⁰⁵

$$l_x = 5.00007 \text{ [mm]}$$

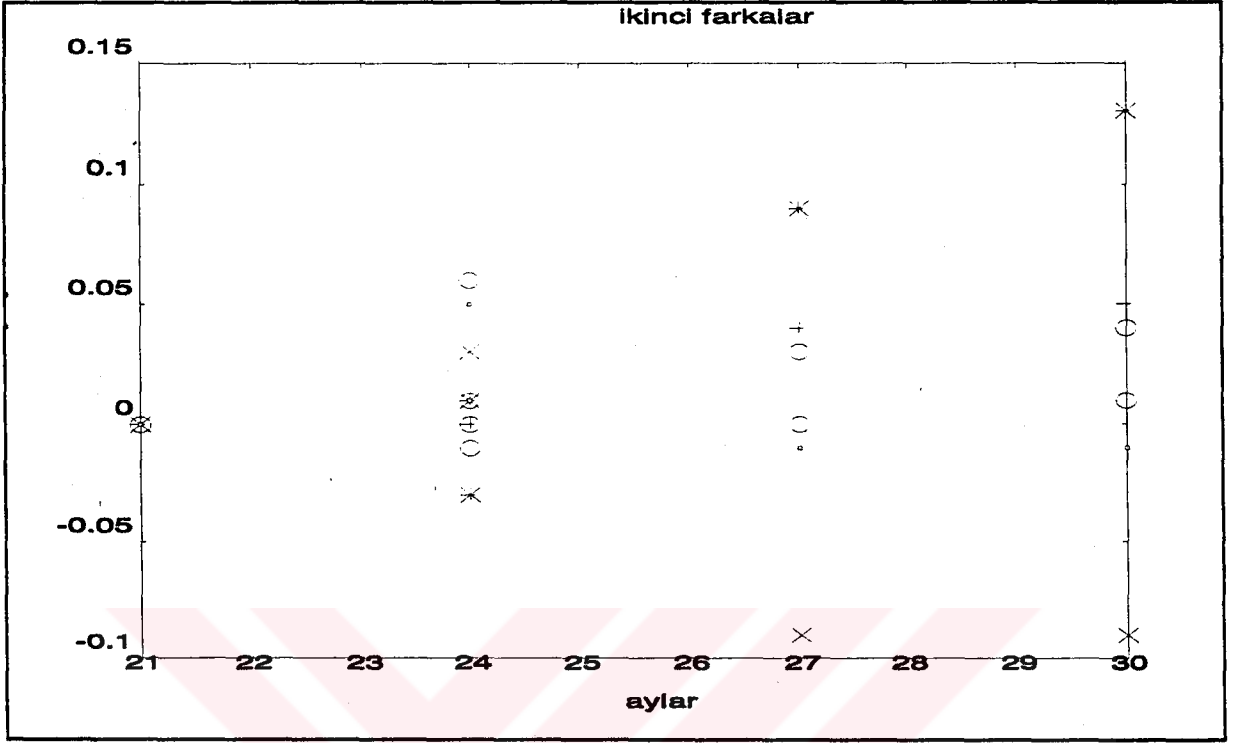
Tablo E 11.6 : 5 mm'lik Ölçü Lokmasının Kalibrasyon Sonucu



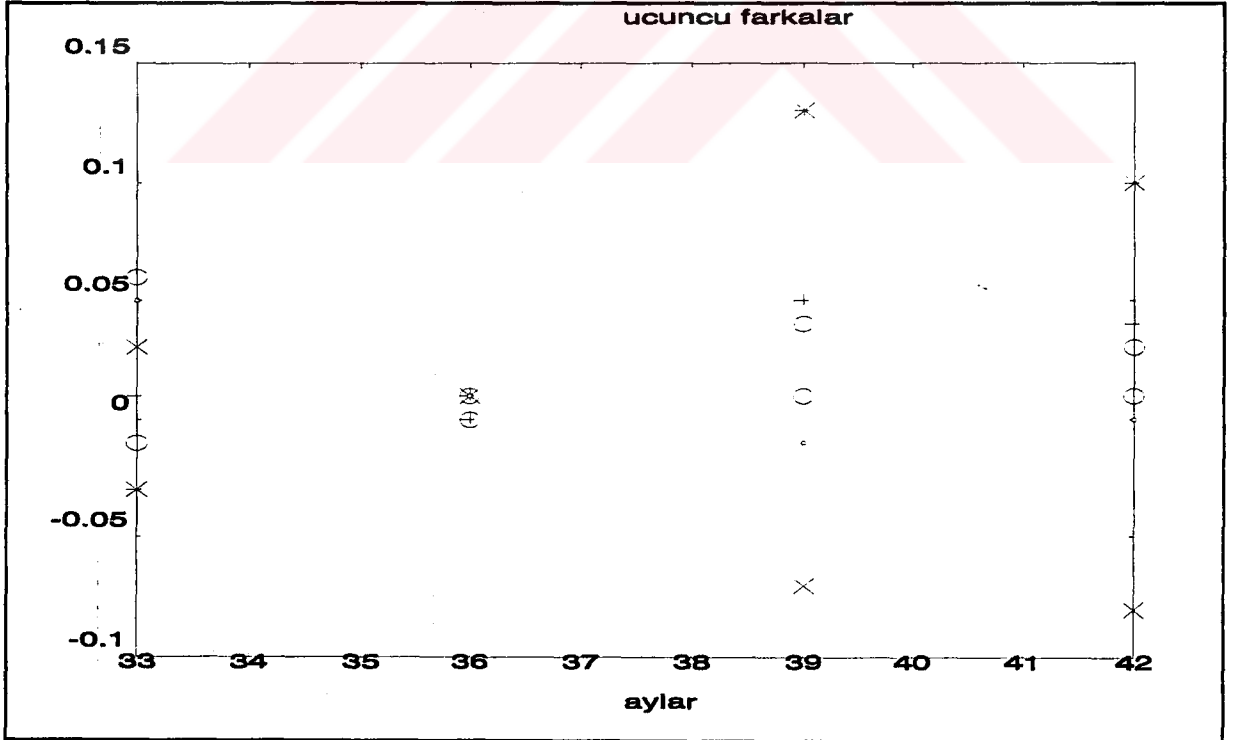
Şekil E 12.1 : Ölçü Lokmalarının 1988-1994 Aralığında Boyut Değişimi



Şekil E 12.2 : Ölçü Lokmalarının Sonuçları Üzerindeki Birinci Farklar

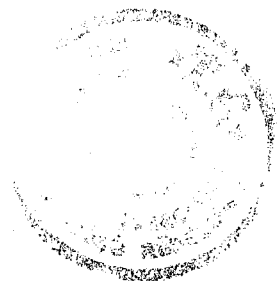


Şekil E 12.3 : Ölçü Lokmalarının Sonuçları Üzerindeki İkinci Farklar



Şekil E 12.4 : Ölçü Lokmalarının Sonuçları Üzerindeki Üçüncü Farklar

```
echo on
clc
clg
m=[-0.05 0.01 0.01 0.01 0.02 0.02 0.02
    0.06 0.09 0.07 0.09 0.10 0.00 0.01
    -0.01 0.00 0.00 0.00 0.00 0.05 0.04
    0.05 0.04 0.04 0.04 0.04 0.08 0.07
    -0.02 -0.05 -0.05 -0.05 -0.04 0.08 0.05
    -0.13 -0.08 -0.08 -0.08 -0.07 -0.09 -0.08];
year=[0 12 24 33 48 63 75];
m5=m(1,:);
m10=m(2,:);
m15=m(3,:);
m20=m(4,:);
m25=m(5,:);
m50=m(6,:);
for j=1:6
    for i=2:7
        dmfl(j,i-1)=m(j,i)-m(j,i-1);
        yr1(i-1)=year(i)-year(i-1);
    end;
end;
for j=1:6
    for i=3:7
        dmf2(j,i-2)=m(j,i)-m(j,i-2);
        yr2(i-2)=year(i)-year(i-2);
    end;
end;
for j=1:6
    for i=4:7
        dmf3(j,i-3)=m(j,i)-m(j,i-3);
        yr3(i-3)=year(i)-year(i-3);
    end;
end;
dm5f1=dmfl(1,:);
```



EK 12

```

dm10f1=dmf1(2,:);
dm15f1=dmf1(3,:);
dm20f1=dmf1(4,:);
dm25f1=dmf1(5,:);
dm50f1=dmf1(6,:);
dm5f2=dmf2(1,:);
dm10f2=dmf2(2,:);
dm15f2=dmf2(3,:);
dm20f2=dmf2(4,:);
dm25f2=dmf2(5,:);
dm50f2=dmf2(6,:);
dm5f3=dmf3(1,:);
dm10f3=dmf3(2,:);
dm15f3=dmf3(3,:);
dm20f3=dmf3(4,:);
dm25f3=dmf3(5,:);
dm50f3=dmf3(6,:);
plot(year,m5,'o',year,m10,'x',year,m15,'+',year,m20,'o',year,m25,'*',year,m50,'.');
xlabel('aylar')
ylabel('farklar [um]')
title('olculen degerler')
print -dmeta sakrolc
pause % olculen cizildi,bir tusa bas
plot(yr1,dm5f1,'o',yr1,dm10f1,'x',yr1,dm15f1,'+',yr1,dm20f1,'o',yr1,dm25f1,'*',
yr1,dm50f1,'.');
xlabel('aylar')
ylabel('farklar [um]')
title('birinci farklar')
print -dmeta sakrfk1
pause % 1.farklar cizildi,bir tusa bas
plot(yr2,dm5f2,'o',yr2,dm10f2,'x',yr2,dm15f2,'+',yr2,dm20f2,'o',yr2,dm25f2,'*',yr2,dm50f2,'.');
xlabel('aylar')
ylabel('farklar [um]')
title('ikinci farkalar')

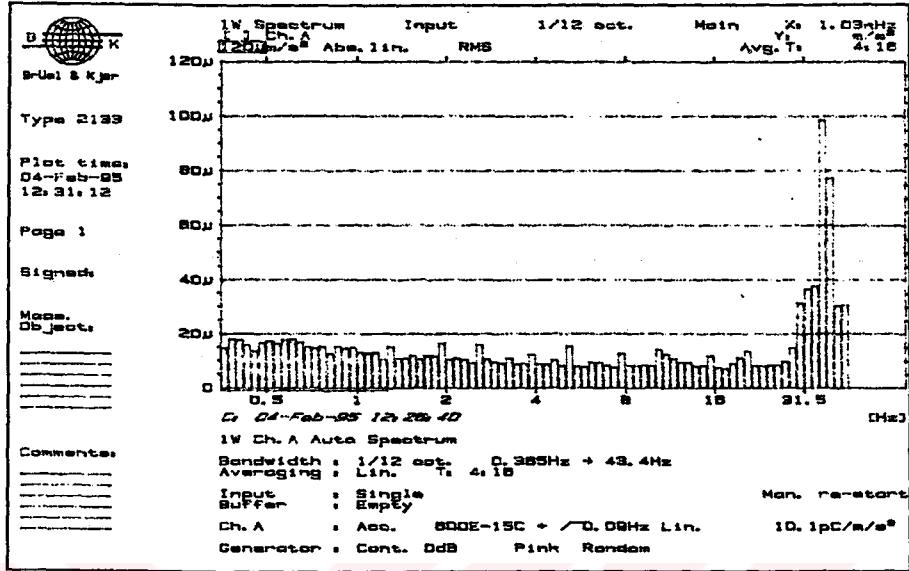
```

EK 12

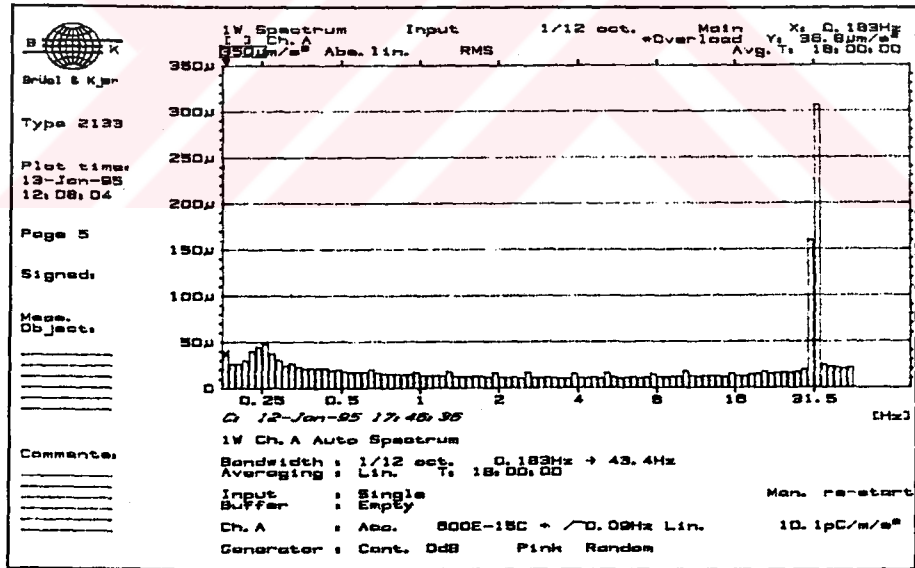
```
print -dmeta sakrfk2
pause % 2.farklar cizildi,bir tusa bas
plot(yr3,dm5f3,'o',yr3,dm10f3,'x',yr3,dm15f3,'+',yr3,dm20f3,'o',yr3,dm25f3,'*',yr3,dm50f3,'.');
xlabel('aylar')
ylabel('farklar [um]')
title('ucuncu farkalar')
print -dmeta sakrfk3
pause % 3.farklar cizildi,bir tuşa bas
```



EK 13



Şekil E 13.1 : Ölçümlerin Yapıldığı Masanın Titreşim Seviyeleri (Hafta Sonu)



Şekil E 13.2 : Ölçümlerin Yapıldığı Masanın Titreşim Seviyeleri (Hafta içi)

EK 14

Deneylerde Kullanılmış Olan Teçhizatların Listesi

REFERANS LAZER (He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$)

Model : UME 1 (Ume Yapımı- Prototip)
Seri Nr. : MAM - UME 46030022120/0001
Gücu : 100 μW
Stabilizasyon Yöntemi : Iyod
Kararlılığı : 10^{-12}

Yüksek Gerilim Güç Kaynağı

Model : SR 325 (Stanford Reserch)
Seri Nr. : 01061
Çalışma Aralığı : 0-2500 V
Akım Değeri : 10mA

Spektrum Analizör

Model : 8568B (Hewellet- Packard)
Seri Nr. : 31217A05680
Frekans Ölçüme Aralığı : 10 Hz- 1.5 GHz
Genlik Ölçme Aralığı : -135 - 30 dBm
Referans Frekans Kararlılığı : $1 \cdot 10^{-8}$

Lock-in Yükseltici

Model : SR 530 (Stanford Reserch)
Seri Nr. : SRS 5670

Frekans Sayıcı

Model : PM 6680 (Philips)
Seri no : 34589645

Foto Detektör

Model : International Light 2342
Seri Nr. : 23678



Ç.F. LAZER

Tipi	: HP 5528
Şebeke Gerilimi	: 100,120,220, or 240 V (-10%,+5%)
Şebeke Frekansı	: 48-68 Hz
Harcadığı Güç	: 175 VA max.
Lazerin Dalgaboyu	: 632.991 nm
Lazer Işın Demetinin Çapı	: 6mm typical
Ayrırtedebilirlik	: 0.01 μ m
Doğruluğu	: 0.01ppm

Zeiss Jena Enterferometresi

Model	: Zeiss -Jena 1972
Seri Numarası	: 25764
Işık Kaynağı	: Kadmiyum Lambası
Belirsizlik Değeri	: $\pm (0.02 + 0.2 L) \mu$ m

İvme Ölçer

Tipi	: 4370 (Brüel & Kjaer, Danemark)
Seri Nr.	: 1720172
Yük Duyarlılığı	: 10pc/m/s ² +- %2
Voltj Duyarlılığı	: 26 mV/m/s ²
Frekans Ölçüm Aralığı	: 0.1- 4800 Hz

Real Time Frequency Analyser

Tipi	: 2133 (Brüel & Kjaer ,Danemark)
Seri Nr.	: 1695784
Frekans Ölçüm Aralığı	: 0.1-20000Hz
Dinamik Ölçüm Aralığı	: 80 dB

Suyun Üçlü Noktası

Tipi	: TP 1 (UME Yapımı)
Doğruluğu	: 0.012 mK
Tekrarlanabilirliği	: 0.01 mK



Galyum Sabit Sıcaklık Noktası

Tipi	: ITL-M-17402A-ISOTECH
Ölçüm belirsizliği	: ± 0.000025 K
Tekrarlanabilirlik	: ± 0.0002 K
Galyumun Saflığı	: % 99.9999
Plato Sıcaklığı	: 29.7646 °C

Isılçift Kalibrasyon Banyosu

Model	: CB 217-Heto
Doğruluğu	: ± 0.001 K
Besleme	: 220/240 V 50/60 Hz.
Isıtıcının Gücü	: 1kW

Referans Platinyum Dirençli Termometre (PRT)

Model	: 162 (Rosemount)
Seri nr.	: 203623
R ₀	: 100 ohms ± 0.05 ohms
Alpha	: 0.003850 ± 0.000005
PRT Akım Değeri	: 1mA

Dijital Voltmetre

Model	: 3456 A (Hewlett Packard)
Seri Nr.	: 2943A22372
Şebeke Gerilimi	: 100/120/220/240 V + %5,-%10
Şebeke Frekansı	: 45-400 Hz
Harcadığı Güç	: 45 VA max.

CCD Solide State Kamera

Model	: CC-1350 PAL (TOA COOPERATION)
Voltaj Besleme	: 18.5 V DC
Gücü	: 5 watt
Pixels sayısı	: 500 h x 576 v (active)
Giriş Apertürü	: 1/2"



Çıkış Sinyali : $1V_{pp}$
 Senkronizasyon : İç Quartz Osilatör

OLYMPUS Microskop

Model : BHM-311-N (Japan)
 Büyütme : 5x,20x,40x,100x

Elektro-Mekanik Komparatör

Model : TESA Gauge Block Komparatör
 Seri Nr. : 16.10401
 Ölçme Aralığı : 0.5-100 mm
 Ayırtedebilirlik : $0.01 \mu m$
 Ölçüm Belirsizliği : $\pm(0.05 + 0.05 \cdot L) \mu m$
 Tekrarlanabilirlik : $\pm 0.015 \mu m$

Ölçü Lokma Seti

Model : CEJ 112
 Seri Numarası : 860703
 Sınıfı : 0
 Malzeme : Çelik
 Uzama Katsayı" : $11 \cdot 10^{-6} (m/m^{\circ}C)$

Ölçü Lokma Seti

Model : Tesa 122
 Seri Numarası : D11386, C85379, D63285, C68313, B 99494, B64286
 Sınıfı : 00
 Malzeme : Çelik
 Uzama Katsayı" : $11 \cdot 10^{-6} (m/m^{\circ}C)$

ÖZGEÇMİŞ :

Doğum Tarihi : 25 Eylül 1958

Doğum Yeri : Cernovoda, Romanya

Lise : Beyoğlu ATATÜRK Erkek Lisesi, İstanbul, 1976

Üniversite : Bükreş Politeknik Enstitüsü Hassas Mekanik Y.Müh Böl.,1985

Çalıştığı Kurumlar : TÜBİTAK-MAM Ulusal Metroloji Enstitüsü Uzman Araştırmacı, Mekanik Metroloji Bl. Bşk., Proje Yürütücüsü.

TUSAŞ Havacılık Ve Uzay Sanayii A.Ş. Tasarım Geliştirme Müdürlüğünde
Uzman Araştırmacı.



THE FUTURE OF THE WORLD
PUBLISHED BY THE
PUBLISHERS OF THE