

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Polikristal Arı Bakır, Tane Sın, İç Sürt,

Doktora Tezi

Burkay Alnıpak

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANESİ

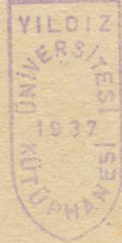
Kayıt numarası: 41011

Demirbaş numarası: 39178

Kot numarası: R 210
17

Ek:

MÜHÜR



2

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

POLİKRİSTAL ARI BAKIRDA
TANE SINIRI İÇ SÜRTÜNMELERİ

(Doktora Tezi)



Y. Müh.
Burkay Alnıpak

I. TEORİK İNCELEME

Bu bölümde, anelastisite, tane sınırlarının yapısı ve dislokasyonlar nedeni ile oluşan iç sürtünme modelleri incelenmiştir.

1.1. İÇ SÜRTÜNME ve ANELASTİSİTE

Peryodik gerilim etkisi altında metâsel malzemelerde yerlerini değiştiren atomlar, tekrar eski konumlarını alabilmeleri belirli bir zamana ihtiyaç gösterirler, eğer bu gerekli zamanı bulmazlarsa gerilimle uzama arasında bir faz farkı ortaya çıkmaktadır(1). Şekil 1'de t_1 ve t_2 zaman aralığında sabit gerilim altındaki metâsel bir malzemede zamana bağlı olarak meydana gelen ϵ_2 uzaması, zamana bağlı olmayan ϵ_1 uzamasından farklı karakterdedir. Elastik uzamanın (ϵ_1) ardından oluşan bu uzama (ϵ_2) anelastik bir uzamadır.

Katı metalin anelastik tutumunu incelemek için standart lineer katı modeli yararlıdır.(Şekil 1.2). Verilen bu modelde F kuvveti sisteme etki edince, yayların hareketi içi viskoz sıvı ile doldurulmuş, silindir tarafından engellenir. Kuvvetin etkisi kalkınca benzer şekilde ters bir karşı koyma hali model yardımı ile oluşturulur. Böylece incelemede gerekli bağıntıların çıkarılması mümkündür. Bu mekanik modelin hareket denkleminin gerilimle uzama arasındaki bağıntıyı vereceği düşünülerek,

$$\sigma + \tau_c \dot{\sigma} = E_R (\epsilon + \tau_c \dot{\epsilon}) \quad (1.1)$$

yazılabilir. Burada,

$$\sigma = \text{Gerilim (dyn/cm}^2\text{)}$$

$$\epsilon = \text{Uzama (cm/cm)}$$

$$\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} = \text{Gerilimin değişme hızı}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \text{Uzama değişme hızı}$$

$$\tau_{\epsilon} = \text{Sabit uzamada gevşeme zamanı (s}_n\text{)}$$

$$\tau_{\sigma} = \text{Sabit gerilimde gevşeme zamanı (s}_n\text{)}$$

$$E_R = \text{Gevşeme halindeki elastisite modülü (dyn/cm}^2\text{)}$$

dür. Formülde geçen E_R gevşeme halindeki elastisite modülüdür. Bu terimin kullanılmasının nedeni, elastik alandaki E elastisite modülü ile aralarında fark olmasıdır. İncelemelerde E yerine E_u sembolü kullanılmaktadır. Elastik konumdan sapma ilk defa Weber(2) tarafından ortaya atılmıştır. Uygulanan gerilimin ve ona bağlı uzamanın aşığıdaki eşitliklerde verildiği gibi(3),

$$\sigma = \sigma \sin \omega t \quad (1.2)$$

$$\epsilon = \epsilon \sin(\omega t - \phi) \quad (1.3)$$

değiştiiğini düşünelim. Burada, ω açısal frekans, ϕ ise gerilimle uzama arasındaki faz farkını belirliyen faz açısıdır. Şekil 1.2'deki histerezis hali mevcuttur. Malzemede her bir gerilim dönümünde ΔE kadar enerji absorbe etmektedir. Bunu,

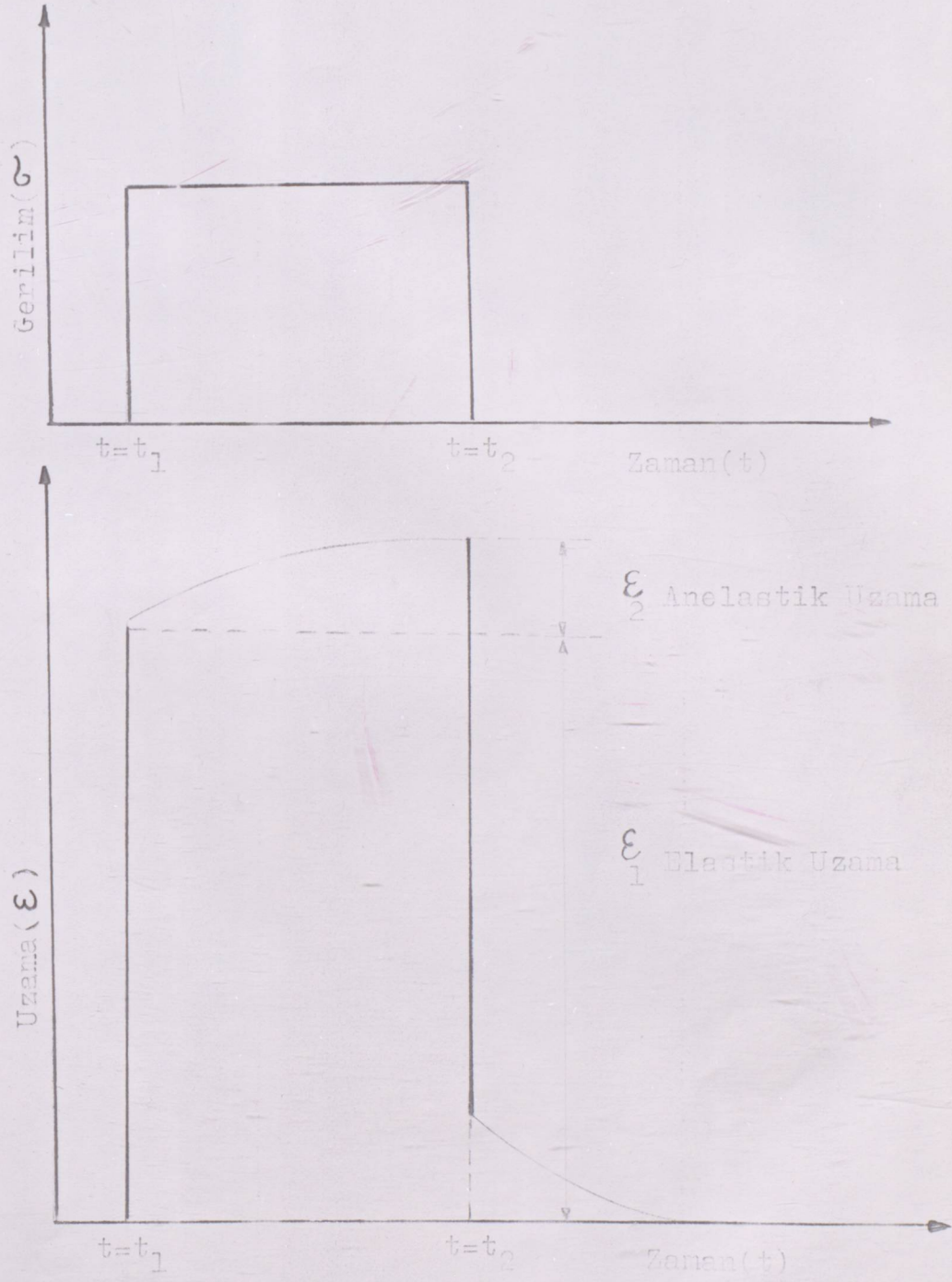
$$\Delta E = \oint \sigma d\epsilon = \sigma_o \epsilon_o \int_{t=0}^{t=2\pi/\omega} \sin \omega t \cos(\omega t - \phi) \omega dt \quad (1.4)$$

şeklinde yazabiliriz. $\cos(\omega t - \phi) = \cos \omega t \cdot \cos \phi + \sin \omega t \sin \phi$ değeri yerine yazılıp,

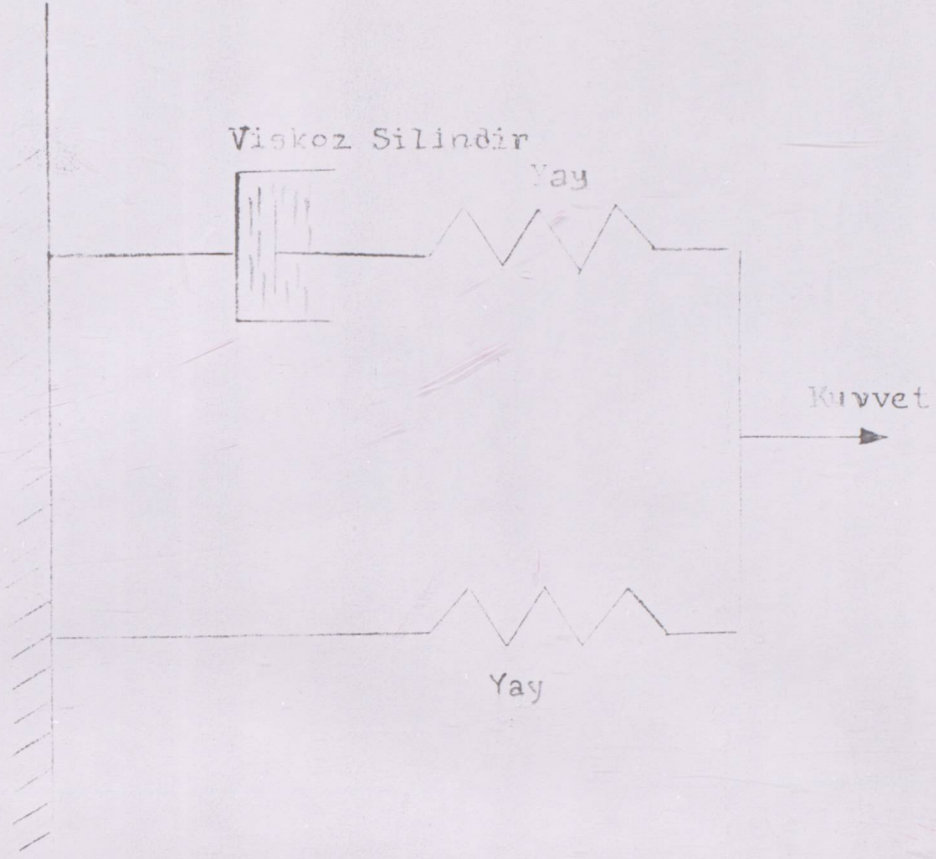
$$\Delta E = \epsilon_o \sigma_o \pi \sin \phi \quad (1.5)$$

yazılarak ve toplam enerjiyi $(E) = 1/2 \epsilon_o \sigma_o$ olarak,

$$\sin \phi \approx \tan \phi = \delta = \Delta E / 2\pi E = Q^{-1} \quad (1.6)$$



ŞEKİL 1.1- t_1 ve t_2 zaman aralığında etkiyen kuvvetin etkisi altında, elastik ve anelastik uzaması.

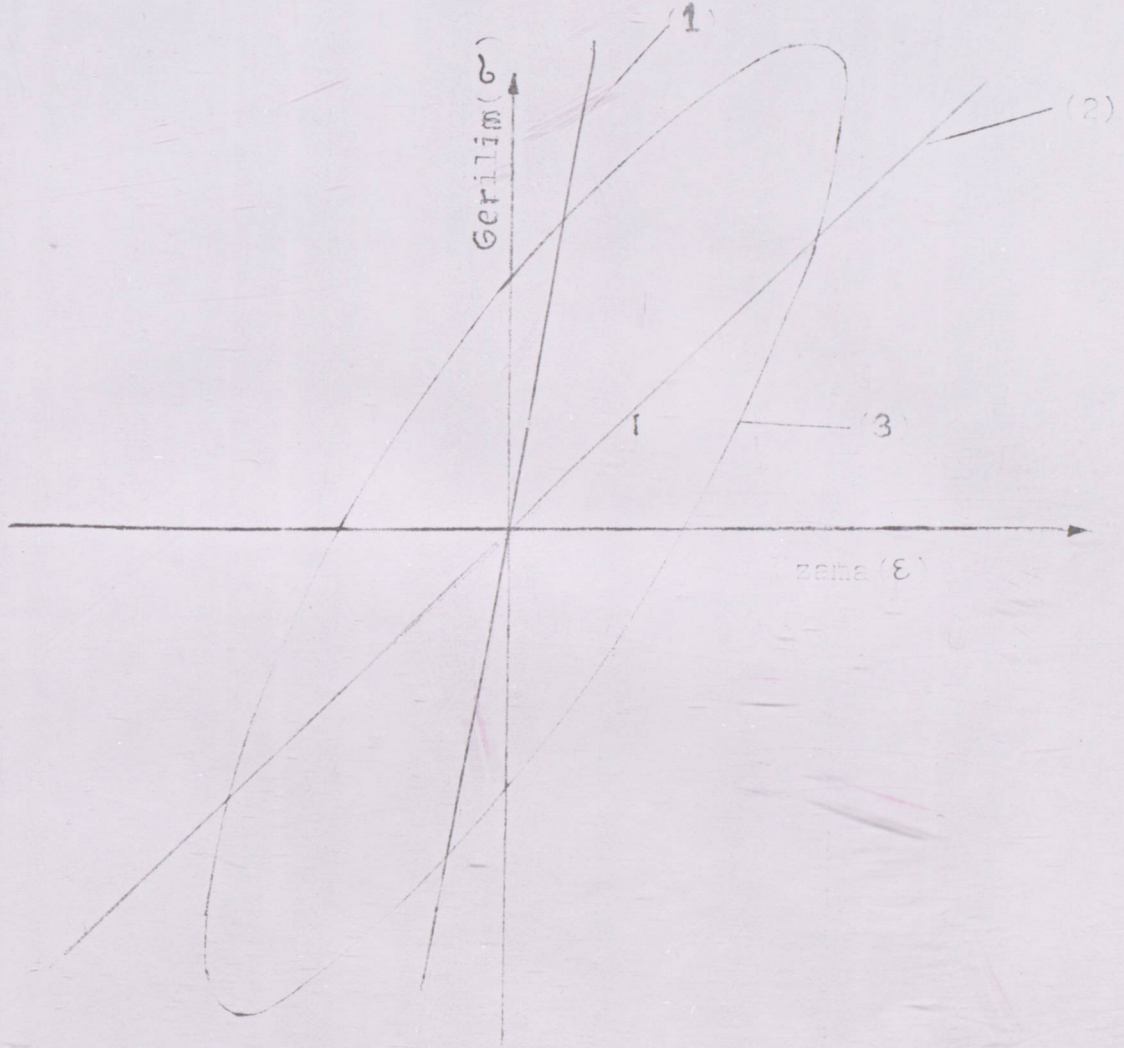


ŞEKİL 1.2- Standart lineer katıyı temsil eden mekanik model.

bulunur. Bu iç sürtünme değerini veren eşitlik olup, δ' 'ya logaritmik azalma denilmektedir. Malzemede absorbe edilen enerji değeri diğer bir deyişle iç sürtünmeyi karakterize etmektedir.

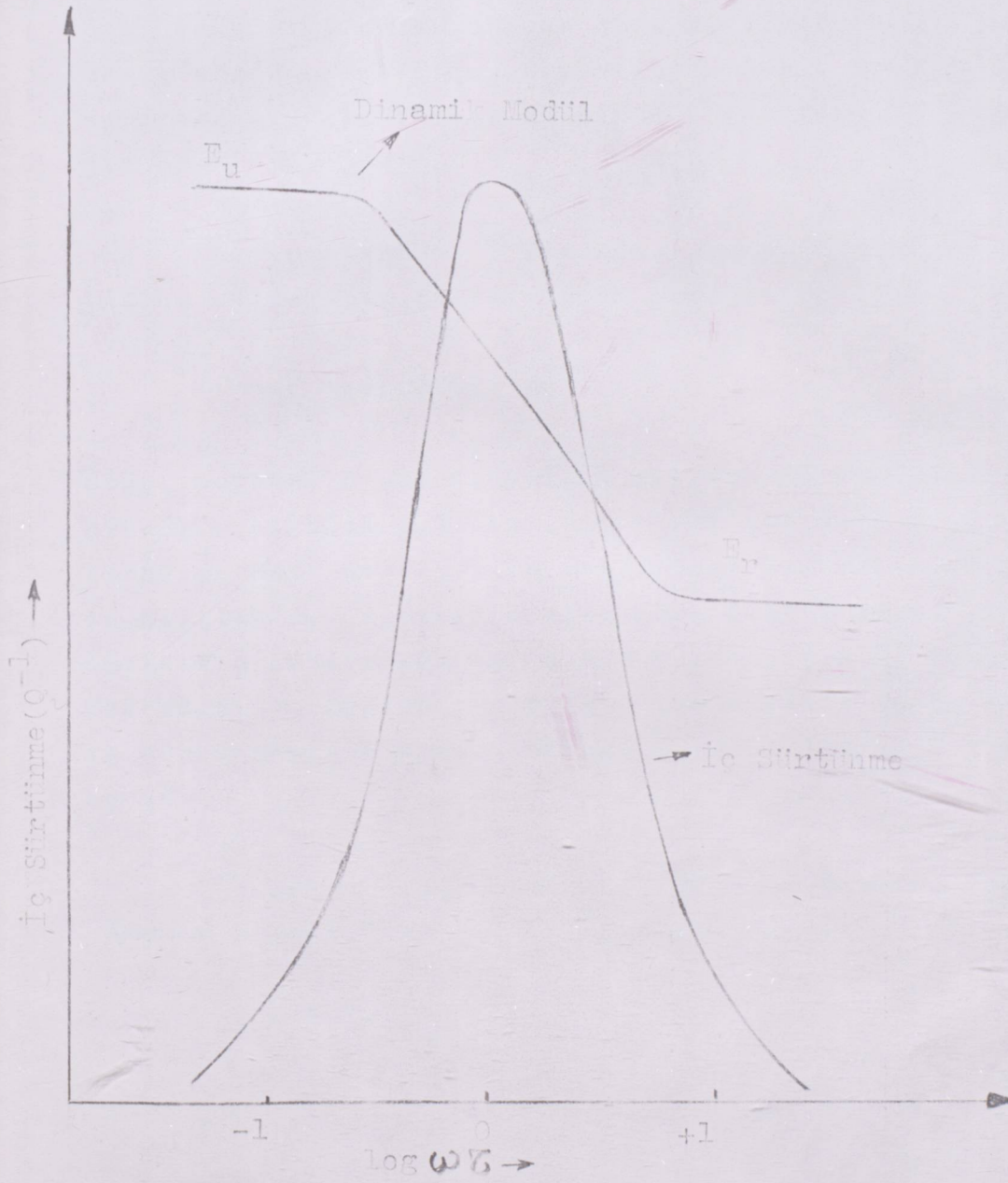
Gevşeme* iç dengenin oluşabilmesi için zamana ihtiyaç göstermektedir ve buna gevşeme zamanı denilmekte τ ile ifade edilmektedir. Uygulanan periyodik gerilimin açısal frekansı ω ile titreşim frekansı f arasında $\omega = 2\pi f$ bağıntısının olduğu ve gevşemeninde zamana ihtiyaç gösterdiği düşünülürse, $\omega\tau$ değeri birden çok büyük veya çok küçük olduğu hallerde iç sürtünme

* Bu terim İngilizce Relaxation'un karşılığı olarak kullanılmıştır.



- (1) Düşük frekanslarda gevşeme yok
- (2) Yüksek frekanslarda gevşeme var
- (3) Ara frekanslarda gevşeme hali

ŞEKİL 1.3- Anelastik bir katıda gerilim-uzama eğrisine uygun
nan frekansının etkisi ile histerezis oluşması (2).



ŞEKİL 1.4- Dinamik modül ve iç sürtünmenin titreşim frekansı ile değişmesi

hali mevcut değildir. Şekil 1.1.'de $\omega\tau \gg 1$ hali büyük frekanslara karşı gelmekte ve iç dengenin, değişen gerilim yönünde teessüs etmesi mümkün olmamaktadır. $\omega\tau \ll 1$ halinde ise iç denge, frekansın düşük olmasından kendiliğinden oluşmaktadır. Şekil 1.4.de bu durumu daha açık görmek mümkündür. $\omega\tau = 1$ de iç sürtünme maksimum değerdedir. Şekil 1.4.'de aynı zamanda frekansla elastisite modülünün değişmesi de gösterilmiştir.

Gevşeme zamanı τ sıcaklığa bağlı olarak Arrhenius eşitliğine uyacak bir değişim göstermektedir(4) ve,

$$\tau = \tau_0 \exp(Q/RT) \quad (1.7)$$

olup, burada, R gaz sabiti, Q aktivasyon enerjisi, τ_0 ise sabitedir. Eşitlik 1.7, $\ln\tau = \ln\tau_0 + Q/RT$ şeklinde ifade edilip, iç sürtünme hali mevcut iken $\tau = 1/\omega$ veya $1/2\pi f = \tau$ olduğu düşünülürse Eşitlik 1.7 egrisinin eğiminden Q aktivasyon enerjisi ve egrinin ordinatı kestigi nokta yardımı ile τ_0 hesap edilebilmektedir(4). Deneysel olarak f frekansları ve bu frekanslarda iç sürtünmenin maksimum olduğu sıcaklıklar (T_p) bulunabilmektedir.

Gevşemenin büyüklüğü Δe ile sembolize edilmekte ve **Sönüm kuvveti*** adı verilmektedir(4).

$$\Delta e = E_u - E_r/E_r \quad (1.8)$$

$\omega\tau = 1$ için $\tan\phi$ (bkz. Eşitlik 1.6) değeri(4),

$$\tan\phi = \Delta e/2(1+\Delta e) \quad (1.9)$$

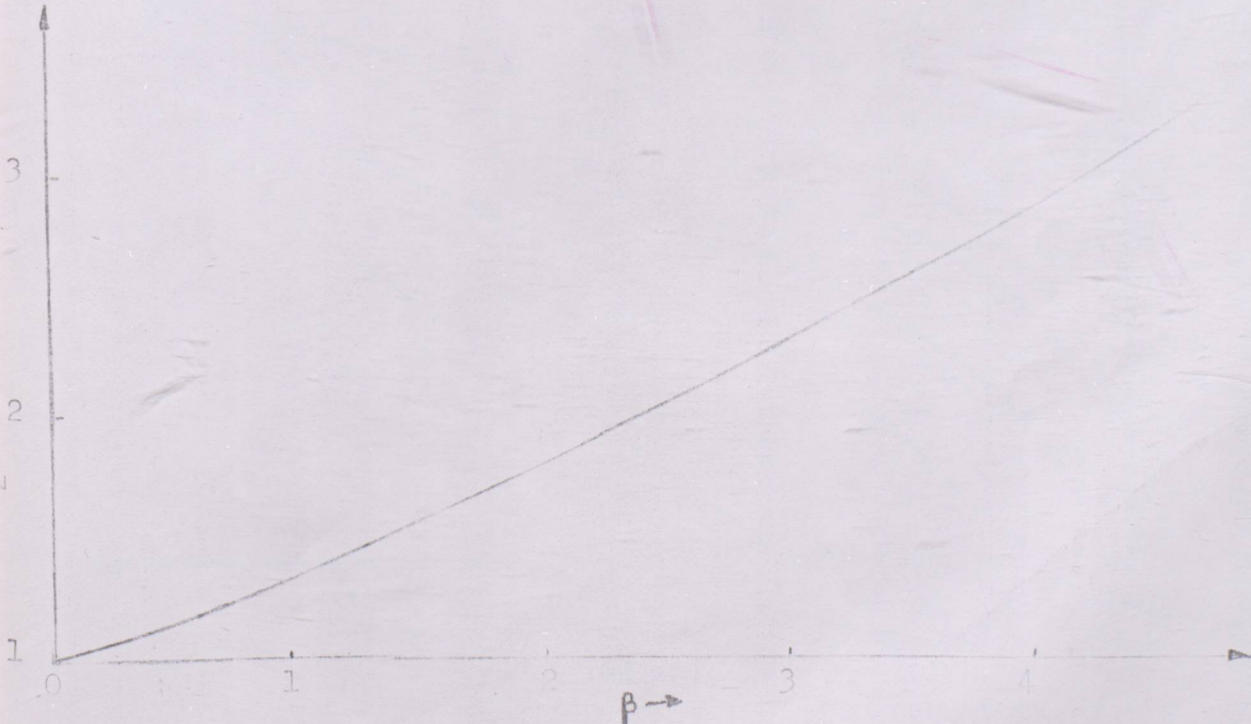
olduğu için sönüm kuvveti de bu eşitlik yardımı ile hesaplanabilir.

* Bu terim İngilizce Relaxation Time'in karşılığı olarak kullanılmıştır.

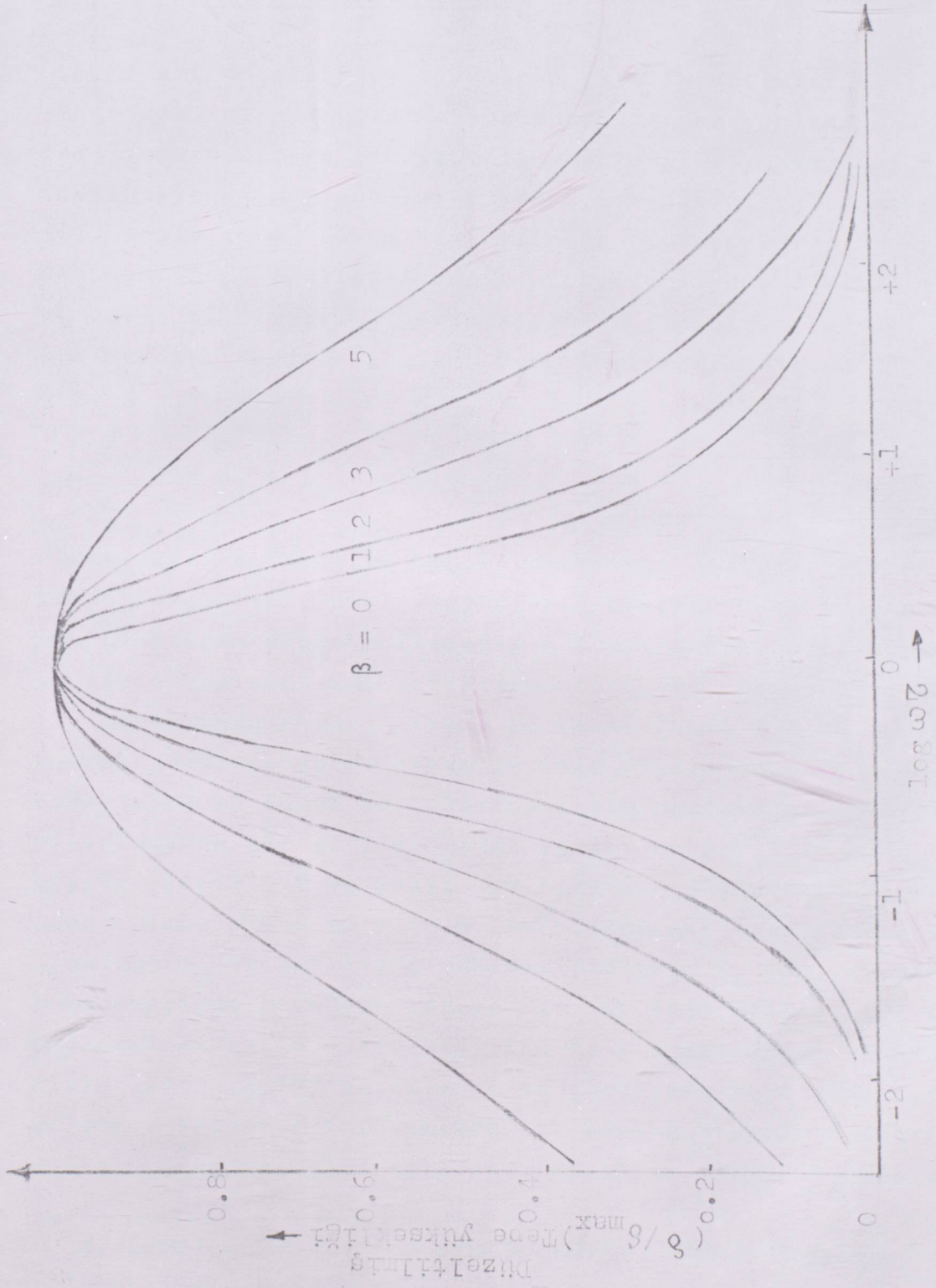
Nowick Berry(4) analizleri kullanılarak, β parametreleri hesaplanabilmektedir. Bulunan β değerleri ile teorik değerler karşılaştırılıp teorik ve deneysel uyarlılık kontrol edilir. Bu işlem deneysel olarak elde edilen iç sürtünme, sıcaklık eğrisinin düzeltilmesi yapıp (deneysel iç sürtünme değerlerinden temel sönüm değerleri çıkarılıp elde edilen eğri (bkz. Şekil 1.6) ve aşağıdaki eşitlik yardımı ile olmaktadır(4).

$$\Delta(1/T) = 2.635 R/Q(r_2(\beta)) \quad (1.10)$$

Bu eşitlikte Q aktivasyon enerjisini, $\Delta(1/T)$ 'de bulunan değiştirilmiş eğrinin tepe noktasının, yarı yüksekliğindeki genişliğini (Şekil 3.9) gösterdiğine göre $r_2(\beta)$ hesaplanabilir. Şekil 1.5. yardımı ile β 'lar bulunabilir. Formülde geçen R gaz sabitidir. Bu β değerleri Şekil 1.6'daki teorik β değerleri ile mukayese edilebilir.



ŞEKİL 1.5- β ile $r_2(\beta)$ arasındaki bağıntı.



ŞEKİL 1.6- β 'nin farklı değerlerinde maksima biçim ve genişliklerinin değişmesi

1.2. DİSLOKASYONLARDA SÖNÜM

Arı metallerde, uygulanan gerilimin etkisi altında düşük sıcaklıklarda görülen sönümün, dislokasyonların hareketleri sonucu ortaya çıktığı bilinmektedir(7). Şekil 1.7'de dislokasyonda meydana gelen sönüm şematik olarak gösterilmiştir. Şekle göre, sönüm iki kısımdan oluşmaktadır. δ_I uygulanan gerilimin genliğine bağlı olmayan, δ_H genliğe bağlı olan ve belli bir kritik değerin aşılması ile oluşan sönümü ifade etmektedir. Böylece toplam sönüm logaritmik azalma(1) cinsinden,

$$\delta = \delta_I + \delta_H \quad (1.11)$$

olmaktadır. δ_H genliğe bağlı logaritmik azalma*, dislokasyonların hareketini, dislokasyonların hareket mekanizması ise, onu oluşturan düğüm noktalarının** uygulanan gerilimin etkisi ile parçalanmasını gerektirmektedir(8). Granoto ve Lücke (7) tarafından ortaya atılan bu teori Şekil 1.8'de şematik olarak görülmektedir. Artan gerilim etkisi sonucunda önce bombeleşme ve düğüm noktalarından bir parçalanma olmaktadır. Dislokasyona ait gerilim uzama eğrisi de Şekil 1.9'da verilmiştir. Şekil 1.8 ve Şekil 1.9 birlikte düşünülünce A-B-C kademelerinde artan gerilimle bombeleşen dislokasyonda toplam uzunluğu L_N ve iki düğüm noktası aralığında L_C ise, bu mesafe C kademesinde en büyük değerdedir. Gerilim artması ile C-D kademesinde uzama sabit kalırken kritik gerilmeye ulaşıncaya dislokasyon ağı*** parçalanır ve gerilimin etki yönü değişince D-E-F kademelerini takiben ilk konuma ulaşılmaktadır(8). Böylece Şekil 1.9'da görülen histerezis alanı oluşmakta, bu

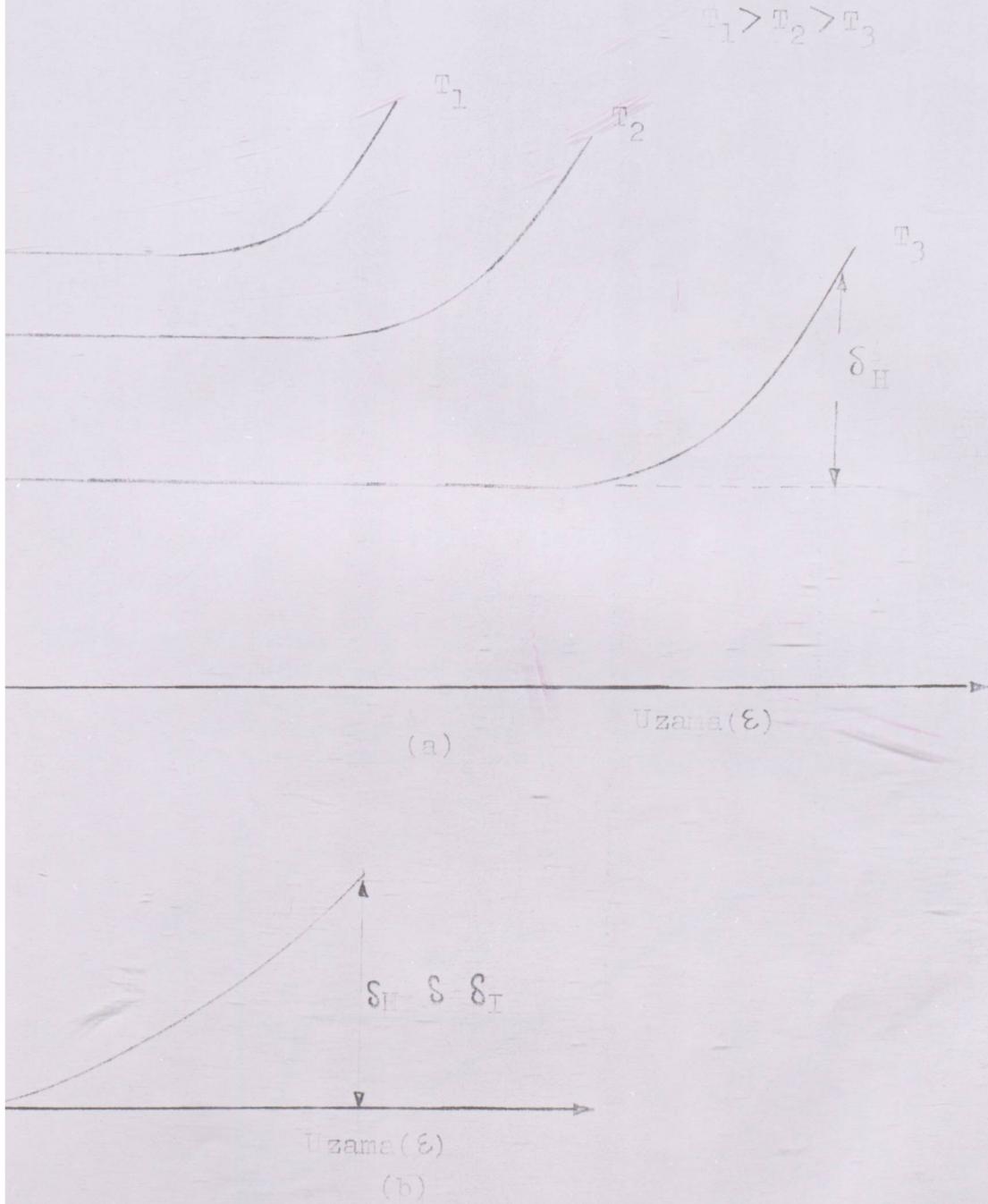
Aşağıdaki İngilizce terimlerin karşılığı olarak kullanılmıştır.

*Logaritmik Decrement

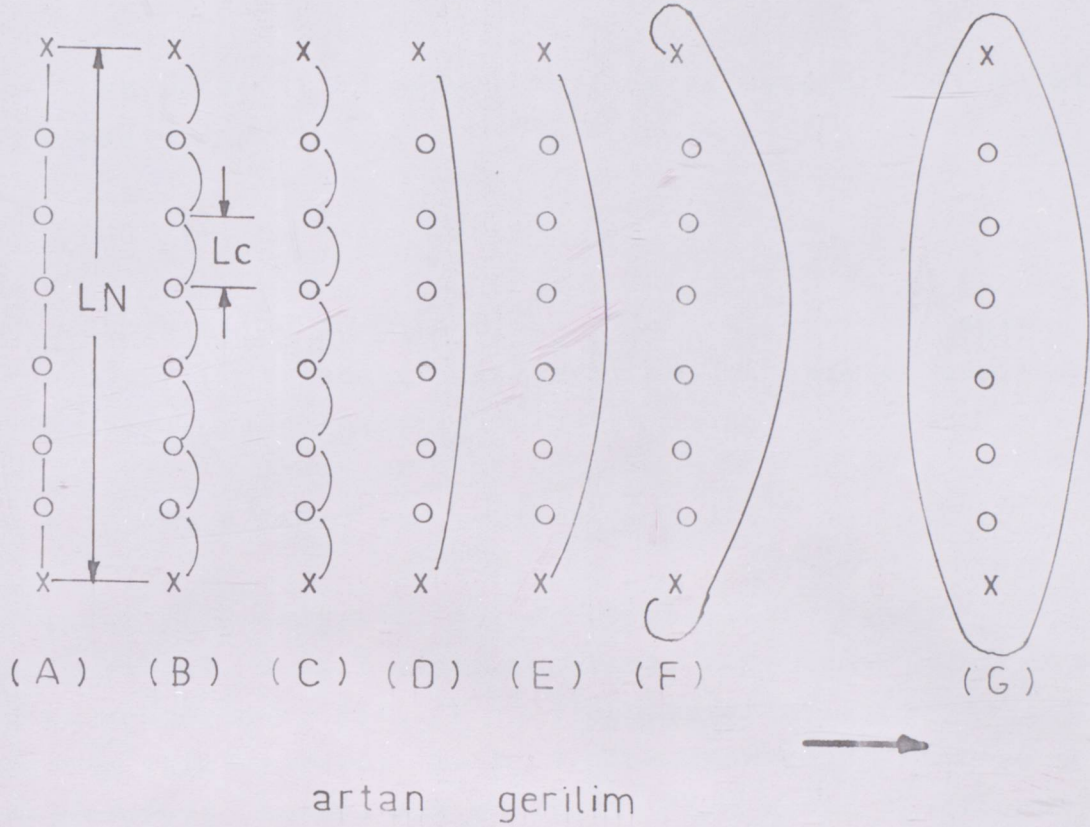
**Pinning Point

***Dislocation Segment

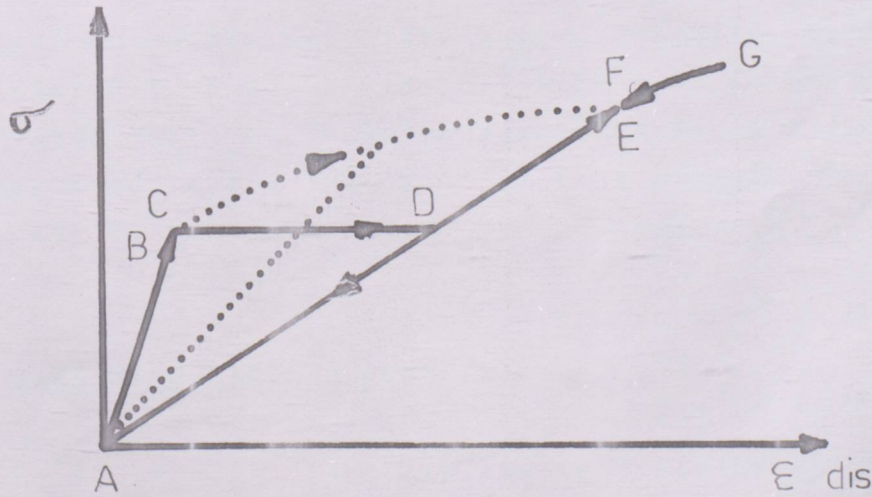
absorblanan enerji iç sürtünmeye neden olmaktadır.



ŞEKİL 1.7- (a) Dislokasyonlarda sönüm, uygulanan periyodik gerilimin genliğine bağlı olan ve olmayan logaritmik azalmalar.
(b) Genliğe bağlı logaritmik azalmanın (δ_H), $\epsilon \rightarrow 0$ '-daki δ_I (Genliğe bağlı olmayan logaritmik azalma) değerleri çıkarılarak elde edilmesi.



ŞEKİL 1.8- Dislokasyon İp Modeli. Yabancı atomlar tarafından kilitlenen bir dislokasyonun tatbik edilen gerilimin artışıyla bükülmesi (bombeleşmesi). L_N =Yabancı atomların kilitlenmesi ile oluşan dislokasyon parçasının boyu; L_C =Dislokasyon ağı kilit noktaları tarafından tayin edilen dislokasyon ağı parça boyu(7).



ŞEKİL 1.9- Granato-Lücke Modelinde Gerilim Uzama İlişkisi. Şekil 1.9.a tekabül eden gerilme ABCDEF, azalan gerilme için FA. Noktalı çizgi dislokasyon parça boylarının (L_C) dağılımı mevzu bahis olduğu zamanki gerilme-uzama eğrisini göstermektedir. ABCD olanı histerezis kaybını göstermektedir (Granato-Lücke, 1956)(7)

Granato ve Lücke(8) bu modeli kullanarak aşağıdaki eşitliği elde etmişlerdir.

$$\delta_H = (C_1/\epsilon_o) \exp(-C_2/\epsilon_o) \quad (1.12)$$

Bu eşitliğe göre $\ln(\delta_H \cdot \epsilon_o)$ ile $1/\epsilon_o$ eğrisini eğimi lineer olmalıdır. Friedel(9) ise aynı yoldan hareket ederek, genliğe bağlı olan logaritmik azalma için,

$$\delta_H \approx w_o b / 20 W L_c \exp \left[-W(\sigma - \sigma_1) b d L_c / K T \right] \quad (1.13)$$

eşitliğini elde etmiştir. Burada w_o atomik frekans, σ_1 sür-tünme gerilimi, d aktivasyon mesafesi, k Boltzman sabiti, b Burgers vektörüdür. Eşitlik 1.13'den yararlanılarak, $\ln \delta_H - \epsilon_o$ eğrisinin eğimi yardımı ile L_c dislokasyon düğüm noktaları arası mesafeyi hesaplamak mümkündür ($b \approx d$ olarak alınabilir)(10).

Peguin, Perez, Gobin(10) ise δ_H için;

$$\delta_H = A / 2 \epsilon_o \Omega \exp \left[B(\epsilon_o - \epsilon_p) \right] \quad (1.14)$$

eşitliğini buldular. Eşitlikte geçen, Ω =Sabite, ϵ_p =Kritik uzama değeridir. B sabiti ise $\alpha V G / k T$ olup (α =Dizilme faktörü, V olayda aktif dislokasyon ağının hacmi, G kayma modülüdür) eğer $\ln(\delta_H \cdot \epsilon_o)$ ϵ_o eğrisini çizecek olursak, bu değer yardımı ile V aktivasyon hacmi hesaplanmaktadır.

1.3. TANE SINIRLARINDA SÖNÜM

Ke'ye göre(11) tane sınırlarının birleştiği bölge belirli bir kristal yapısı olmayan tabaka oluşturmaktadır. Tanelerin birbirleri ile yaptığı açılar küçük olduğu için, dislokasyonlar birbirleri ile aynı yönde ve işarettedir(13).

Farklı yönlerde dizili atomları olan iki tanenin oluşturduğu sınırdaki da Şekil 1.10'da gösterilen sınır dislokasyonu meydana gelmektedir(12). Hirth ve Balluffi tarafından ileri sürülen teoriye göre oluşan Burgers vektörü Şekil 1.10(b)'de $F_1 F_2$ arasında görülmektedir. Tane sınırında bu şekilde oluşan dislokasyonların periyodik gerilim altında Bölüm 1.2.'de açıklandığı gibi iç sürtünmenin oluşmasına neden olduğu ve bu dislokasyonların bu etki sonucu kayma gösterdiği Gates tarafından(13) ileri sürülmüştür.

1.4. İÇ SÜRTÜNMENİN HESABI VE TEMEL SÖNÜM EĞRİSİ*

İç sürtünme, önce logaritmik azalma (δ) ölçülüp daha sonra hesaplanmaktadır. Serbest salınım tekniği ile δ 'nın ölçülmesi salınım genliğinin azalmasının ölçümüne dayanır. Belirli bir titreşim genliği ile salınım hareketi verilen metalik malzemenin titreşim genliği zamanla bağlı olarak azalma göstermektedir. Şekil 1.11'de görüldüğü gibi $t=0$ anında A_0 olan genlik n salınım sonra A_n genliğine gelmekte ve bu halde, δ logaritmik azalma değeri

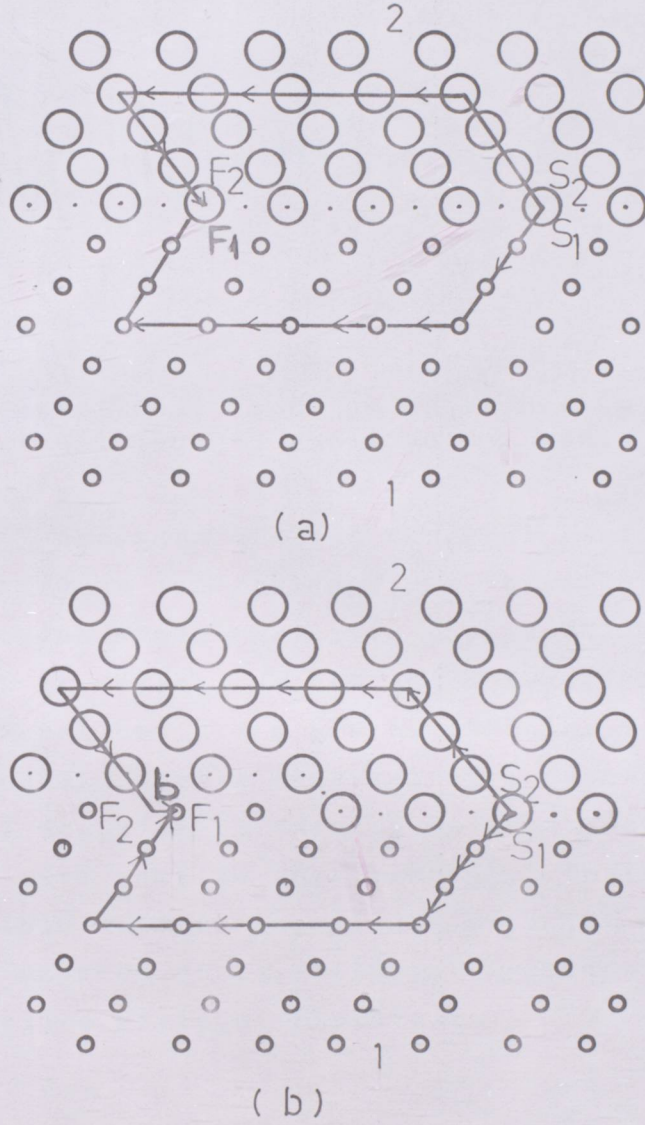
$$\delta = 1/n \ln(A_0/A_n) \quad (1.15)$$

dir. A_0/A_n oranı 2 iken salınımı karakterize eden en iyi değerler elde edildiği için $\ln 2$ değeri formülde yerine konularak,

$$\delta = (1/n) 0.6931 \quad (1.16)$$

elde edilir. Dolayısı ile $A_0/A_n = 2$ aralığında salınım sayısı biliniirse logaritmik azalma ve ona bağlı olan iç sürtünme hesaplanmış olur ($Q^{-1} = \delta/\pi$). Çeşitli sıcaklıklarda ölçülen δ '-

*Bu terim İngilizce, "Background damping curve" un karşılığı olarak kullanılmıştır.



ŞEKİL 1.10- YMK Kristalde İkiz Düzlemi

(a) Normal İkiz Teşekkülü

(b) İkiz Sınırı İkiz Dislokasyonu İhtiva ediyor.

0 Tane 1'e ait atomlar

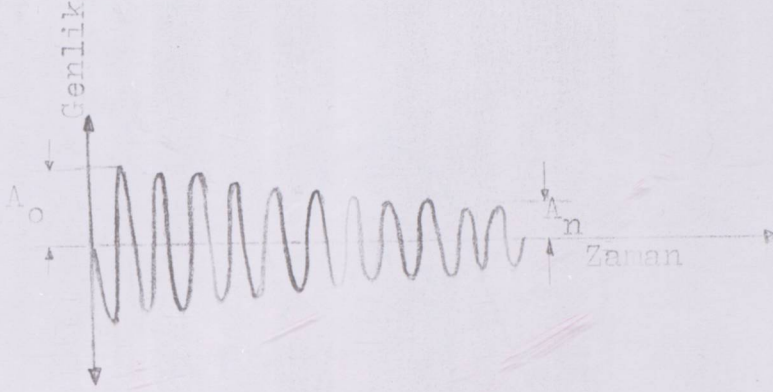
. Tane 2'ye ait atomlar.

S_1 ve S_2 Tane 1 ve Tane 2'den dislokasyon çevrimi başlangıç noktaları.

F_1 ve F_2 Tane 1 ve Tane 2'nin dislokasyon çevrimi bitim noktaları.

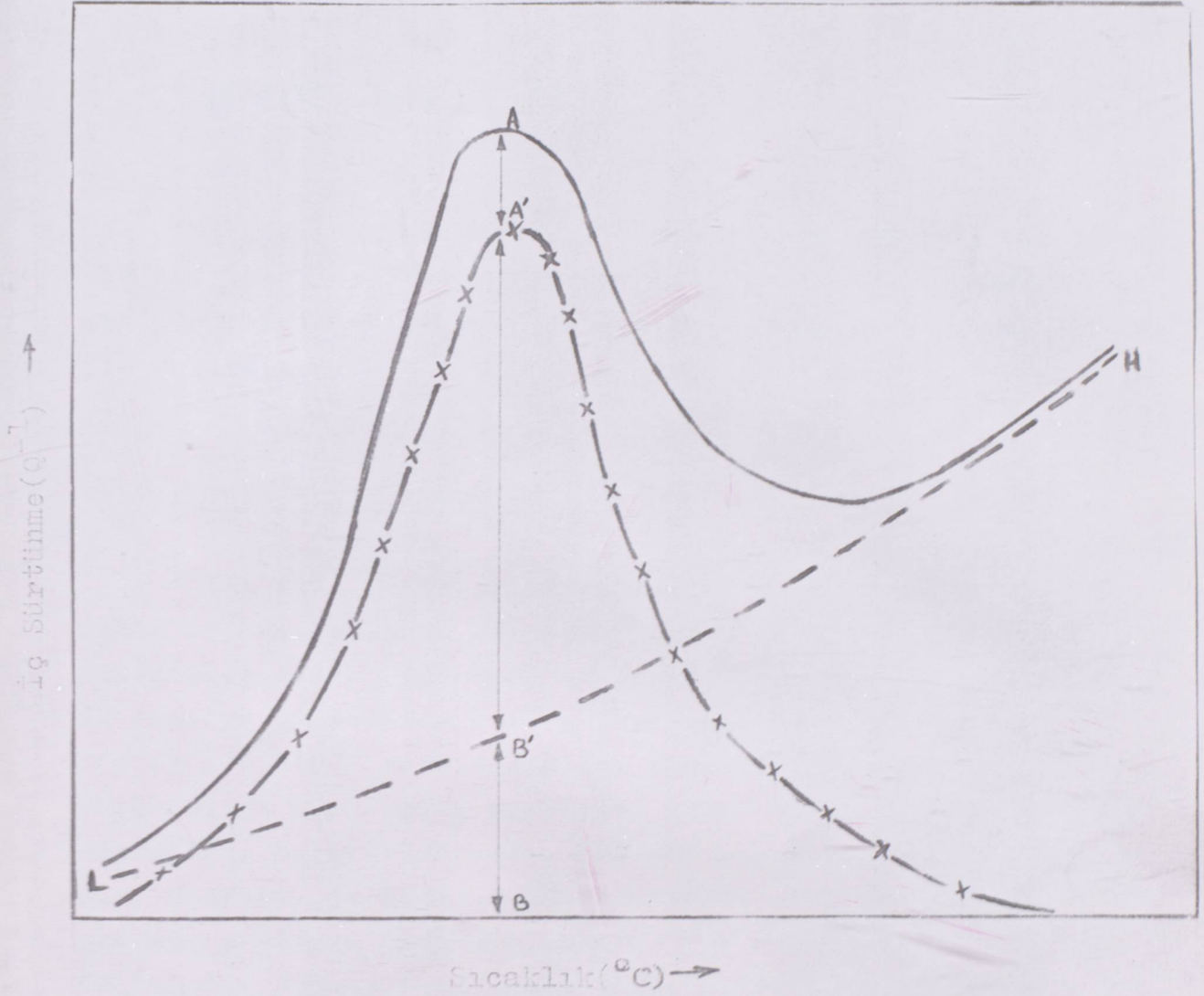
b = Burgers vektörü

(Hirt ve Balluffi)(12).



ŞEKİL 1.11- Torsiyonal Pendulum'da serbest salınıma terkedi-
len numunenin genliğinin zamanla değişmesi

lar ile $T(C^0)$ arasında çizilen deneysel eğri Şekil 1.12'de gösterilmiştir. Bu deneysel eğriden, termal aktivasyon sonucu hasıl olan temel sönüm eğrisinin (Şekil 1.12) çıkarılması gerekir. Düşük sıcaklıklarda çok küçük değerlerdeki temel sönüm sıcaklıkla üstel bir artış göstermektedir. Tane sınırı içi sürtünme sıcaklık eğrisi deneysel eğri değerlerinden temel sönüm eğrisi değerleri çıkarılıp bulunmaktadır. Fark alınıp elde edilen eğri şekilde görülmektedir. Bu işlem yapılırken, sönüm eğrisinin hatasız teşkil edilmesi çok önemlidir. Deneysel eğrinin ekstrem noktaları üstel fonksiyon oluşturacak biçimde dikkatlice birleştirilmelidir.



ŞEKİL 1.12- Sönüm Eğrisi (—)

Temel Sönüm Eğrisi (---)

Özel Mono Kristalin Metal Sönüm Eğrisi (-.-.-.)

Deneyssel olarak sıcaklığa bağlı-logaritmik azalma eğrisinden temel sönüm eğrisi L ve H extrem noktalar birleştirilip bulunur. Eğrinin her noktası için $\overline{AB}-\overline{BB'}$ farkı alınıp $\overline{BA'}$ normalize edilmiş logaritmik azalma eğrisi (-X-) teşkil edilir(4,6).

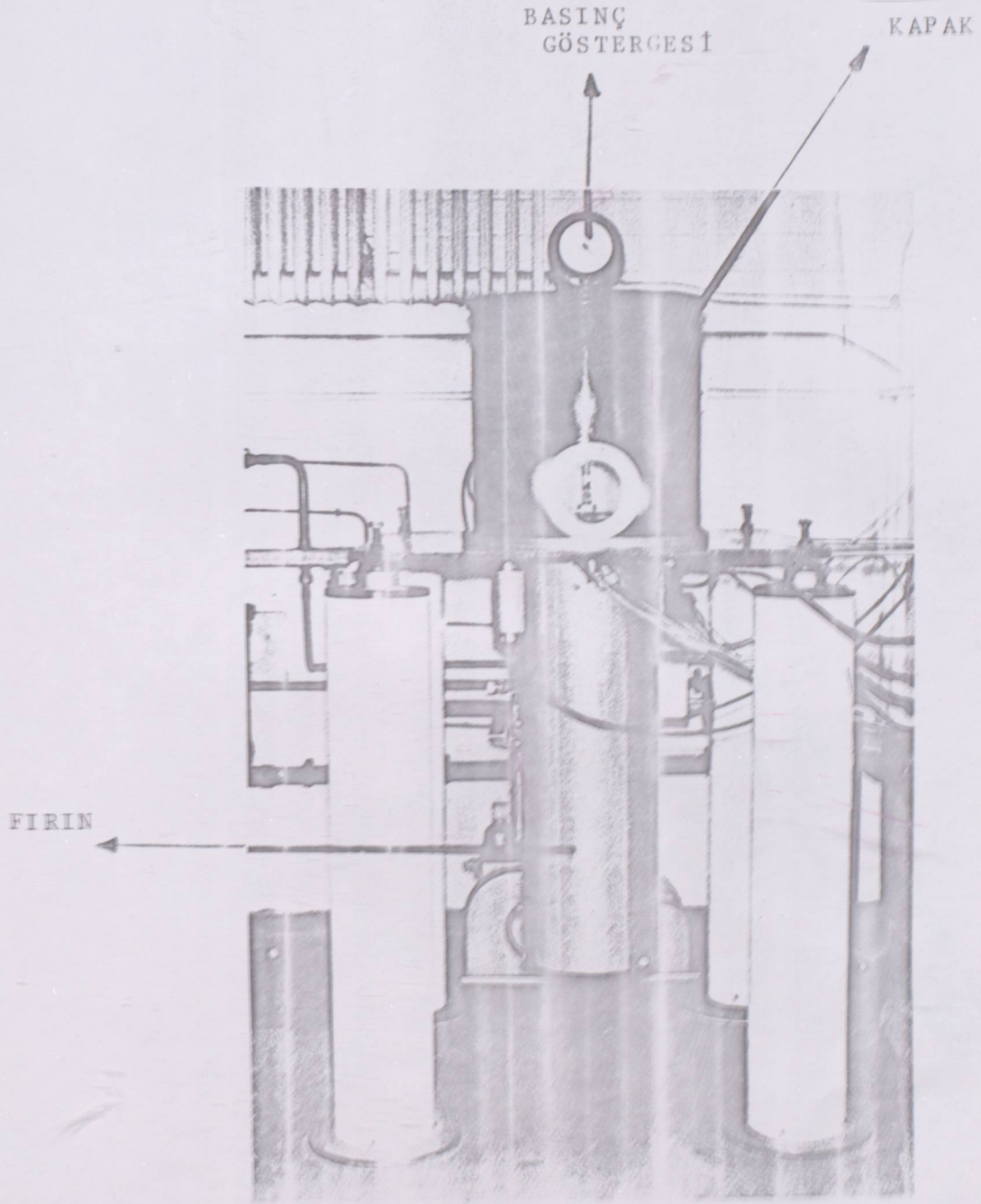
2. DENEYSEL İNCELEMELER

İç sürtünme ölçmeleri, Şekil 2.1 ve Şekil 2.4'de görülen torsiyonel pendulum yardımı ile, Bölüm 1.4'de anlatıldığı şekilde yapılmıştır. Aşağıda cihaza ait bilgiler ayrıntıları ile verilmiştir.

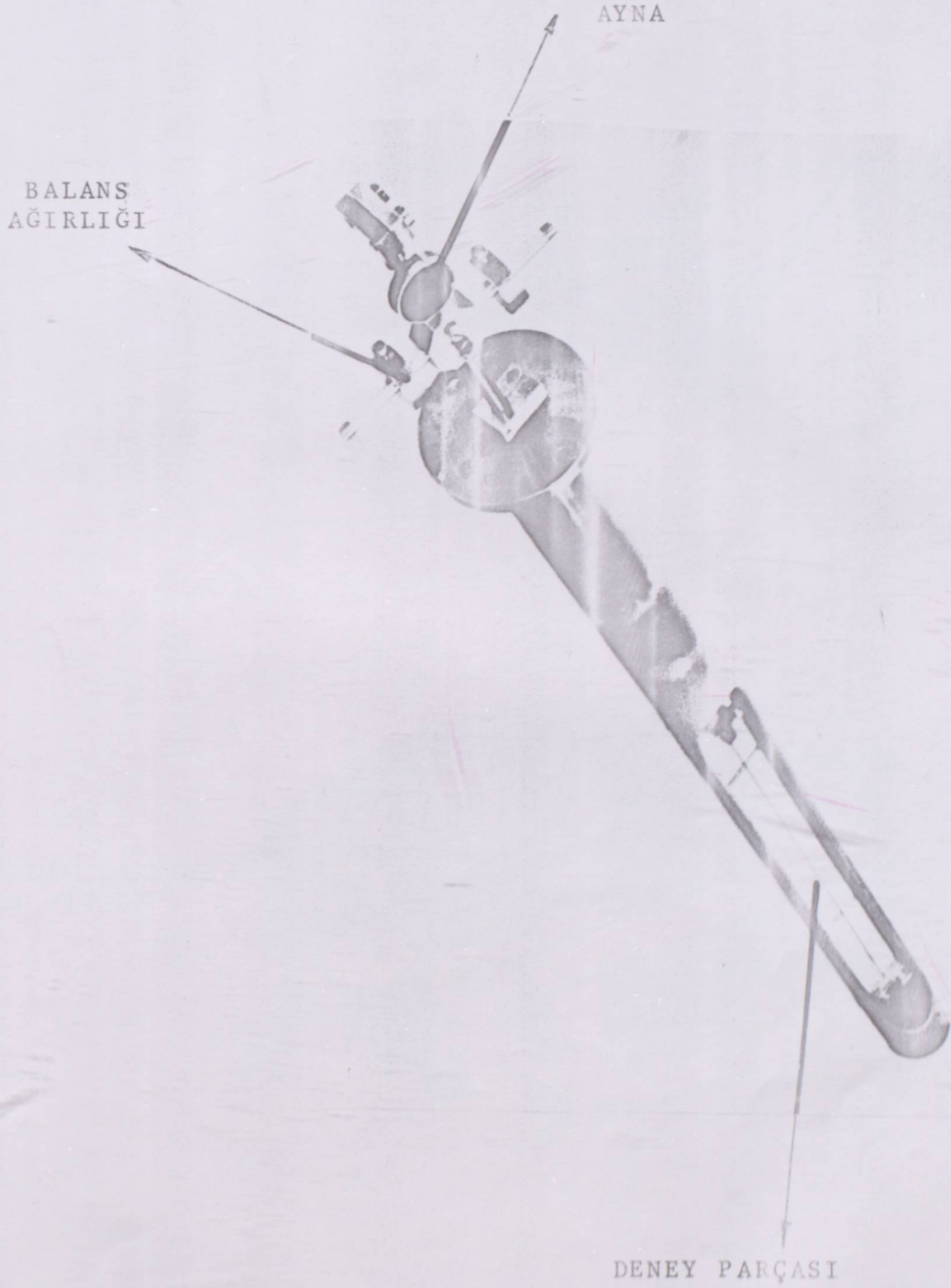
2.1. TORSİYONAL PENDULUM

İlk defa DeMorton(15) tarafından geliştirilen bu cihazla serbest salınım tekniği kullanılarak sönüm ölçmesi yapılabilmektedir. Günümüzde bu tip cihazlar düşük frekanslarda yapılan ölçmelerde halâ kullanılmaktadır. Oda sıcaklığı (20°C) ile 900°C arasında ölçme yapılması mümkündür. Deney parçalarına ısıtılma işlemi gerektiği zaman cihaz içinde yapılması mümkündür. Deneylerde daire kesitli numuneler kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda hassasiyeti azaltan titreşimleri minimum seviyeye indirmek maksadı ile özel şekilde teçhiz edilmiştir. Deney parçasının içine oturduğu rezistanslı fırında vakum ortamı oluşturan pompalar mevcuttur.

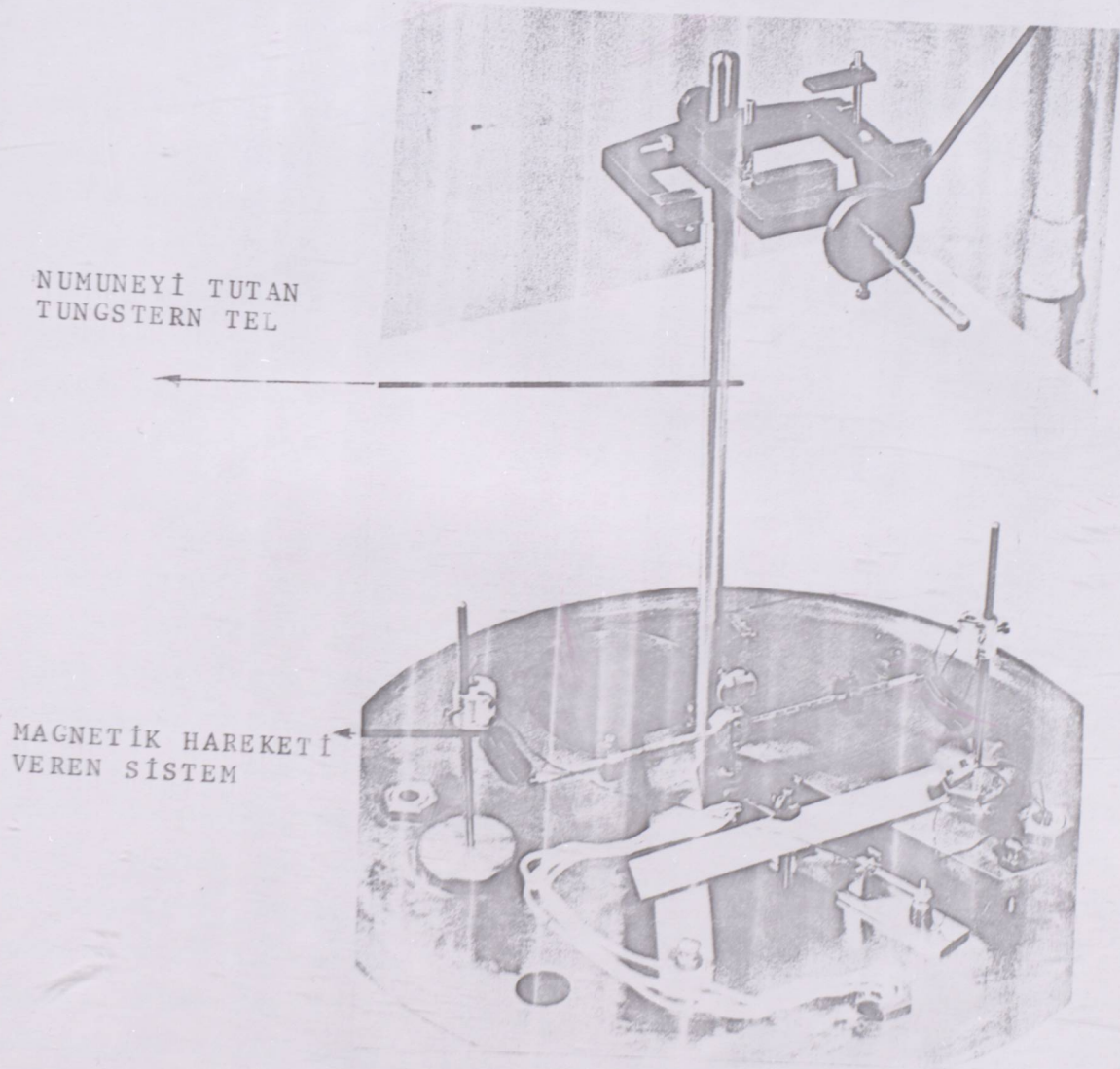
Ölçme yapılırken bir laser ışık kaynağı ve bir kaydedici (Şekil 2.4) salınım genliğinin ve azalmasının tesbitini yapmaktadır. Fırın (Şekil 2.1), numune tutucu (Şekil 2.2), üsttede (Şekil 2.3) magnetler vasıtası ile salınım hareketi veren bir tertibat bulunmaktadır. Salınım hareketi dışarıdan kontrol edilebilmektedir. Sıcaklık kontrolü kromel-alumel termokupllar yardımı ile hassas yapılabilmektedir. Deney esnasında elde edilen 10^{-5} Torr'luk basıncın ve fırının soğuma ve ısıtma hızının dışarıdan kontrol imkanı vardır. Ayrıca uygulanan titreşimin genliği istenilen düzeylerde tutulabilmektedir.



ŞEKİL 2.1- Torsiyonal Pendulum Ünden Görünüş.



ŞEKİL 2.2- Numune Tutucu



ŞEKİL 2.3- Cihazın Üst Kısmı

2.2. DENEY PROGRAMI VE NUMUNE HAZIRLAMA

Yapılan deneyler üç ana grupta toplanabilir. Bunlar, sabit titreşim genliğinde, değişen titreşim genliğinde ve farklı tane büyüklüğünde yapılan sönüm ölçmelerini kapsamaktadır.

Birinci grupta, frekans 0.29 Hz ile 1.92 Hz arasında değiştirilip titreşim genliği sabit tutulmuştur. Bütün numuneler 400°C'da 16 saat tutulup daha sonrada 575°C'da 2 saat tavllanmışlardır. Sonuçta elde edilen logaritmik azalma (δ)-sıcaklık (°C) eğrileri yardımı ile iç sürtünme sıcaklık eğrileri, düzeltilmiş sönüm eğrileri, bu eğrilere ait β parametreleri, aktivasyon enerjisi (Q) hesabı için $\ln(\frac{1}{2\pi f}) - 1/T_p$ eğrisi (Şekil 3.6), her farklı frekans değeri için T_p sıcaklıkları, gevşeme zamanı (τ), $\Delta \epsilon$ sönüm kuvveti hesabı yapılmıştır.

İkinci grup deneylerde, frekans 0.29 Hz'de sabit tutulup titreşim genliği 0.52×10^{-5} ile 2.6×10^{-5} arasında değiştirilip 196°C-550°C'larda 20°C aralıklarda sönüm ölçüldü (Bu seri deneylerde bütün deney parçaları 575°C'da 2 saat tavlansmıştır). Elde edilen δ (logaritmik azalma)- ϵ eğrileri yardımı ile $\delta_H - \epsilon$ eğrilerine geçiş yapıldı (Şekil 1.7 ve Bölüm 1.2). Bu işlem $\epsilon=0$ değerine ulaşılan δ_I değerlerinin (Şekil 1.7) bulunan her deneysel δ değerinden çıkarılması suretiyle bulunmuştur. Böylelikle deneysel eğriler yardımı ile yarı logaritmik skala kullanılıp, $\ln \delta_H - \epsilon$, $\ln(\delta_H \cdot \epsilon)$ ve $\ln \delta_H - 1/T(K)$ eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerden yararlanılarak L_c (düğüm noktaları arası mesafeler), V (aktivasyon hacmi) ve bağlanma enerjileri hesaplanmıştır (Hesap tekniği 3.Bölümde verilmiştir).

Üçüncü grup deneylerde tane büyüklükleri, uygulanan ısıtıl işlem süresi değiştirilerek farklı tutulmuş ve sönüm

ölçmeleri yapılmıştır. Sonuçta tane büyüklüğüne bağlı olarak Q^{-1} (İç sürtünme) değişimi grafiği elde edilmiştir.

Deneylerde sıcaklık ölçmesi, deney parçası önce deney sıcaklığına kadar ısıtılıp, daha sonra soğutma yapılırken $\pm 1^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle, bir potansiyometre yardımı ile yapılmıştır. Her ölçmede salınımın frekansı bir kronometre ile ölçülmüştür. Deney parçasının bulunduğu fırın ortamının basıncı sürekli olarak kontrol edilip 10^{-5} Torr'da tutulmuştur. Fırın ısıtma hızı 50°C/saat , soğutma hızı ise 2°C/dakika olarak ayarlanmıştır. Isıl işlemler torsiyonel pendulum içinde vakum ortamında yapılmıştır. Frekans değerlerindeki eğim sapması maksima tesbitinde esas alınmıştır(16).

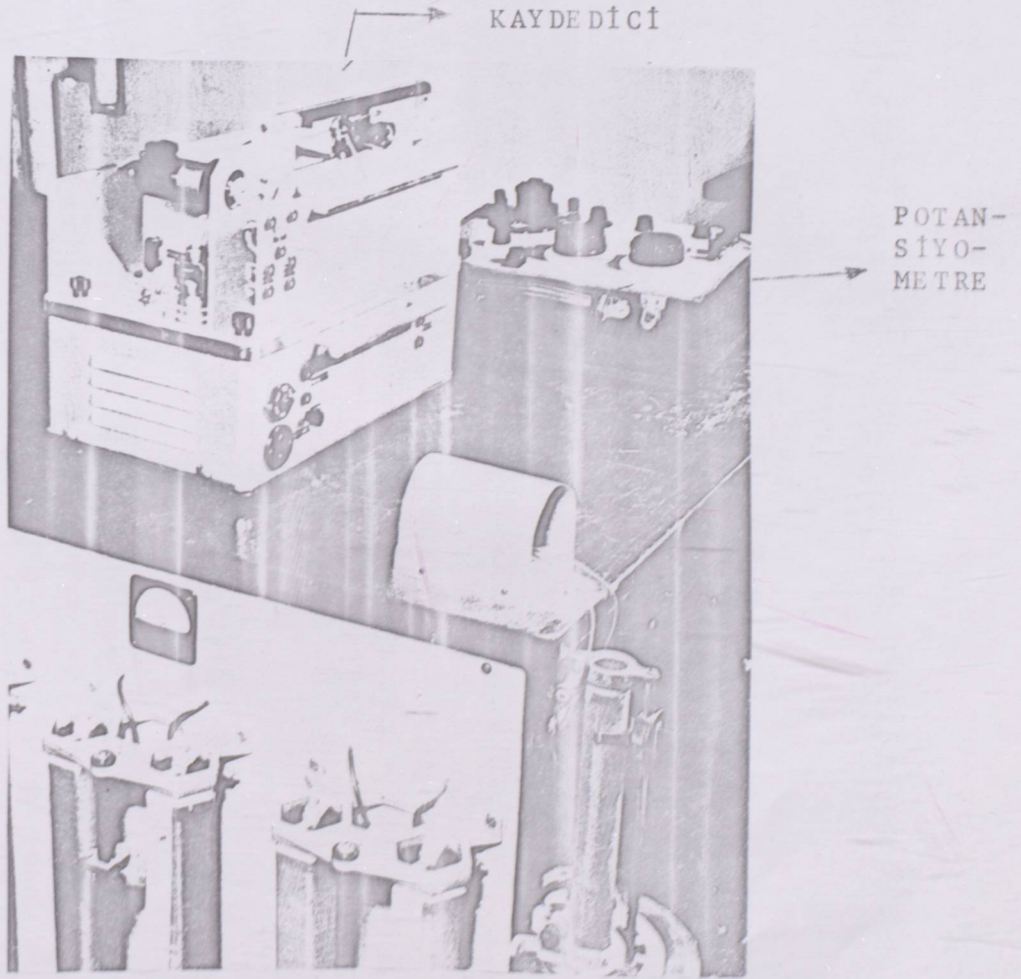
Numunelerin hazırlanması laboratuarda mevcut tel çekme cihazında ve ara tavi yapılmadan, 4 mm çaplı telin $0.752\text{ mm}'$ ye indirilmesi ile yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelerin boyu 10.7 cm olup, kaydedici (Şekil 2.4) ile cihaz arasındaki mesafe 3.37 m olarak ölçülmüştür. Bu mesafenin önemi titreşim genliğine bağlı sönüm ölçmeleri yapılırken ortaya çıkmaktadır. Çünkü, aşağıdaki formül gereğince,

$$\epsilon = \frac{r\Delta}{2LR} = r \gamma / l \quad (2,1)$$

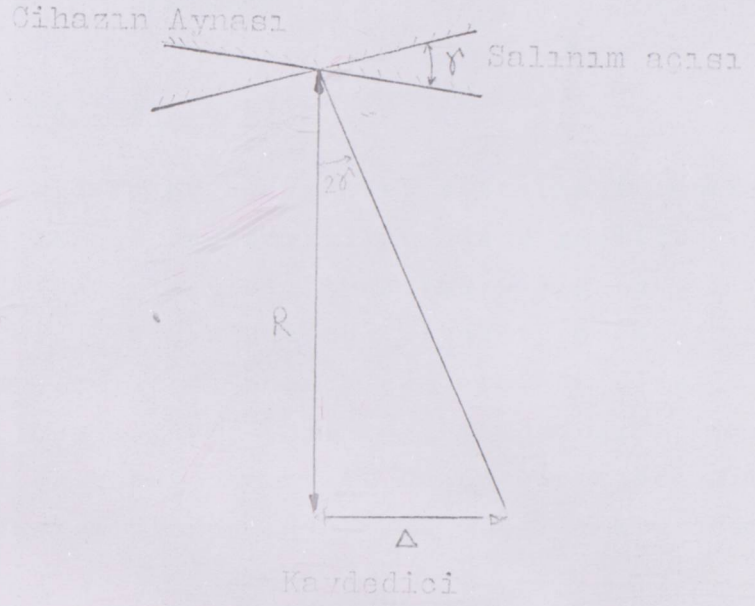
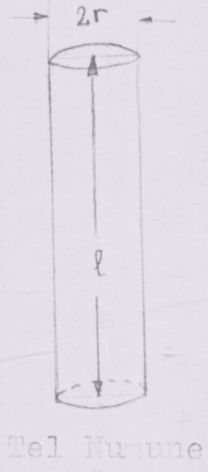
R = kaydedici numune arası uzaklık, ϵ = uzama genliği*
 γ = salınım açısı, Δ = tek yönde salınım açıklığı, r = numune çapı, l = numune boyu'dur. Eşitlik 2.1 in elde edilmesi Şekil 2.5 yardımı ile kolayca görülebilir.

Deneyssel çalışmalarda Δ mesafesi değiştirilip, ϵ 'un farklı değerlerde elde edilmiştir.

*Bu terim İngilizce "Surface Shear Strain" in karşılığı olarak kullanılmıştır.



ŞEKİL 2.4- Kaydedici ve Potansiyometre.



ŞEKİL 2.5- Genliğin değişmesinin şematik görünümü.

3. DENEY SONUÇLARI VE YORUMLAMA

3.1. SABİT GENLİKTE YAPILAN DENEYLER

Deneysel çalışmaların bu bölümünde, titreşim frekansı 0.29 Hz ile 1.92 Hz arasında değiştirilip, uzama genliği (ϵ) sabit tutuldu. Bu şartlarda, logaritmik azalma (δ) sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. 600°C'dan oda sıcaklığına kadar 20°C aralıkla yapılan ölçmelerde numuneler önce 400°C'da 16 saat tutulup fırın içinde soğutma yapıp fırından çıkarılma-
dan tekrar 575°C'da 2 saat tavlammıştır. Deney bitiminde fırından çıkarılan numunelerin tane büyüklüğü ölçülerek 0.5 mm olarak bulunmuştur.

3.1.1. Deney Sonuçları

Şekil 3.1-Şekil 3.5'te görülen iç sürtünme-sıcaklık eğrilerinden,

- a) Maksima tepe yüksekliği* sıcaklığı,
- b) Maksima tepe yüksekliği iç sürtünme değeri,

hakkında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Farklı frekanslarda, maksima yüksekliğinde büyük bir değişme görülmezken, maksima tepe noktası sıcaklığı 212°C ile 240°C arasında değişmektedir. Bu inceleme yapılmadan önce, Şekil 1.12 ve Bölüm 1.4'de belirtilen metodla eğriler düzeltilmiş ve bu hali ile Şekil 3.1-Şekil 3.5 üzerinde gösterilmiştir.

*Bu terim ingilizce "Peak Temperature (Tp)" in karşılığı olarak kullanılmıştır.

Şekil 3.6'da Bölüm 1.1 (Sayfa 8, Eşitlik 1.7)'de anlatılan yolla farklı frekans değerlerinde elde edilen maksima tepe noktası sıcaklıklarına (T_p) dayanılarak Q aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. Çünkü bu eğrinin eğimi ($\ln \tau - 1/T_p$) Q/R'ye ve ordinatı kestiği noktanın değeri de τ_0 sabitine eşittir. Alınan sonuçlarda, $Q=31$ kcal/mol, $\tau_0=2.85 \times 10^{-15}$ s bulunmuştur. Şekil 3.7'de ise her farklı frekans değeri için elde edilen düzeltilmiş eğrilerde (Şekil 3.1-Şekil 3.5) eğri tepe noktasına ait δ_{max} değerlerinin ait olduğu sıcaklıklar ve her bir eğriye ait β değerlerinin mukayesesi görülmektedir. β 'ların hesabı Bölüm 1.1 (Sayfa 9)'de anlatılan metodla yapılmıştır. Şekil 1.7'ye göre $\beta-T(K)$ değişmesi lineer yakın, $\delta_{max}-T(K)$ eğrisi ise yataya yakın bir görünümündedir. Şekil 3.8'de gevşeme kuvveti (Δe) her bir frekans için, Eşitlik 1.9 yardımı ile bulunup, sıcaklıkla olan değişimi gösterilmiştir.

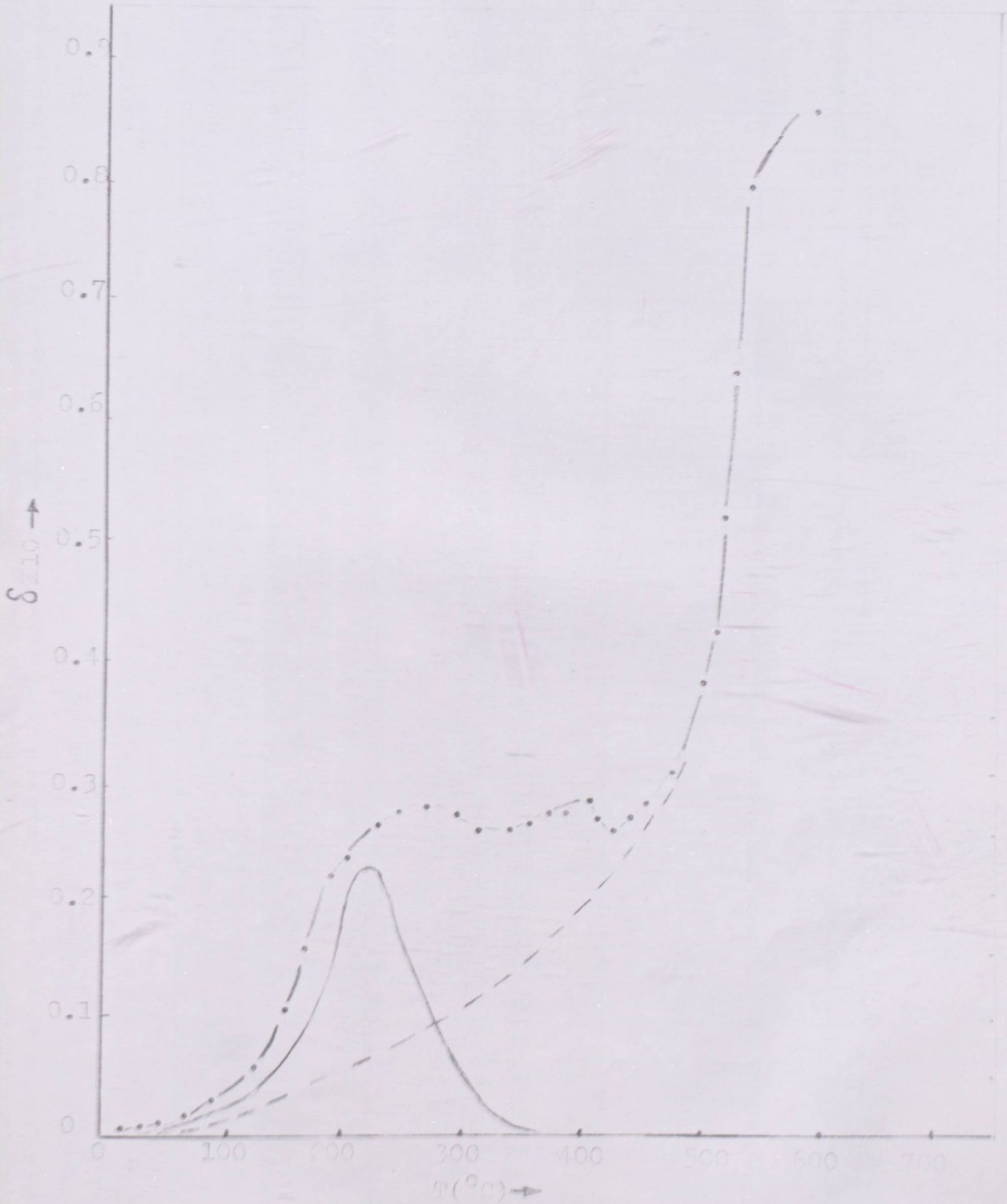
3.1.2. Yorumlama

Düşük sıcaklık maksimaları ilk defa Ke(14) tarafından bulunduğu zaman bunların tane sınırlarında meydana geldiği ileri sürüldü. Williams ve Leak(16), maksima tepe noktası sıcaklığı (T_p) için, tane büyüklüğü 0.045-0.050 mm arasında iken meydana gelen değişikliklerin önemli seviyede olduğunu, maksima tepe noktası yüksekliği (Q^{-1}_{max}) değişiminin daha az olduğunu bulmuştur. Rotherham ve Pearson(17)'de benzer sonuçları elde etmişlerdir. D.T.Peter ve Spretnak(18), aktivasyon enerjisi (Q) ve τ_0 sabitini diğer araştırmacılardan farklı bulmuşlardır. Fakat yine bu araştırmacılar, T_p ve Q^{-1}_{max} değerlerini Ref.16-Ref.17'ye yakın olarak elde etmişlerdir. Δe gevşeme kuvveti içinse Shredow(19) farklı değerler bulmuştur.

TABLO 3.1- Şekil 3.1'e ait deney sonuçları

t (sn)	f ²	δ	Q ⁻¹	T(ε)
31.75	0.0992	0.0943	0.0300	650
31.60	0.1001	0.0922	0.0293	640
31.50	0.1007	0.0903	0.0287	620
31.45	0.1011	0.0891	0.0283	600
31.30	0.1020	0.0888	0.0282	580
30.85	0.1050	0.0815	0.0259	560
30.60	0.1067	0.0650	0.0207	540
30.40	0.1082	0.0426	0.0135	520
30.00	0.1111	0.0401	0.0128	500
29.82	0.1124	0.0318	0.0101	480
29.50	0.1145	0.0282	0.0090	460
29.45	0.1153	0.0271	0.0086	440
29.30	0.1164	0.0256	0.0082	420
29.16	0.1176	0.0269	0.0086	400
29.00	0.1189	0.0272	0.0087	380
28.85	0.1201	0.0277	0.0088	360
28.77	0.1208	0.0263	0.0083	340
28.42	0.1238	0.0261	0.0085	320
28.30	0.1248	0.0264	0.0084	300
28.24	0.1254	0.0282	0.0090	280
27.90	0.1282	0.0298	0.0095	260
27.70	0.1303	0.0288	0.0092	240
27.60	0.1312	0.0270	0.0086	220
27.35	0.1336	0.0252	0.0080	200
27.30	0.1341	0.0216	0.0069	180
27.15	0.1356	0.0152	0.0048	160
27.00	0.1371	0.0115	0.0036	140
26.85	0.1387	0.0085	0.0025	120
26.75	0.1397	0.0045	0.0007	100
26.60	0.1413	0.0022	0.0005	80
26.50	0.1423	0.0017	0.0004	60
26.45	0.1429	0.0014	0.0003	40
26.40	0.1434	0.0012	0.0002	20

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$

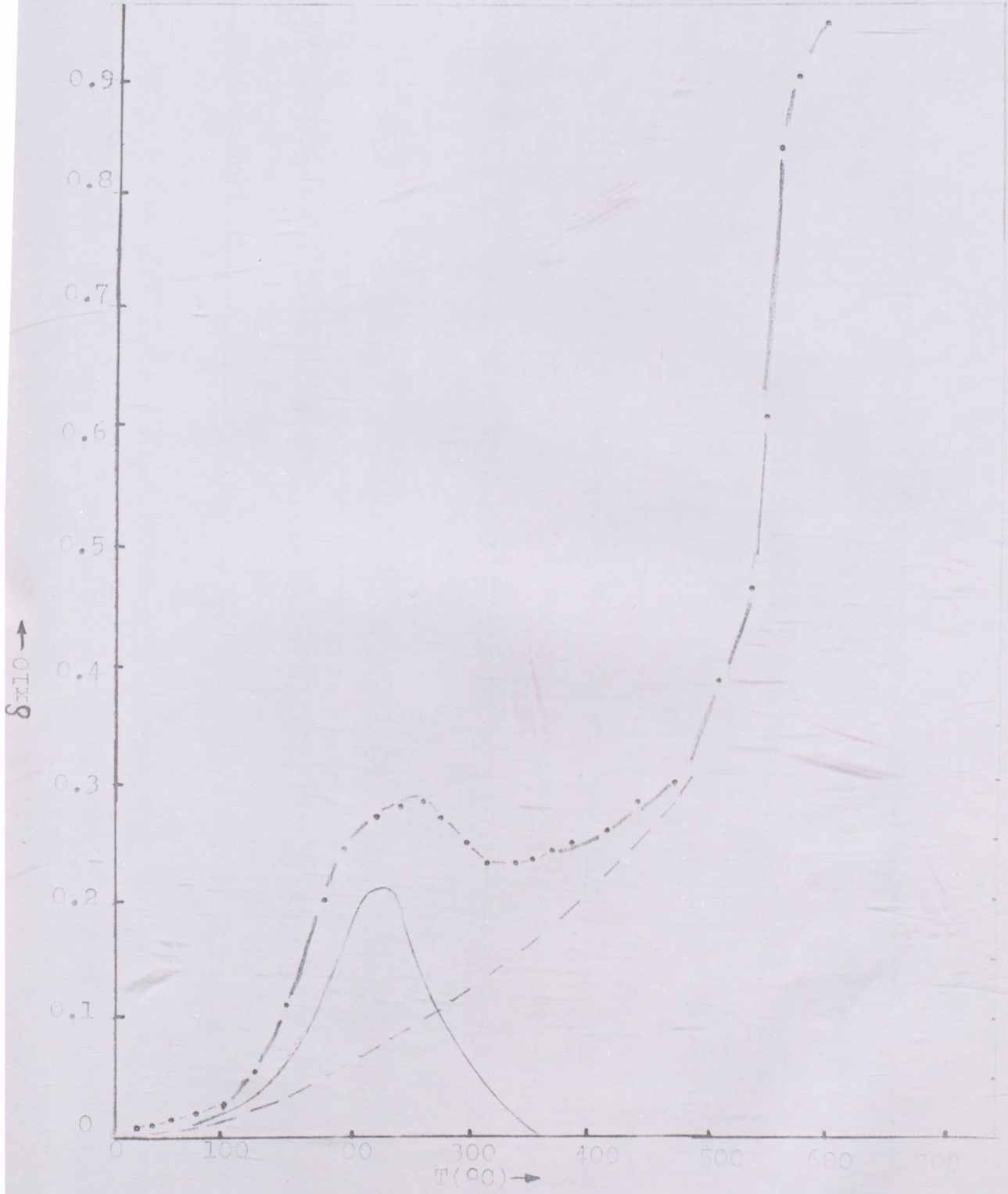


ŞEKİL 3.1- 0.29 Hz'de 575°C da 2 saat tutulan parçada logaritmik azalmanın sıcaklıkla değişmesi ($T_p=212^{\circ}\text{C}$, $\beta=4,25$ ve $S_{\max}=0,220$).

TABLO 3.2- Şekil 3.2'ye ait deney sonuçları

t (sn)	f ²	δ	Q ⁻¹	T(ε)
19.02	0.275	0.1010	0.0321	650
18.83	0.281	0.1003	0.0319	640
18.70	0.285	0.0984	0.0313	620
18.55	0.290	0.0956	0.0304	600
18.30	0.298	0.0906	0.0288	580
18.15	0.303	0.0858	0.0273	560
17.85	0.313	0.0630	0.0201	540
17.40	0.330	0.0468	0.0149	520
17.20	0.338	0.0379	0.0120	500
16.95	0.348	0.0330	0.0105	480
16.85	0.352	0.0326	0.0102	460
16.70	0.358	0.0320	0.0101	440
16.50	0.367	0.0304	0.0096	420
16.20	0.381	0.0288	0.0091	400
16.10	0.385	0.0277	0.0088	380
15.95	0.393	0.0274	0.0087	360
15.83	0.399	0.0266	0.0085	340
15.78	0.401	0.0256	0.0082	320
15.50	0.416	0.0256	0.0082	300
15.40	0.421	0.0267	0.0085	280
15.00	0.444	0.0288	0.0091	260
14.82	0.455	0.0294	0.0093	240
14.75	0.459	0.0286	0.0091	220
14.65	0.465	0.0274	0.0087	200
14.38	0.483	0.0241	0.0076	180
14.22	0.494	0.0117	0.0037	160
14.01	0.509	0.0062	0.0019	140
13.85	0.521	0.0035	0.0011	120
13.80	0.525	0.0021	0.0006	100
13.60	0.540	0.0017	0.0005	80
13.45	0.552	0.0011	0.0003	60
13.35	0.561	0.0010	0.0002	40
13.25	0.569	0.0010	0.0002	20

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$

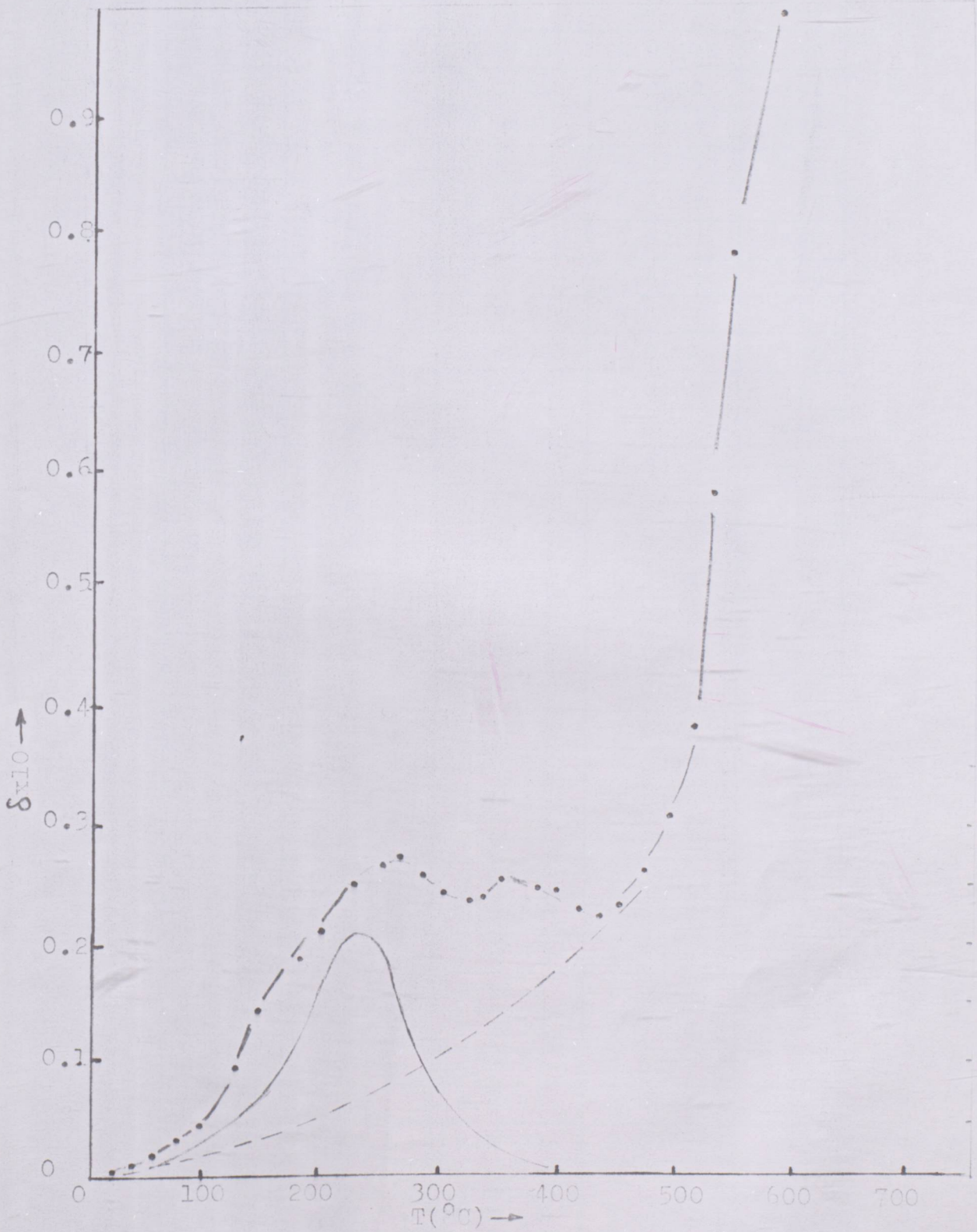


ŞEKİL 3.2- 0.56 Hz'de 575°C da 2 saat tutulan parçada iç sürtünme sıcaklık değişimi ($T_p=226^{\circ}\text{C}$, $\beta= 4.0$ ve $\delta_{\max}=0,215$).

TABLO 3.3- Şekil 3.3'e ait deney sonuçları

t (sn)	f ²	δ	Q ⁻¹	T(ε)
16.30	0.376	0.1115	0.0355	650
16.15	0.383	0.1097	0.0349	640
16.00	0.390	0.1081	0.0344	620
15.85	0.398	0.1070	0.0340	600
15.45	0.420	0.1066	0.0339	580
15.00	0.444	0.0787	0.0231	560
14.90	0.450	0.0563	0.0179	540
14.53	0.473	0.0374	0.0119	520
14.30	0.489	0.0298	0.0095	500
14.30	0.489	0.0256	0.00817	480
14.00	0.510	0.0235	0.0075	460
14.00	0.510	0.0228	0.0072	440
13.80	0.525	0.0231	0.0074	420
13.70	0.532	0.0239	0.0076	400
13.63	0.540	0.0239	0.0076	380
13.33	0.562	0.0250	0.0080	360
13.15	0.578	0.0237	0.0075	340
13.10	0.582	0.0237	0.0075	320
12.80	0.610	0.0243	0.0077	300
12.80	0.610	0.0256	0.0082	280
12.70	0.620	0.0274	0.0087	260
12.50	0.640	0.0270	0.0086	240
12.35	0.655	0.0252	0.0080	220
12.20	0.671	0.0227	0.0072	200
12.00	0.694	0.0192	0.0061	180
11.90	0.706	0.0144	0.0046	160
11.75	0.724	0.0115	0.0036	140
11.60	0.743	0.0099	0.0031	120
11.25	0.790	0.0046	0.0014	100
11.05	0.818	0.0030	0.0009	80
10.90	0.841	0.0022	0.0007	60
10.85	0.849	0.0016	0.0005	40
10.70	0.873	0.0010	0.0003	20

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$

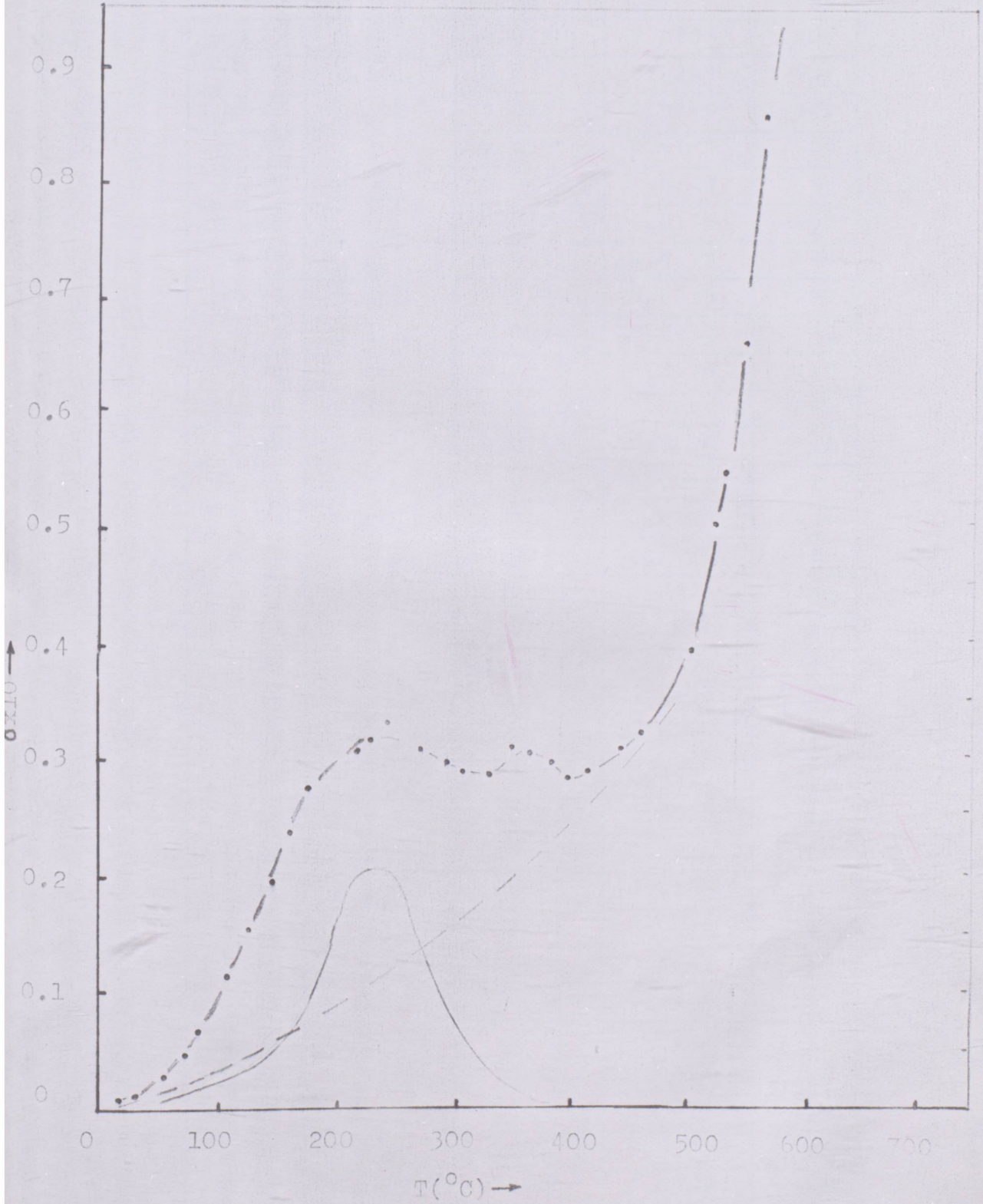


ŞEKİL 3.3- 0,86 Hz'de 575°C da 2 saat tutulan parçada logaritmik azalmanın sıcaklıkla değişmesi ($T_p=229^{\circ}\text{C}$, $\beta=3,9$ ve $\delta_{\max}=0,210$)

TABLO 3.4- Şekil 3.4'e ait deney sonuçları

t(sn)	f ²	δ	Q ⁻¹	T(ε)
12.35	0.655	0.0980	0.03119	660
12.25	0.666	0.0920	0.0292	640
12.10	0.683	0.0890	0.0285	620
11.95	0.700	0.0877	0.0279	600
11.80	0.718	0.0866	0.0275	580
11.30	0.783	0.0630	0.0200	560
11.05	0.818	0.0545	0.0173	540
10.90	0.841	0.0478	0.0152	520
10.65	0.881	0.0390	0.0124	500
10.60	0.889	0.0322	0.0102	480
10.30	0.942	0.0306	0.0097	460
10.25	0.951	0.0289	0.0092	440
10.10	0.981	0.0294	0.0094	420
10.09	0.982	0.0298	0.0095	400
9.80	0.999	0.0301	0.0096	380
9.63	1.078	0.0308	0.0098	360
9.50	1.108	0.0315	0.0100	340
9.38	1.136	0.0288	0.0092	320
9.15	1.194	0.0294	0.0093	300
9.13	1.199	0.0301	0.0095	280
9.05	1.220	0.0311	0.0099	260
8.95	1.248	0.0334	0.0106	240
8.65	1.326	0.0326	0.01038	220
8.50	1.384	0.0304	0.0097	200
8.40	1.417	0.0283	0.0090	180
8.20	1.484	0.0150	0.0047	160
8.05	1.540	0.0120	0.0038	120
7.90	1.602	0.0085	0.0027	100
7.70	1.686	0.0070	0.0022	80
7.60	1.731	0.0030	0.0009	60
7.50	1.777	0.0020	0.0006	40
7.40	1.826	0.0010	0.0003	20

$$f = \frac{10(\text{devir})}{t(\text{saniye})}$$

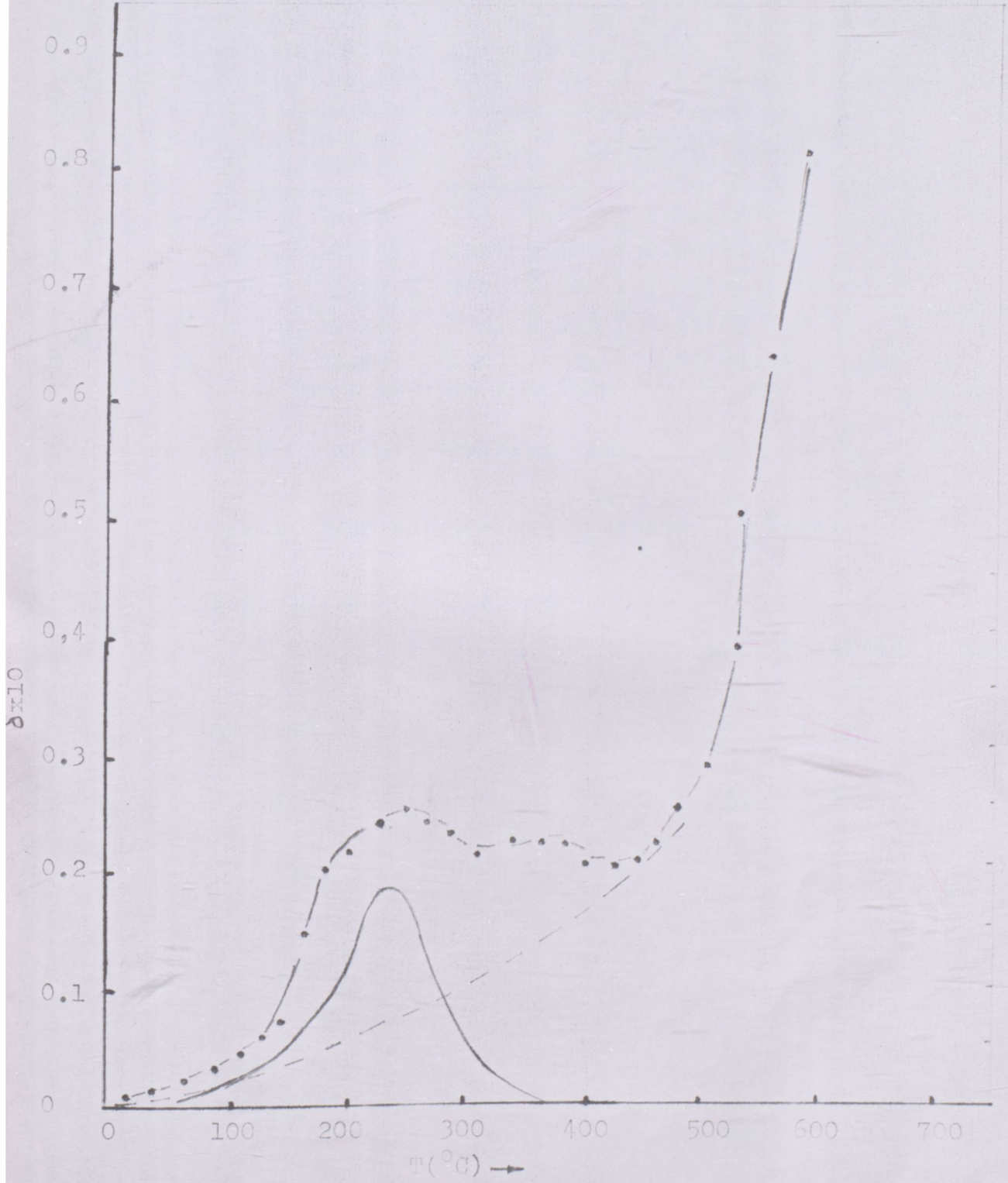


ŞEKİL 3.4- 1.17 Hz'de 575°C 'da 2 saat tutulan parçada logaritmik azalmanın sıcaklıkla değişmesi ($T_p=235^\circ\text{C}$, $\beta=3,8$ ve $\delta_{\max}=0,205$).

TABLO 3.5- Şekil 3.5'e ait deney sonuçları

t(sn)	f ²	δ	Q ⁻¹	T(ε)
9.25	0.116	0.0890	0.0283	660
9.10	0.120	0.0785	0.0249	640
8.90	0.126	0.0660	0.0210	620
8.65	0.133	0.0549	0.0174	600
8.45	0.140	0.0434	0.0139	580
8.25	0.146	0.0385	0.0122	560
8.20	0.148	0.0495	0.0158	540
7.95	0.158	0.0374	0.0119	520
7.75	0.166	0.0283	0.0090	500
7.75	0.166	0.0266	0.0085	480
7.50	0.177	0.0227	0.0073	460
7.30	0.187	0.0218	0.0070	440
7.25	0.190	0.0216	0.0069	420
7.05	0.201	0.0226	0.0072	400
7.10	0.198	0.0231	0.0074	380
6.95	0.207	0.0231	0.0074	360
6.85	0.213	0.0231	0.0074	340
6.70	0.222	0.0224	0.0071	320
6.75	0.219	0.0218	0.0069	300
6.60	0.229	0.0231	0.0074	280
6.50	0.236	0.0243	0.0077	260
6.30	0.251	0.0245	0.0078	240
6.30	0.251	0.0239	0.0076	220
6.00	0.277	0.0206	0.0066	200
5.95	0.282	0.0203	0.0065	180
5.80	0.297	0.0136	0.0043	160
5.75	0.302	0.0075	0.0024	140
5.70	0.307	0.0069	0.0022	120
5.65	0.313	0.0045	0.0014	100
5.60	0.318	0.0035	0.0011	80
5.55	0.324	0.0025	0.0007	60
5.50	0.330	0.0015	0.0004	40
5.45	0.336	0.0010	0.0003	20

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$



ŞEKİL 3.5- 1.92 Hz'de 575°C'da 2 saat tutulan parçada logaritmik azalmanın sıcaklıkla değişimi ($T_p=240^{\circ}\text{C}$, $\beta=3,65$ ve $\delta_{\max}=0,188$).

TABLO 3.6- Şekil 3.6'ya Ait Değerler

Frekans (Hz)	T _p (°C)	T _p (K)	$\frac{1000}{T_p(K)}$	ln ω
0.29	212	485	2.04	-1.23
0.56	226	499	2.00	-0.57
0.86	229	502	1.99	-0.15
1.17	235	508	1.96	+0.15
1.92	240	513	1.94	+0.65

$$\omega = 2\pi f \quad f = \text{salınım frekansı (Hz)}.$$

Q aktivasyon enerjisi ve τ_0 sabitinin hesabı:

Aşağıdaki eşitlik (Sayfa)

$$\ln \tau = \ln \tau_0 + Q/RT \text{ 'ye göre}$$

$$R = 1.98 \text{ cal/mol}^\circ\text{K dir.}$$

$$\ln \omega - 1000/T_p(K)$$

eğrisinin eğimi Q/R'ye eşittir. Grafik yardımı ile

$$\Delta x = 1.88$$

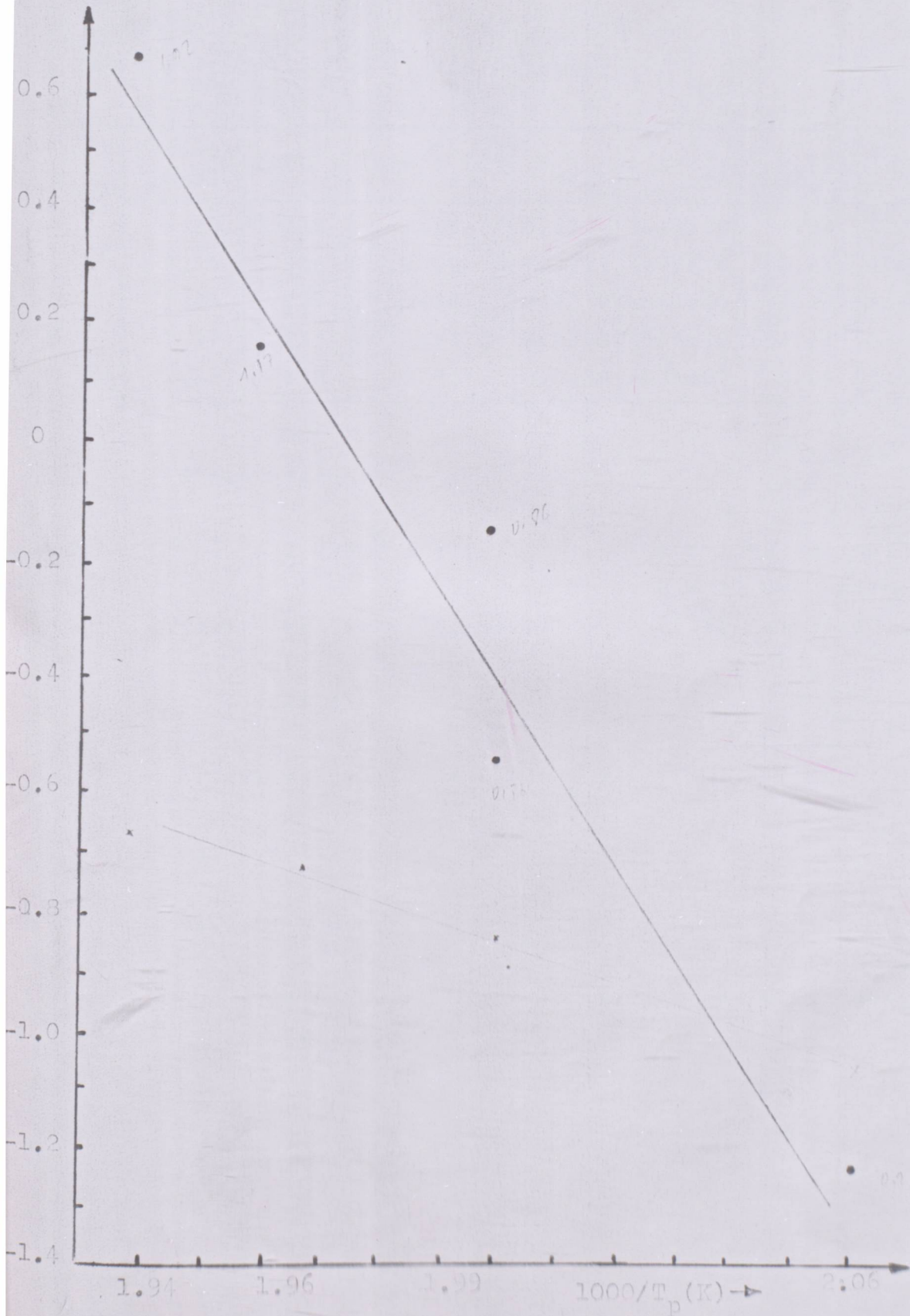
$$\Delta y = 0.12$$

$$m = \frac{\Delta x}{\Delta y} = 15.66$$

$$Q/R = 15.66$$

Q = 31.02 cal/mol bulunur. Budeğer eşitlik 1.7 de yerine konulup

$$\tau_0 = 2.85 \times 10^{-15} \text{ sn}^{-1} \text{ bulunur.}$$



ŞEKİL 3.6- T_p ile frekansın değişimi ($\ln \omega = \ln 2\pi f$).

TABLO 3.7- Şekil 3.7'ye Ait Değerler.

Frekans (Hız)	T _p (C°)	1000/T _p (K)	δ _{max}	Δ(1/T _(K))	r ₂ (β)	β
0.29	212	2.06	0.022	5015x10 ⁷	2.98	4.25
0.56	226	2.00	0.0215	4779x10 ⁷	2.84	4.00
0.86	229	1.99	0.0210	4661x10 ⁷	2.77	3.90
1.17	235	1.96	0.0205	4566x10 ⁷	2.71	3.80
1.92	240	1.94	0.0188	443x10 ⁷	2.64	3.65

β'nın hesabı;

$$\Delta\left(\frac{1}{T}\right) = 2.035 \frac{R}{Q} \cdot r_2(\beta)$$

$$R = 1.98 \text{ cal/mol}^\circ\text{K}$$

$$Q = 31.000 \text{ cal/mol}$$

(Bkz. eşitlik 1.10, Sayfa)

$$\Delta(1/T) = 5015 \times 10^7 (1/K)$$

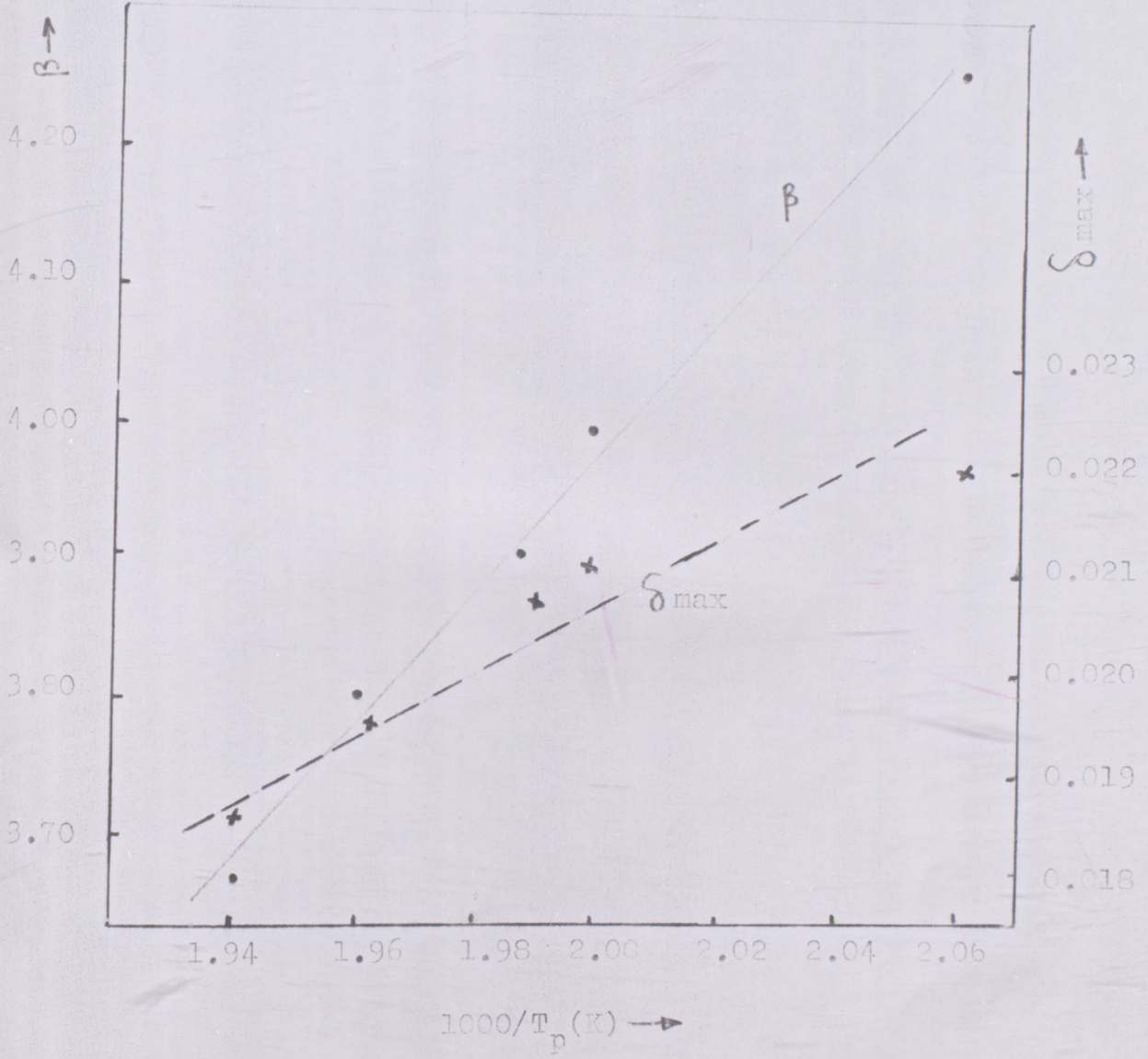
$$Fr = 0,29 \text{ Hz.}$$

$$\Delta(1/T) = 5015 \times 10^7 = 2.635 \frac{R}{Q} r_2(\beta)$$

$$r_2(\beta) = 2.98$$

Şekil 1.5 den;

β = 4.25 bulunur. Diğer β değerleri bu yolla hesaplanıp Tablo 3.7 de verilmiştir.



ŞEKİL 3.7- T_p ile β ve T_p - $\delta_{\max}$ değişimi.

TABLO 3.8- Şekil 3.8'e Ait Değerler.

Frekans (Hz)	$\delta_{\max}$	$T_p (^{\circ}\text{C})$	$1000/T_p (\text{K})$	$\Delta e \times 10^2$
0.29	0.0220	212	2.06	4.5
0.56	0.0215	226	2.-0	4.4
0.86	0.0210	229	1.99	4.2
1.17	0.0205	235	1.96	4.1
1.92	0.0188	240	1.94	3.8

Δe sönüm kuvvetinin hesabı,

$$\delta_{\max} = \frac{e}{2(1+\Delta e)} \quad (\text{eşitlik 1.9, sayfa })$$

yardımı ile,

0,29 Hz. için

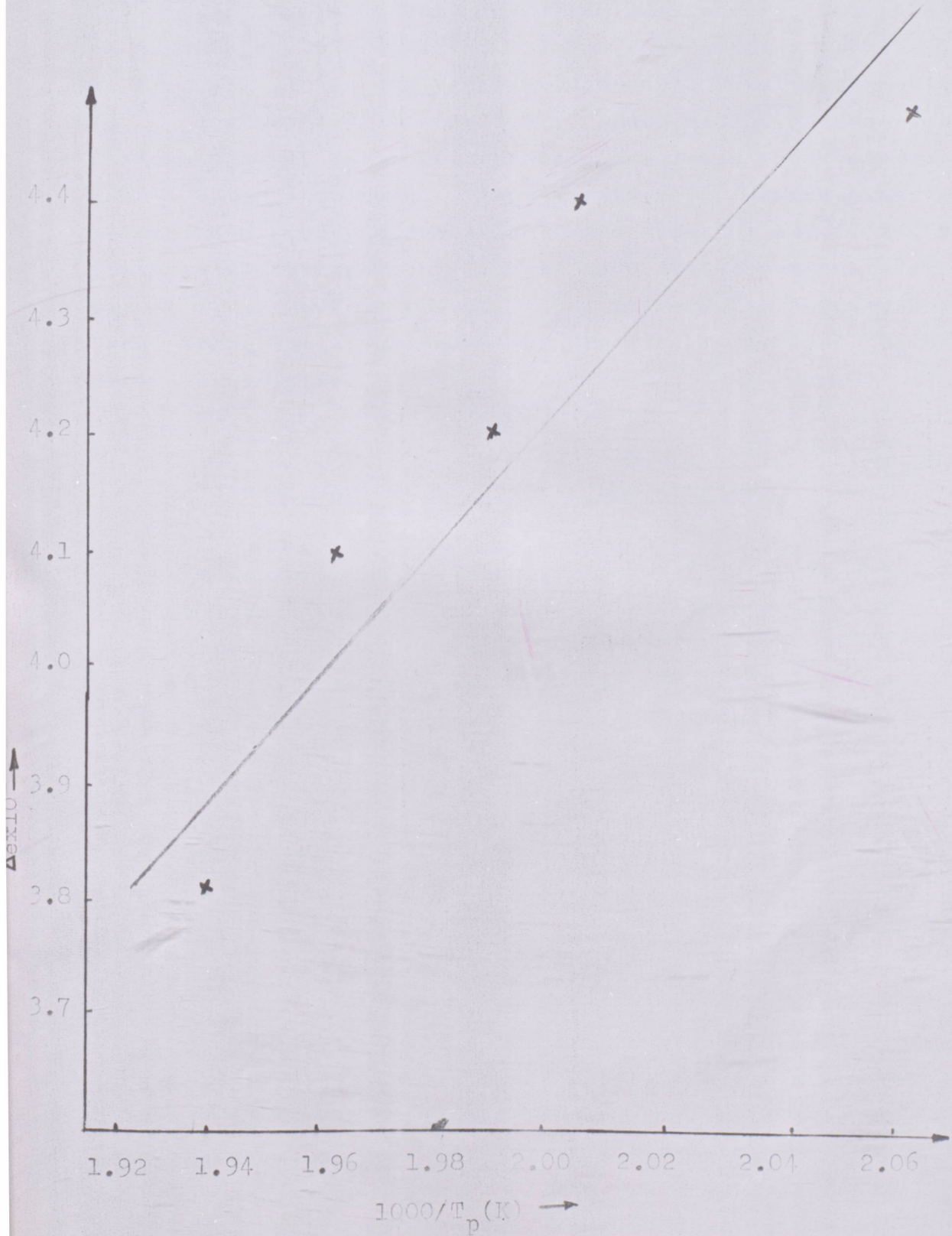
$$\delta_{\max} = 0.0220 = \frac{\Delta e}{2(1+\Delta e)}$$

$$(0.0220)^2 \cdot 4 \times (1+\Delta e) = \Delta e^2$$

denklemini çözülerek

$$\Delta e = 0,045 \text{ elde edilir.}$$

diğer Δe değerleri 0.56 Hz., 0,86 Hz., 1.17 Hz. ve 1.92 Hz. için aynı yolla bulunup Tablo 3.8 de verilmiştir.



ŞEKİL 3.8- T_p ile Δ_e değerlerinin farklı frekanslarda değişimi

Çalışmanın bu bölümünde elde edilen sonuçlara göre tane büyüklüğü 0.050 mm iken, maksima tepe noktası sıcaklıkları (T_p), Ref.16'ya çok yakın bulunmuştur. Maksima yüksekliği (Q_{max}^{-1}) değerleri ise farklıdır. Bunun nedeni, numunelerdeki dislokasyon ağı hacmi (dolayısıyla uygulanan ısıtma işleminin farkı) ve oluşmuş bulunan tavlama ikizlerinin farkından meydana geldiği kanısındayım. Ancak bulduğum değerler Ref.17 ile bir yakınlık göstermiştir. τ_0 sabiti ve Q aktivasyon enerjisi Ref.18'e, Δe gevşeme kuvvetide Ref.20'ye yakın bulunmuştur. Genel sonuçlamalar bölümünde bu değerler ve farklar Tablo 3.15 de gösterilmiştir.

3.2. TİTREŞİM GENLİĞİNE BAĞLI SÖNÜM DENEYLERİ

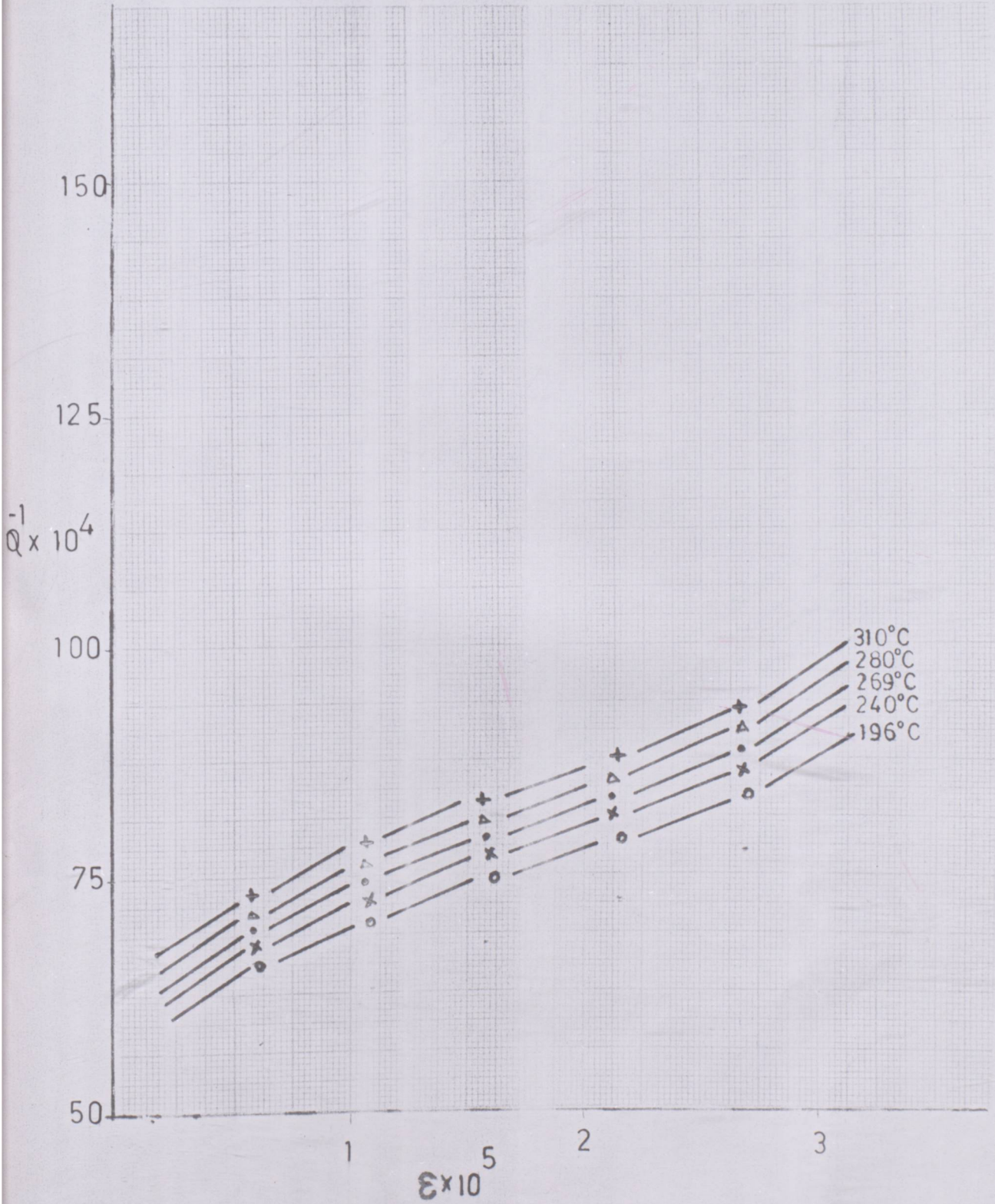
Deneylerin bu bölümünde, frekans 0.29 Hz'de sabit tutularak logaritmik azalma (δ) ile titreşim genliği (ϵ) arasındaki değişim incelenmiştir. Titreşim genliği değerleri 0.52×10^{-5} ile 2.6×10^{-5} değiştirilip, 600°C ile 100°C arasında 20°C aralıklarla logaritmik azalmalar ölçülmüştür.

3.2.1. Deney Sonuçları

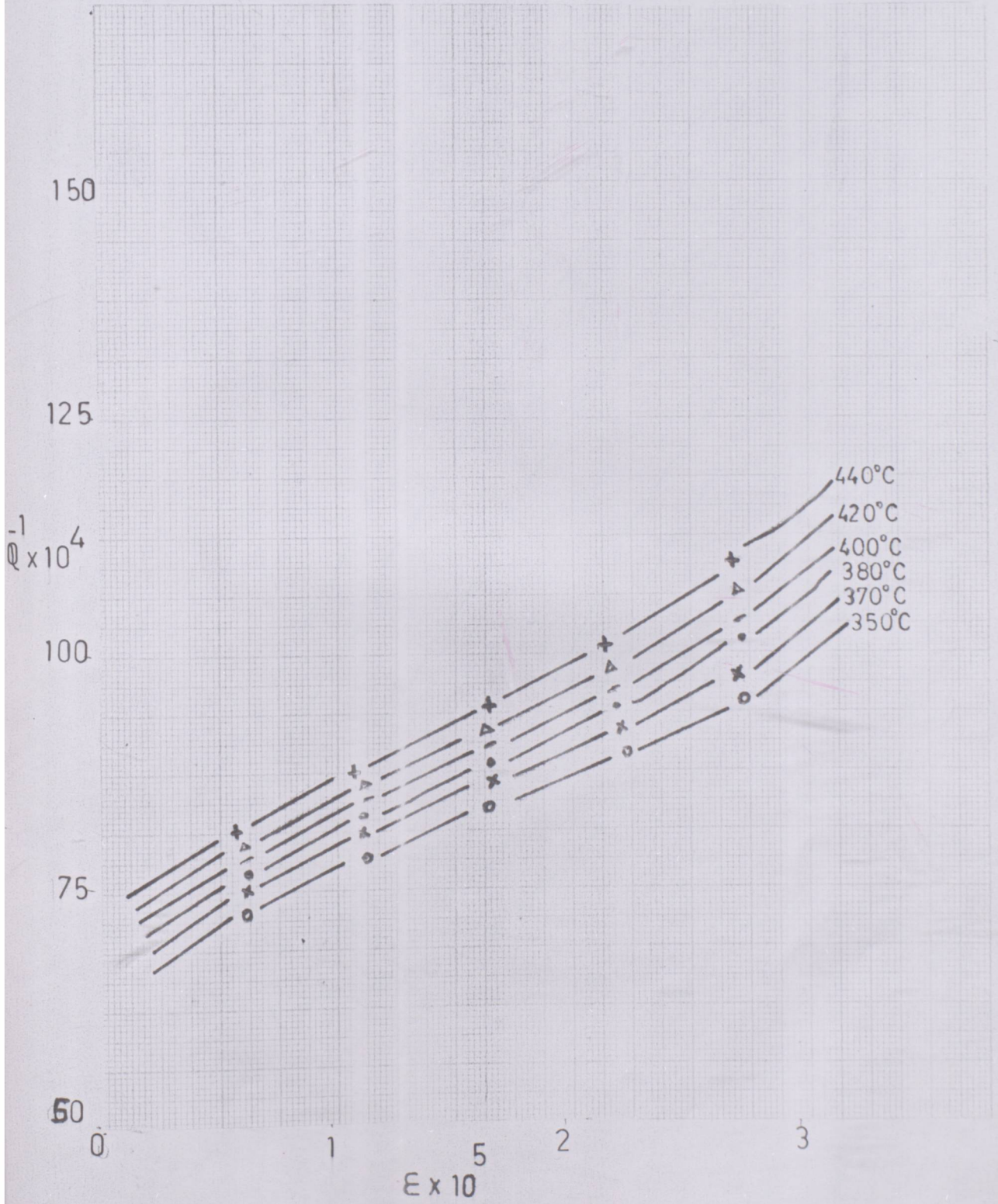
Şekil 3.9-Şekil 3.20 arasında alınan sonuçlar ve onlara bağlı olarak, elde edilen grafikler verilmiştir. Şekil 3.9-Şekil 3.11 arasında $(0.52, 1.04, 1.56, 2.08, 2.60) \times 10^{-5}$ olarak değiştirilen titreşim genliğine bağlı olarak iç sürtünme değişimleri, Şekil 3.12'de iç sürtünme sıcaklık değişimi farklı titreşim genliklerine göre gösterilmiştir. Şekil 3.13, Şekil 3.14'de δ değerlerinden eşitlik 1.11 ve Şekil 1.7 gözönüne alınarak $\delta_H - \epsilon$ eğrilerini göstermektedir. Bu yapılırken $\epsilon \approx 0$ uzantısında, Şekil 3.9 ile Şekil 3.12 üzerindeki δ_I (titreşimin genliğine bağlı olmayan logaritmik azalma) değerleri, deneysel olarak bulunan δ değerlerinden ölçme yapılan

TABLO 3.9- Şekil 3.9-3.10-3.11 ve 3.12'ye Ait Olan Değerler.

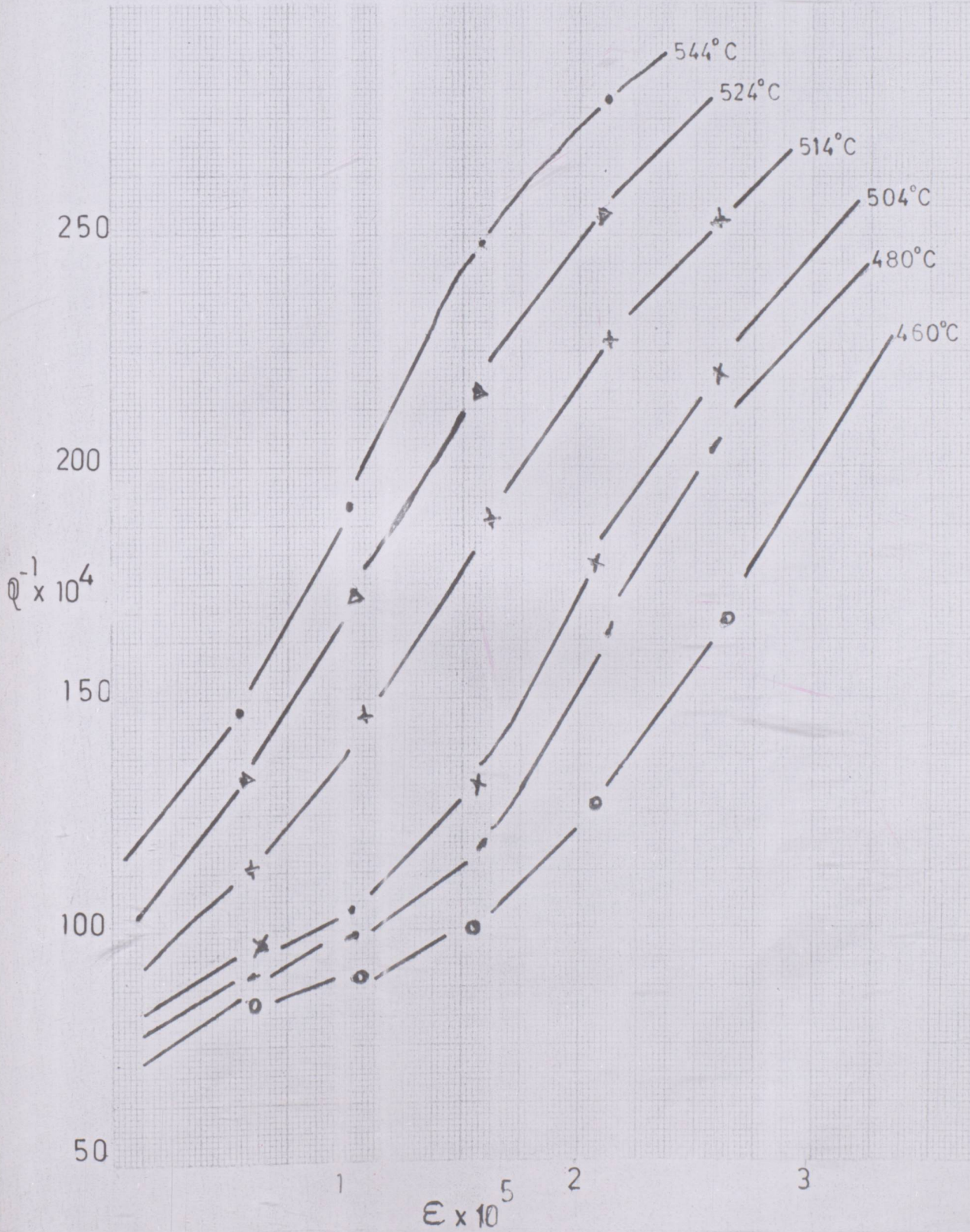
T(°C)	$\epsilon=0.52 \times 10^{-5}$		$\epsilon=1.04 \times 10^{-5}$		$\epsilon=1.56 \times 10^{-5}$		$\epsilon=2.08 \times 10^{-5}$		$\epsilon=2.60 \times 10^{-5}$	
	δ	f^2	δ	f^2	$\delta\delta\delta$	f^2	δ	f^2	δ	f^2
154	0.0128	0.1366	0.0147	0.1366	0.0149	0.1376	0.0157	0.1376	0.0165	0.1371
196	0.0204	0.1356	0.0216	0.1356	0.0231	0.1361	0.0239	0.1351	0.0247	0.1346
216	0.0207	0.1327	0.0231	0.1331	0.0239	0.1331	0.0256	0.1327	0.0257	0.1331
240	0.0213	0.1289	0.0231	0.1308	0.0239	0.1293	0.0247	0.1298	0.0262	0.1205
254	0.0220	0.1298	0.0247	0.1280	0.0254	0.1284	0.0283	0.1280	0.0283	0.1298
269	0.0207	0.1275	0.0235	0.1261	0.0247	0.1261	0.0261	0.1270	0.0269	0.1270
280	0.0213	0.1275	0.0231	0.1266	0.0243	0.1266	0.0254	0.1266	0.0274	0.1244
322	0.0171	0.1244	0.0190	0.1246	0.0346	0.1235	0.0351	0.1246	0.0312	0.1244
341	0.0213	0.1214	0.0233	0.1231	0.0239	0.1231	0.0259	0.1226	0.0277	0.1222
360	0.0235	0.1214	0.0241	0.1209	0.0250	0.1207	0.0266	0.1241	0.0298	0.1250
380	0.0235	0.1197	0.0247	0.1189	0.0252	0.1189	0.0280	0.1189	0.0326	0.1184
400	0.0239	0.1172	0.0252	0.1180	0.0261	0.1184	0.0288	0.1160	0.0369	0.1168
422	0.0200	0.1182	0.0214	0.1183	0.0221	0.1178	0.0241	0.1173	0.0301	0.1172
440	0.0252	0.1156	0.0266	0.1156	0.0285	0.1153	0.0355	0.1145	0.0469	0.1149
460	0.0271	0.1141	0.0280	0.1129	0.0311	0.1126	0.0440	0.1122	0.088	0.1133
480	0.0283	0.1133	0.0305	0.1118	0.0367	0.1118	0.0533	0.1126	0.0781	0.1103
504	0.0269	0.1107	0.0308	0.1113	0.0407	0.1124	0.0569	0.1110	0.0678	0.1098
524	0.0420	0.1100	0.0533	0.1082	0.0685	0.1082	0.0945	0.1071	0.1109	0.1061
544	0.0447	0.1078	0.0589	0.1078	0.0792	0.1050	0.1045	0.1050	0.1346	0.1054



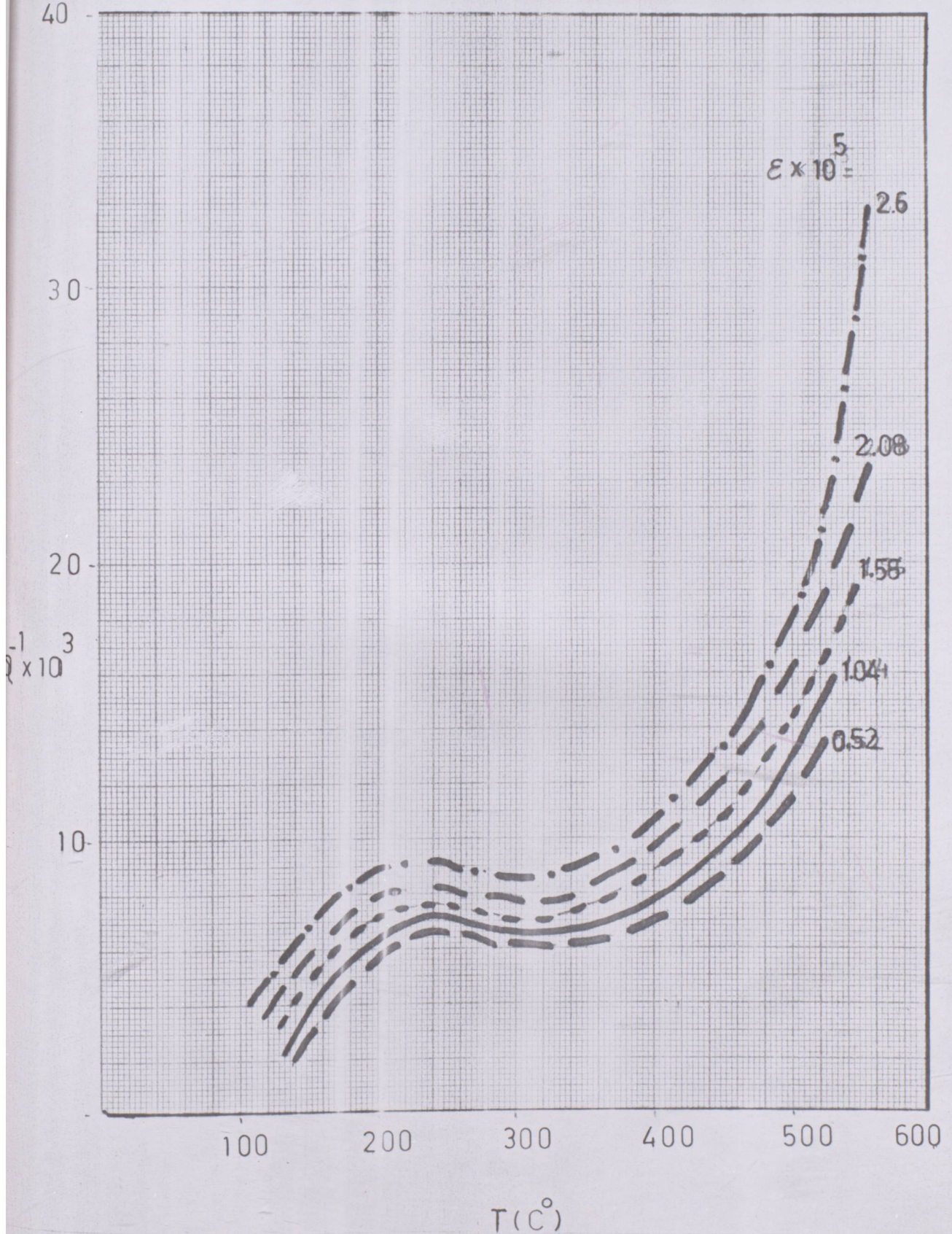
ŞEKİL 3.9- 196°C-310°C arasında ϵ ile iç sürtünme değişimi.



ŞEKİL 3.10- 350°C-440°C arası ϵ ile iç sürtünmenin değişimi.



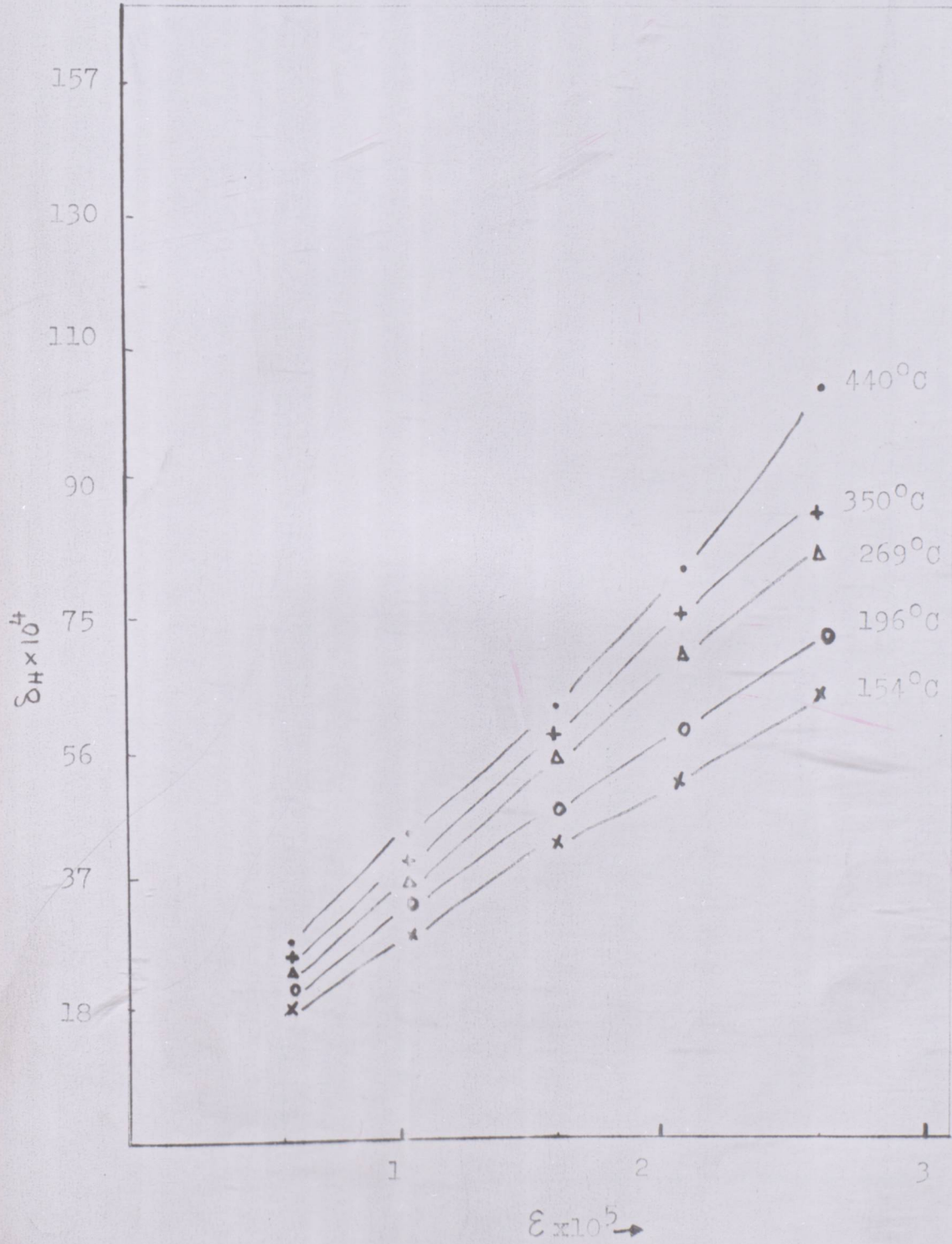
ŞEKİL 3.11- 460°C-544°C arasında ϵ ile iç sürtünmenin değişimi.



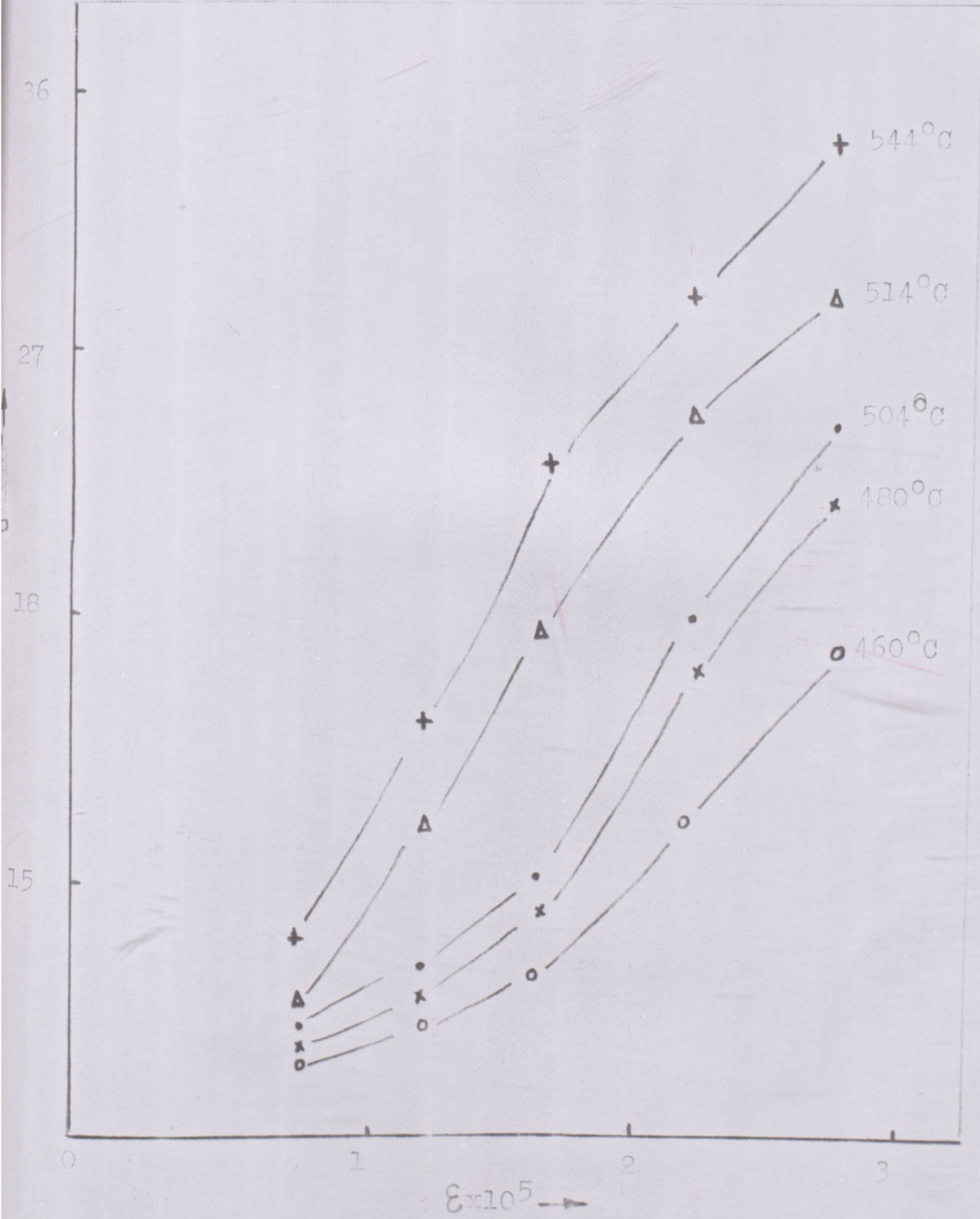
ŞEKİL 3.12- Farklı Titreşim Genliklerinde (ϵ), iç sürtünme (Q^{-1})-Sıcaklık değişimi.

TABLO 3.10- Şekil (3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.18, 3.19, 3.20)'ye Ait Olan Değerler.

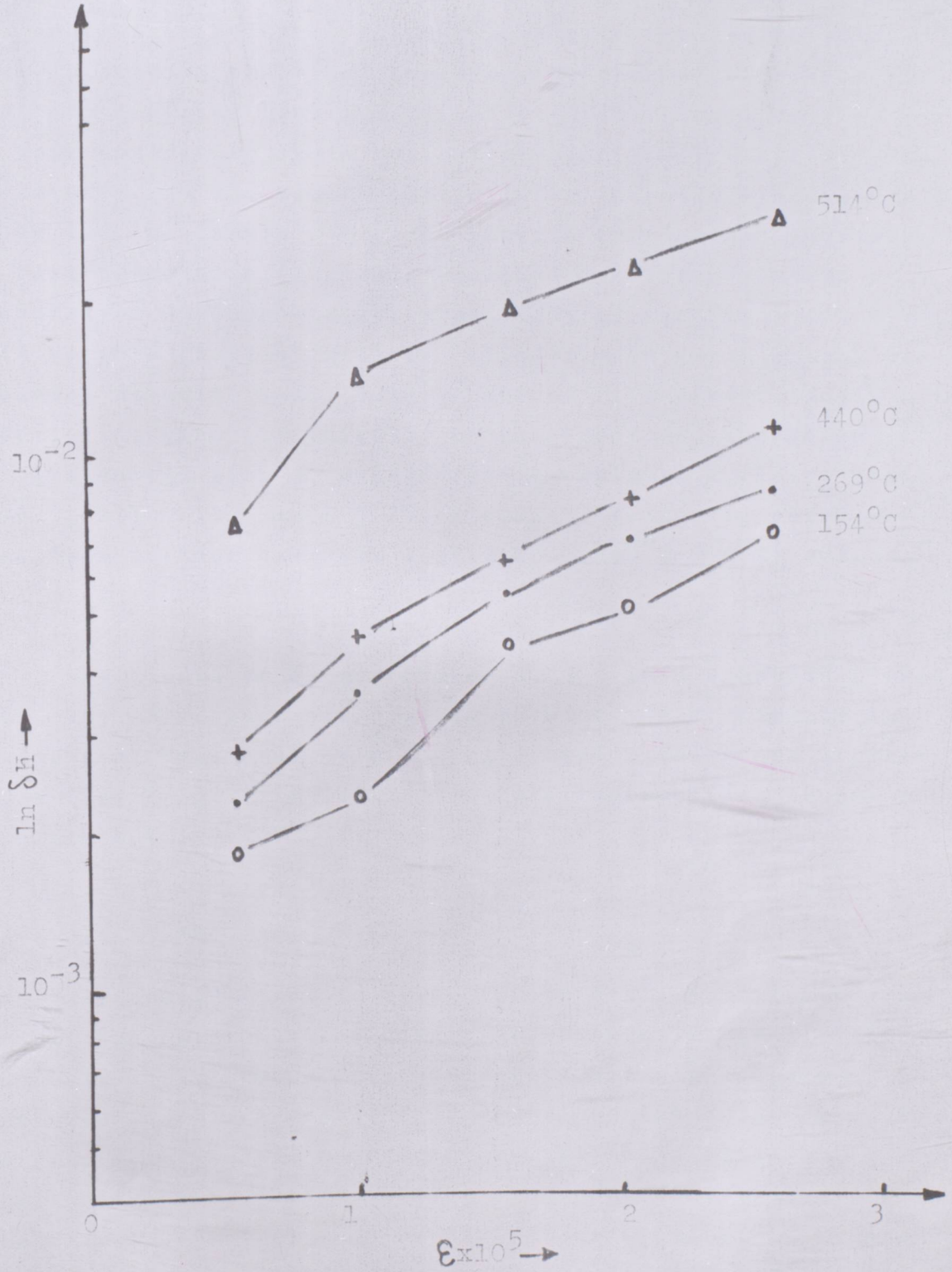
T(°C)	$\epsilon = 0.52 \times 10^{-5}$		$\epsilon = 1.04 \times 10^{-5}$		$\epsilon = 1.56 \times 10^{-5}$		$\epsilon = 2.08 \times 10^{-5}$		$\epsilon = 2.60 \times 10^{-5}$	
	δ_H	$(\delta_H \cdot \epsilon) 10^8$	δ_H	$(\delta_H \cdot \epsilon) 10^8$	δ_H	$(\delta_H \cdot \epsilon) 10^8$	δ_H	$(\delta_H \cdot \epsilon) 10^8$	δ_H	$(\delta_H \cdot \epsilon) 10^8$
154	0.0018	0.936	0.0024	2.491	0.0045	7.020	0.0051	10.61	0.0075	19.50
269	0.0023	1.196	0.0037	3.800	0.0056	8.730	0.0073	15.10	0.0087	22.60
310	0.0025	1.30	0.0038	3.952	0.0058	9.04	0.0075	15.60	0.0088	18.12
350	0.0026	1.355	0.0039	4.05	0.0060	9.36	0.0077	16.01	0.0090	23.90
440	0.0028	1.456	0.0046	4.781	0.0066	10.31	0.0089	18.51	0.0110	28.61
480	0.0067	3.48	0.0060	6.24	0.075	11.7	0.0116	24.12	0.0159	41.34
514	0.0075	3.901	0.0150	15.61	0.0180	28.01	0.0220	45.10	0.0250	65.01



ŞEKİL 3.13- 154°C ile 440°C arasında δ_H ile ϵ değişimi.



ŞEKİL 3.14- 460°C ile 544°C arasında δ_H ile ϵ değişimi.



ŞEKİL 3.15- 154°C-514°C arasında $\ln \delta_H$ ile ϵ değişimi.

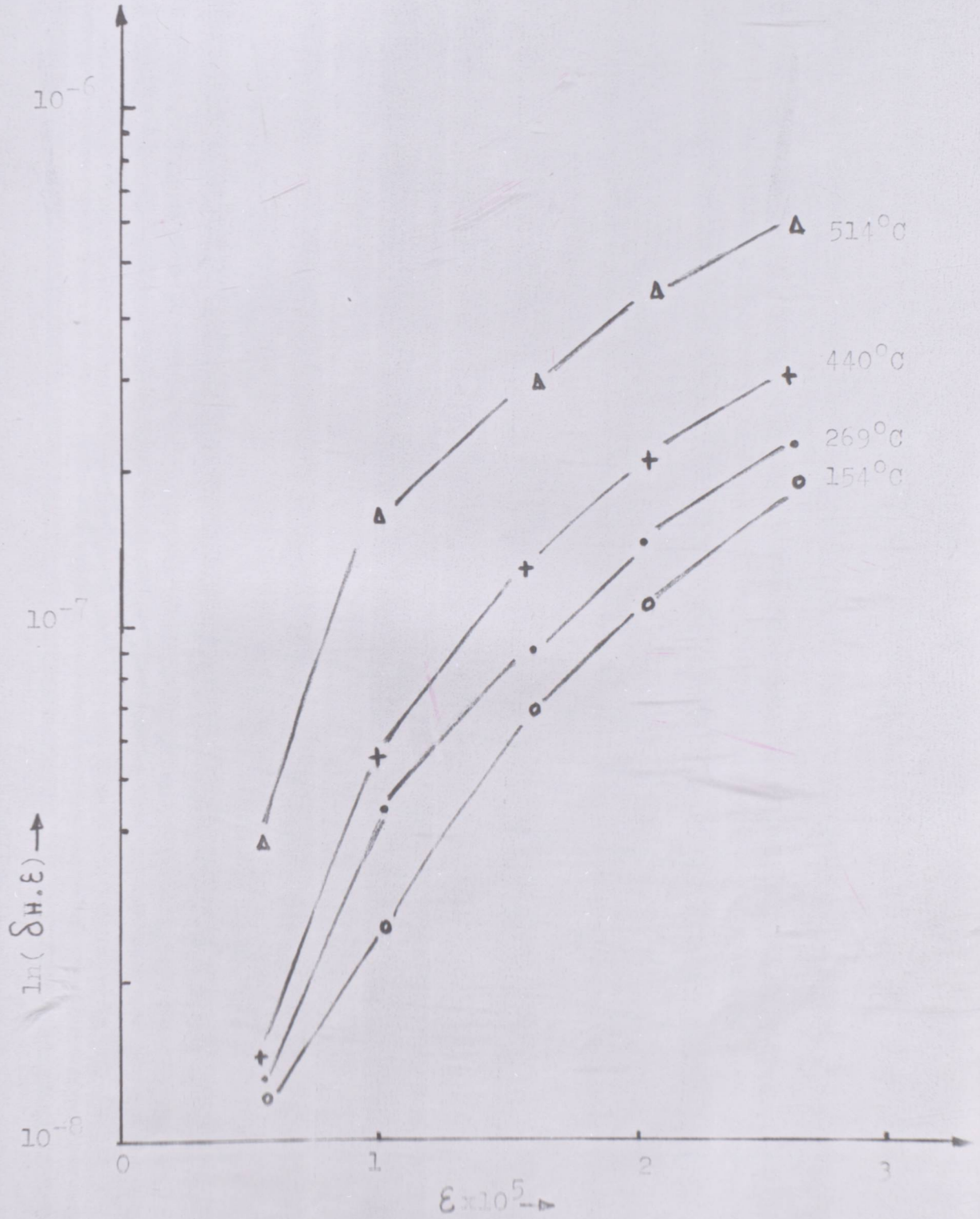
her nokta için bulunup, gerçek δ_H değerlerine geçilmiştir. Yarı logaritmik skala kullanılarak, bulunan değerler yardımı ile $\ln \delta_H - \epsilon$ eğrisi (Şekil 3.15) elde edildi. Şekil 3.16'da yine yarı logaritmik skala kullanılarak $\ln(\delta_H \cdot \epsilon) - \epsilon$ eğrisi elde edilmiştir. Bu logaritmik eğrilerin tayin edilmesinin sebebi, Bölüm 1.2.'de (Sayfa 14) izahı yapılan incelemenin yapılması ve bazı değerlerin (Bağlanma enerjisi, aktivasyon hacmi ve L_c dislokasyon düğüm noktaları arası mesafe) eşitlik 1.12, 1.13, 1.14 ya göre çizilen eğrilerin eğimlerinden yararlanarak hesaplamak içindir. Şekil 3.17 de $\ln \delta_H - 1/T(K)$ eğrisi, değişik ϵ değerlerine göre çizilmiştir. Bunun nedeni de yine Bölüm 1.2 de açıklandığı gibi W^* değerlerini hesaplamak içindir. Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20'de benzer eğriler iç sürtünme maksiması görülen sıcaklık aralığında ($300^\circ C - 350^\circ C$) ayrıca çizilmiştir.

Eğrilerin genel görünümünden, δ_H ile ϵ arasında (Şekil 3.13, 14, 18) lineer bir değişim görülmektedir. Lineerlik T_p (maksima tepe noktası sıcaklığı) aşıldıktan sonra artmaktadır (Şekil 3.13 ile Şekil 3.14 karşılaştırılınca bu durum görülmektedir).

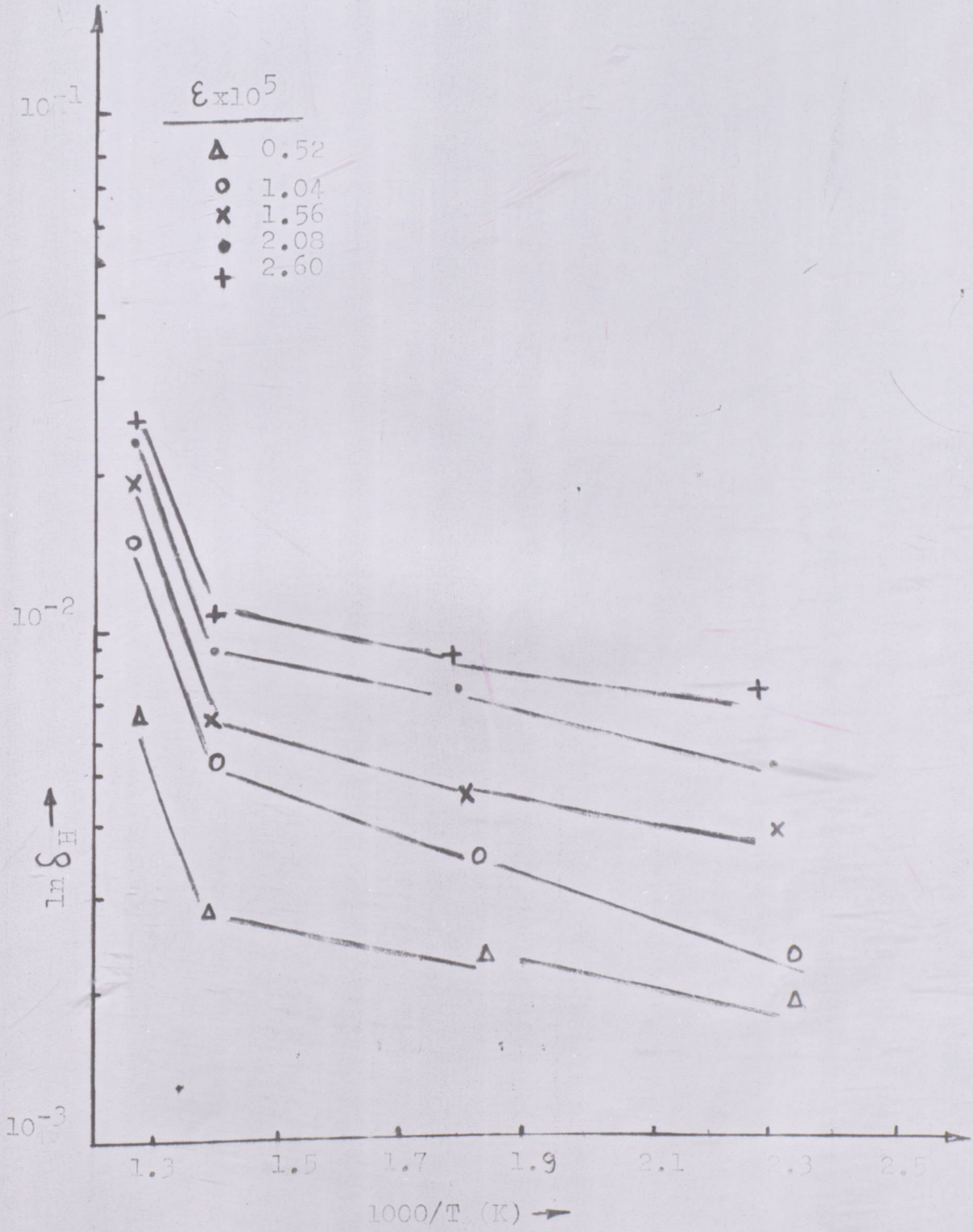
3.2.2. Yorumlama

Friedel(9) modeline göre (Bölüm 1.2), $\ln \delta_H$ ile ϵ arasındaki bağıntının lineer olması gerekmektedir. Şekil 3.15, buna uygun bulunmuştur. Düşük ϵ değerlerinde göze çarpan lineerlikten sapmanın nedeni $\delta_H \rightarrow 0$ değerinde $\ln \delta_H \rightarrow \infty$ 'a doğru gitmesidir. Eşitlik 1.13'e göre $\ln \delta_H - \epsilon$ eğrisinin eğimi $b^2 L_c G / kT$ değerine eşittir. Burada G kayma modülüdür. $b = 2.55 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ve G değerleri de Ref.14 yardımı ile yerine konulup, L_c mesafesi bulunmuştur. Elde edilen değerler Tablo 1'de gösterilmiştir ($G = 4 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$, $k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/}^\circ K$) (10).)

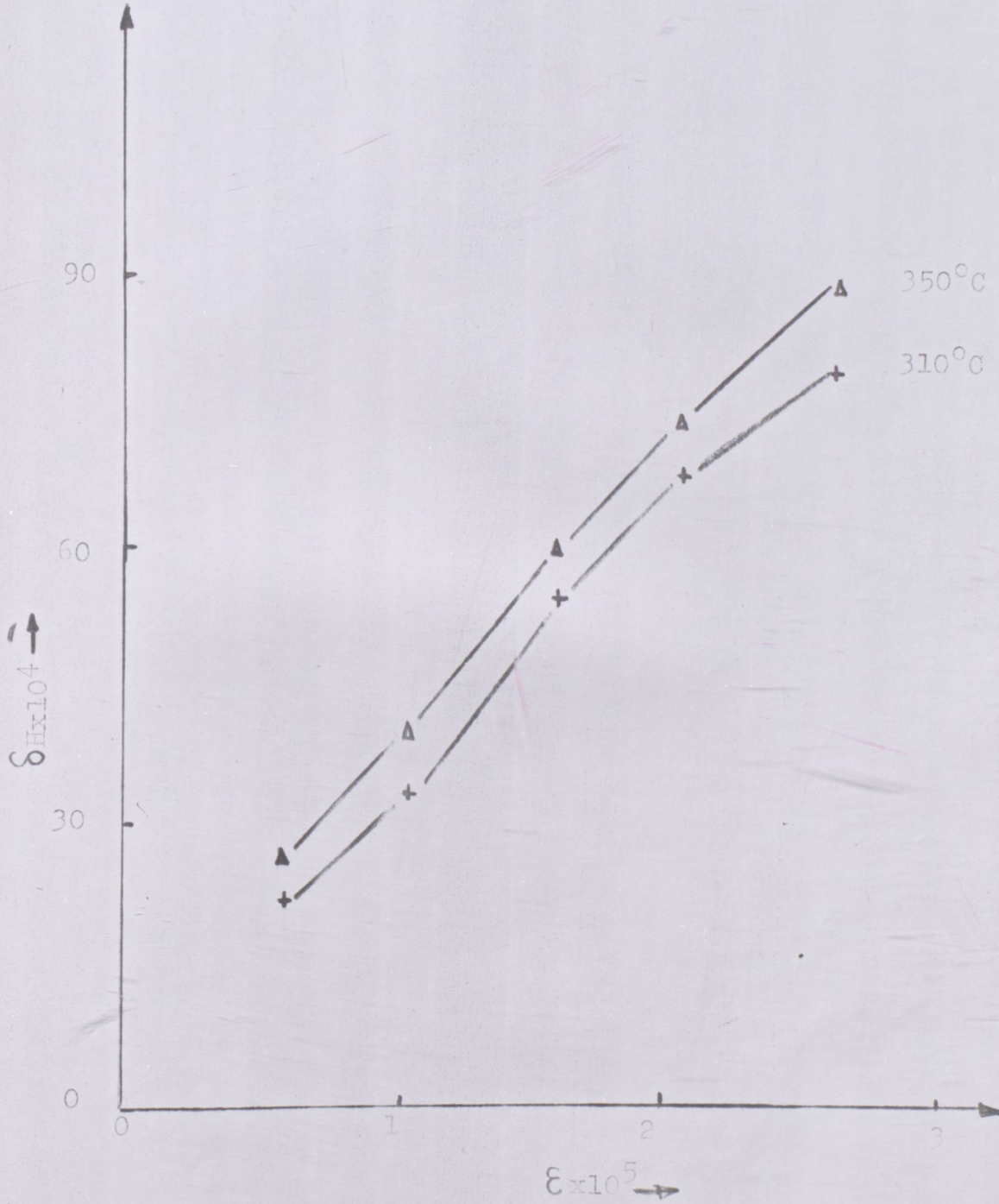
*Bağlanma Enerjisi



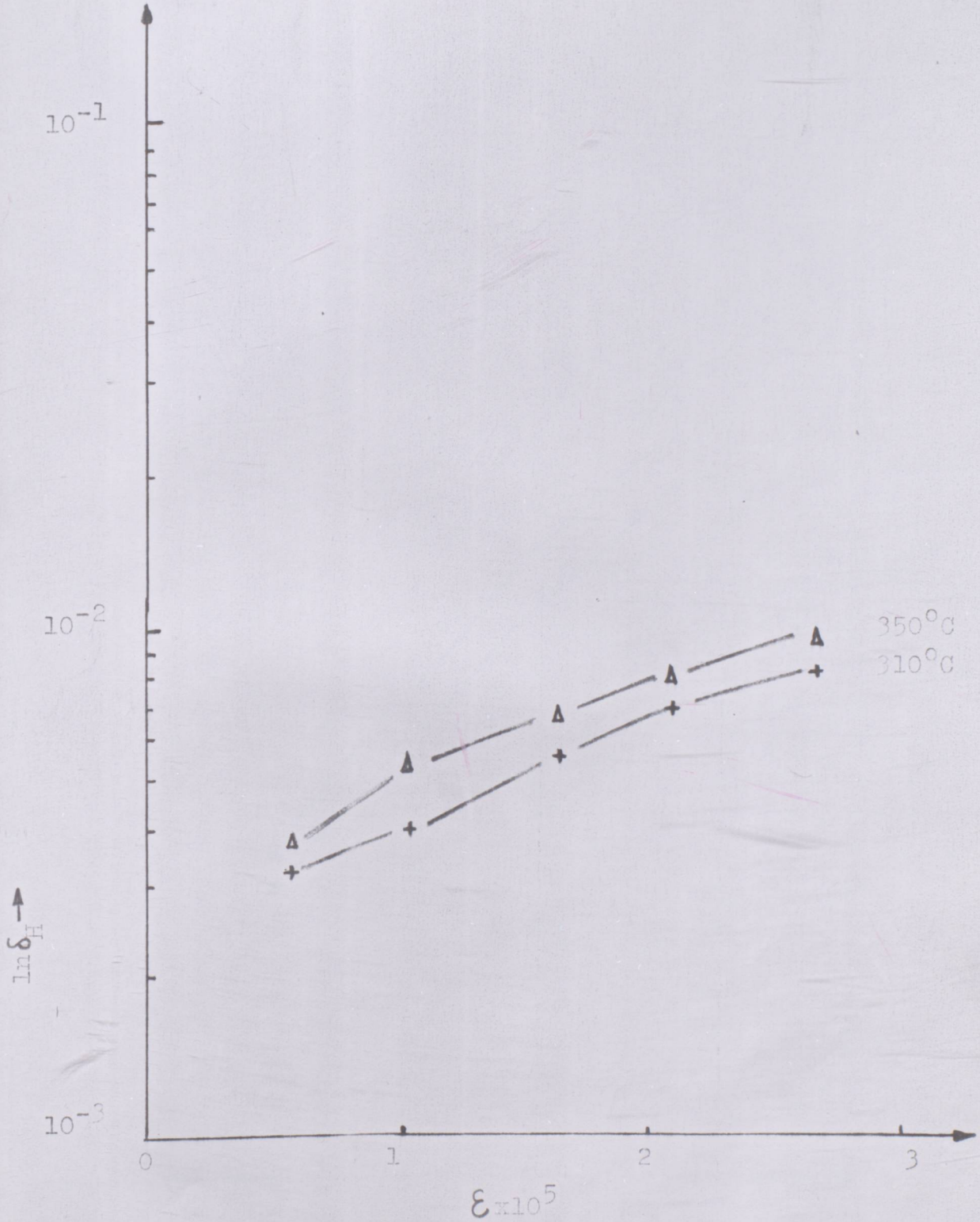
ŞEKİL 3.16- 154°C-514°C arasında $\ln(\delta_H \cdot \epsilon)$ ile ϵ değişimi.



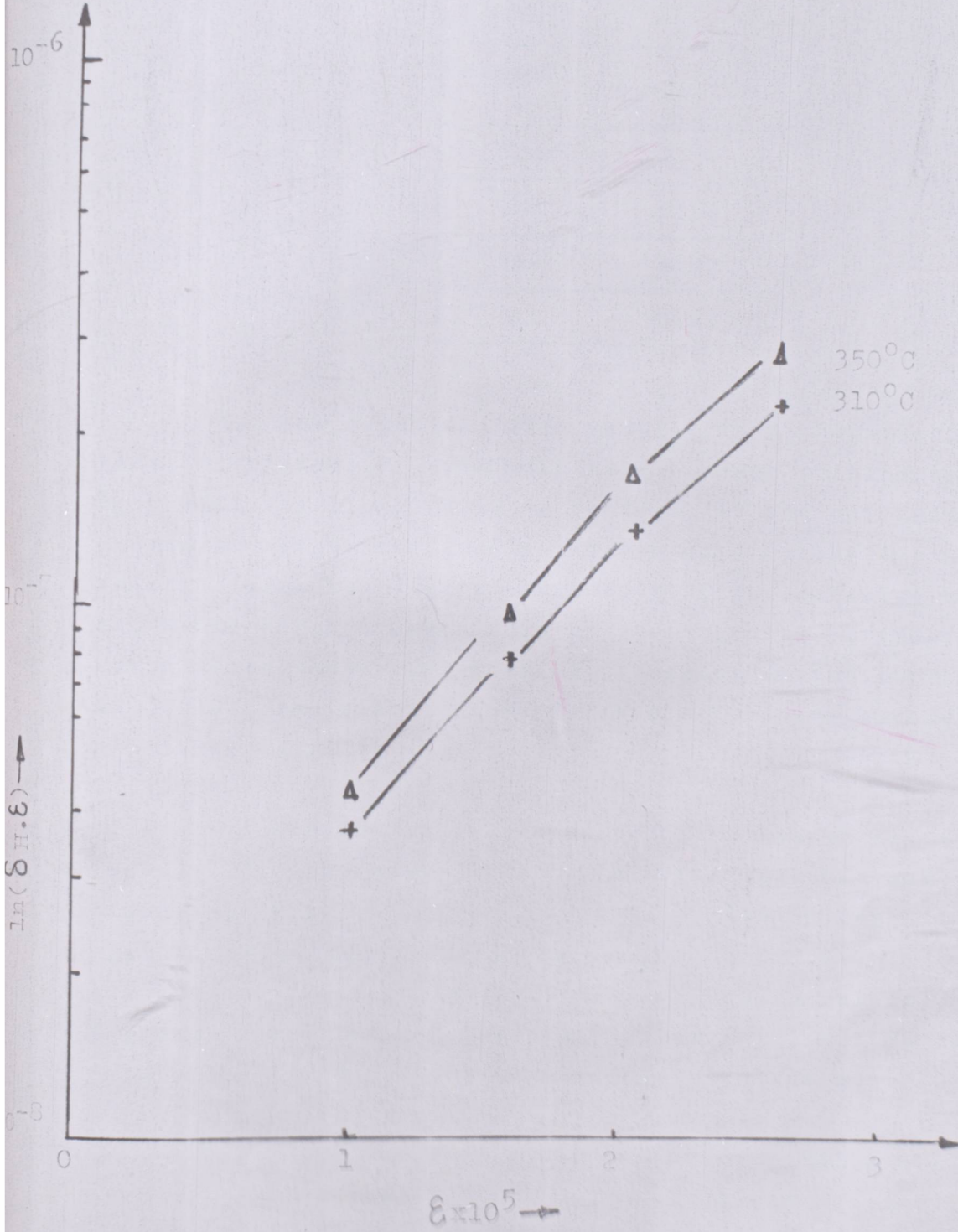
ŞEKİL 3.17- Muhtelif ϵ değerlerine göre $\ln \delta_H$ ile $1000/T(K)$ değişimi.



ŞEKİL 3.18- 310°C ve 350°C larda δ_H ile ϵ değişimi.



ŞEKİL 3.19- 310°C ve 350°C larda $\ln \delta_H$ ile ϵ değişimi



ŞEKİL 3.20- 310°C ve 350°C larda $\ln(\delta_H \cdot \epsilon)$ ile ϵ değişimi.

TABLO 3.11- Çeşitli Sıcaklıklarda L_c Değerleri

Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$	$L_c \times 10^6$ cm
514	$\sim 7,5$
440	$\sim 5,59$
269	$\sim 4,70$
154	$\sim 0,49$

Bulunan değerleri arık metallerin L_c değerleri ile karşılaştırırsak(9) sonuçların makul olduğu görülmektedir. δ_H - ϵ eğrileri (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11) pozitif eğimli bulunmuşlardır. Bu sonucu dislokasyonların hareketlerinin bir kanıtı olarak kabul etmek mümkündür. Dislokasyonlar tırmanma biçiminde hareket etmek için titreşim genliği artması ve onların parçalanması gerekmektedir. yapıda mevcut ikizler (Şekil 1.10) tane sınırlarındaki dislokasyonların kaynağını teşkil etmektedirler.

Dislokasyon ağını oluşturan, dislokasyon dilimlerini (Şekil 1.8) oluşturan düğüm noktalarına bağlanma enerjilerinin hesabı için, $\ln \delta_H$ ile $1000/T(K)$ eğrisinin teşkili ile bu eğrinin eğiminden yararlanılmıştır. Eşitlik 1.13 yardımı ile bulunan değerler Tablo 3.12 ' de topluca verilmiştir. Bağlanma enerjilerinin hesaplanmasında Eşitlik 1.13'deki $-W(\sigma - \sigma_i)bdL_c/K$ değeri eğime eşit olarak alınmıştır(10).

Peguin ve arkadaşlarının analizleri (Bölüm 1.2, Eşitlik 1.14) kullanılarak, $\ln(\delta_H \cdot \epsilon)$ - ϵ eğrisinin eğimi $\propto V G/kT$ değerine eşittir(10). Şekil 3.16 yardımı ile bulunan aktivasyon hacmi değerleri Tablo 3.13'de görülmektedir.

TABLO 3.12- Bağlanma Enerjileri

$\epsilon \times 10^5$	Bağlanma Enerjisi (ev)
0.52	0.019
1.04	0.021
1.56	0.033
2.08	0.035
2.60	0.059

TABLO 3.13- Muhtelif Sıcaklıklarda Aktivasyon Hacımları

Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$	Aktivasyon Hacmı	
	$\times 10^{20} \text{ cm}^3$	$\times 10^{-3} \text{ b}^3$
514	4.82	1.8
440	2.90	1.1
269	2.01	0.77
154	0.86	0.33

Şekil 3.18 ve Şekil 3.21 arasında maksima tepe noktası sıcaklığına yakın sıcaklıklarda elde edilen L_c ve V (aktivasyon Hacmı) değerleri de Tablo 3.14'de verilmiştir.

TABLO 3.14- T_p Sıcaklığı Civarında L_c ve V Değerleri

Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	$L_c \times 10^6 \text{ cm}$	Aktivasyon Hacmı	
		$\times 10^{20} \text{ cm}^3$	$\times 10^{-3} \text{ b}^3$
310	~4.85	2,5	0,92
350	~5.15	2.3	0,88

Tablo 3.14'de bulunmuş değerlerle diğer sıcaklıklarda bulunan değerler birbiri ile uygunluk göstermektedir.

3.3. DEĞİŞİK TANE BÜYÜKLÜĞÜ İLE YAPILAN DENEYLER

Önce 400°C'da 20 saat tutulan numuneler daha sonra 1/2, 1, 2, 4, 8, 16 saat sürelerde 575°C sıcaklıkta tavlanıp, tane büyüklüğü farklı yapılar elde edilerek iç sürtünme ölçmeleri yapılmıştır. Sonuçta her bir gruba ait eğrilerde maksima tepe noktası ($Q_{\max}^{-1}$) değerlerinin değişmesi incelenmiştir.

3.3.1. Deney Sonuçları ve Yorumlama

Şekil 3.21-Şekil 3.27 arasında farklı tane büyüklüğünde yapılan deneylere ait grafikler görülmektedir. Maksima yüksekliği ($Q_{\max}^{-1}$) ve maksima tepe noktası sıcaklıkları Ref.21'e uygunluk göstermektedir. Tane büyüklüğü artması 0.045 mm ile 0.15 mm arasında iken $Q_{\max}^{-1}$ değerlerinde bir artma, tane büyüklüğü bu değeri aşınca bir duraklama görülmektedir. Şekil 3.27'de bu durum gösterilmiştir.

3.4. GENEL SONUÇLAMA

Arı bakırda, düşük sıcaklıklarda tane sınırındaki dislokasyonlar nedeni ile görülen maksimaların değişik frekanslarda, yüksekliklerinde (Q^{-1}) ve sıcaklıklarındaki (T_p) değişmeler, tane büyüklüğü farklarıyla maksima biçimindeki değişmeler, farklı titreşim genliklerinde iç sürtünme değişimleri bu çalışmada incelenmiştir. Konu ile ilgili ilk çalışmalar Ke(14) tarafından Al, Mg, Fe numuneler üzerinde yapılmış ve tane sınırlarındaki dislokasyonların hareketlerinden ileri

geldiği ortaya atılmıştır. Bu denemeler sonucunda, bulunan aktivasyon enerjilerinin, hacımsal difüzyon aktivasyon enerjisine çok yakın değerde bulunmasına dayanılarak (14), tane sınırlarındaki boşluklar ve düzensiz atom gruplarının buna neden olduğu sanılmıştır. Mash ve Hall(22) Au, Rotherham ve Pearson(17) Ag, De Morton ve Leak(15) Au, Al için benzer maksimaları elde etmişlerdir. Aşağıdaki tabloda bakır üzerinde bu konuda yapılan araştırmaların toplu halde sonuçları verilmiştir.

TABLO 3.15- Arı Bakıra Ait Düşük Sıcaklık Maksimaları

Ref.	Araştırmacı	Aktivasyon Enerjisi Q(kcal/mol)	τ_0 sn	β
14	Ke	33	-	3.47
23	Cordea ve Spretnak	31.5	10^{-15}	5.95
16	Williams ve Leak	36	10^{-13}	-
24	Weining ve Machlin	40	-	-
25	Peters	37,5	-	5.85
15	DeMorton ve Leak	30.9	10^{-13}	-
26	Köster	32	-	-
27	Marsh	37	-	-

Tablo 3.16'da deneysel çalışmalar sonunda alınan sonuçlar gösterilmiştir. Bulunanlarla, daha önce yapılmış çalışmalar arasında uygunluk vardır ($Q \approx 31$ kcal/mol, $\tau_0 = 2.85 \times 10^{-15}$ sn, $\beta = 3.65-4.25$).

Tane büyüklüğü ile ilgili deneylerde alınan sonuçlar, Leak'in artan tane büyüklüğü ile maksima yüksekliğinin lineer

artığı(28) görüşüne uygundur. Tablo 3.17'de tane büyüklüğü ile maksima biçimi değişimi toplu olarak gösterilmiştir. (sayfa 79-80'de metalloprofile yapı değişimi gösterilmiştir.)

TABLO 3.16- Deney Sonuçları

Frekans	$\delta_{\max} \times 10^3$	$T_p (^{\circ}\text{C})$	β	(Gevşeme Kuvveti) $\times 10^2$
0.29	22	212	4.25	4.5
0.56	21	226	4.00	4.4
0.85	21	229	3.90	4.2
1.17	20	235	3.80	4.1
1.92	18	240	3.65	3.8

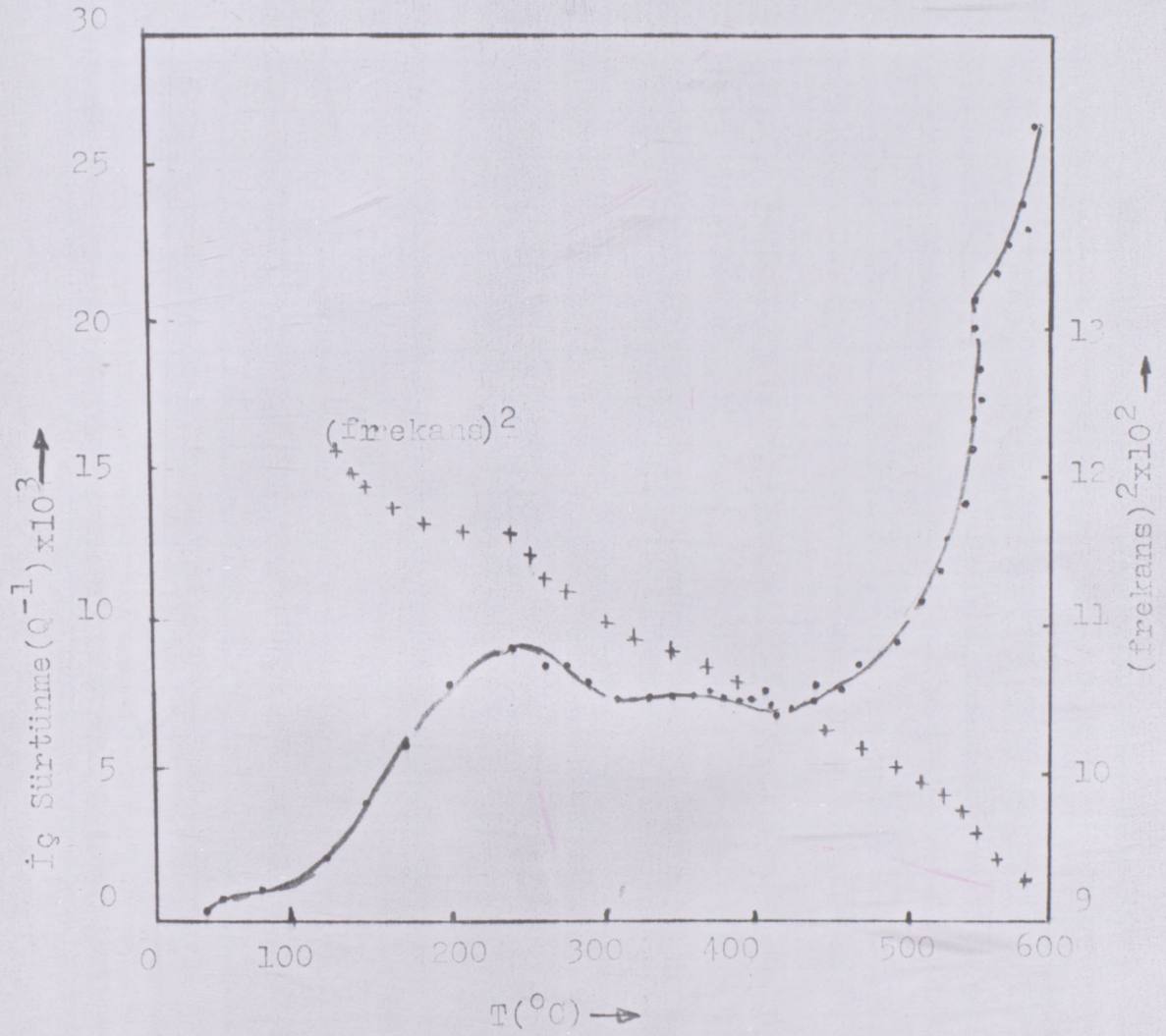
TABLO 3.17- Deney Sonuçları

Tav Süresi Saat	$Q^{-1} \times 10^3$	$T_p (^{\circ}\text{C})$	Tane Büyüklüğü mm
1/2	8.5	225	0.045
1	10	220	0.055
2	13	227	0.071
4	16	221	0.094
8	16.5	220	0.11
16	15.3	216	0.14

TABLO 3.18- Şekil 3.21'e ait deney sonuçları

t(sn)	f	δ	Q^{-1}	T(°C)	f^2
33.01	0.3029	0.1251	0.0398	600	0.0917
32.63	0.3064	0.1244	0.0395	580	0.0939
32.40	0.3086	0.1237	0.0393	560	0.0955
32.00	0.3125	0.1155	0.0336	540	0.0976
31.90	0.3134	0.0990	0.0315	520	0.0982
31.63	0.3161	0.0783	0.0249	500	0.0999
31.40	0.3184	0.0616	0.0196	480	0.1014
30.95	0.3231	0.0554	0.0177	460	0.1043
30.70	0.3257	0.0462	0.0147	440	0.1061
30.60	0.3267	0.04265	0.01357	420	0.1067
30.35	0.3297	0.0385	0.0122	400	0.1087
30.22	0.3309	0.0369	0.0117	380	0.1094
30.13	0.3318	0.0370	0.0118	360	0.1101
29.90	0.3344	0.0346	0.0113	340	0.1118
29.75	0.3361	0.0319	0.0101	320	0.1129
29.55	0.3384	0.0301	0.0096	300	0.1145
29.40	0.3401	0.0315	0.0110	280	0.1157
29.25	0.3418	0.0322	0.1026	260	0.1168
29.00	0.3448	0.0330	0.01050	240	0.1189
29.10	0.3436	0.0331	0.0105	220	0.1180
28.87	0.03463	0.0322	0.0102	200	0.1199
28.77	0.3475	0.0306	0.0097	180	0.1208
28.50	0.3508	0.0261	0.0083	160	0.1231
28.50	0.3508	0.0231	0.0073	140	0.1231
28.30	0.3533	0.0116	0.0036	120	0.1248
28.00	0.3571	0.0080	0.0025	100	0.1275
27.73	0.3606	0.0062	0.00019	80	0.1300
27.51	0.3635	0.0022	0.0007	60	0.1321
27.11	0.3688	0.0010	0.0003	40	0.1360
26.72	0.3742	0.0001	0.0001	20	0.1400

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$

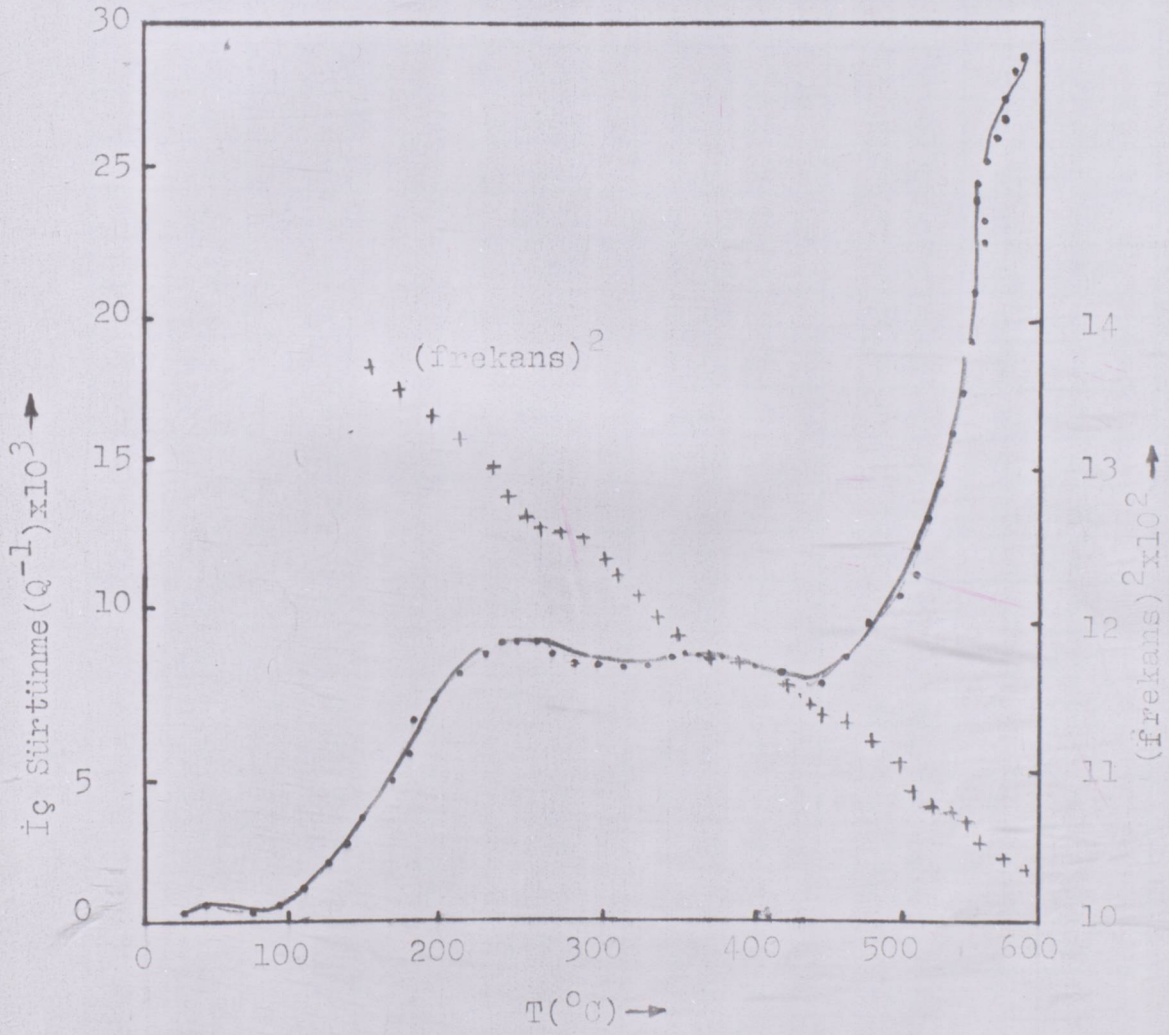


ŞEKİL 3.21- 0.56 Hz ve 575 $^{\circ}\text{C}$ da 1/2 saat tutulan soğutulan parçada iç sürtünme değişimi.

TABLO 3.19- Şekil 3.22'ye ait deney sonuçları

t(sn)	f	δ	Q^{-1}	T(°C)	f^2
33.10	0.3021	0.0883	0.0281	600	0.0912
33.00	0.3030	0.0877	0.0279	580	0.0918
32.50	0.3076	0.0816	0.0258	560	0.0946
32.10	0.3011	0.0502	0.0159	540	0.0958
31.72	0.3152	0.0374	0.0192	520	0.0993
31.30	0.3194	0.0271	0.0086	500	0.1020
31.10	0.3215	0.0261	0.0083	480	0.1033
30.90	0.3236	0.0247	0.0078	460	0.1047
31.00	0.3225	0.0239	0.0076	440	0.1040
30.85	0.3241	0.0223	0.00711	420	0.1050
30.80	0.3246	0.0249	0.00795	400	0.1054
30.70	0.3257	0.0231	0.00735	380	0.1061
30.60	0.3267	0.0210	0.00735	360	0.1067
30.35	0.3294	0.0231	0.00735	340	0.1085
30.30	0.3230	0.0232	0.0074	320	0.0918
30.25	0.3305	0.0231	0.0073	300	0.1092
29.90	0.3344	0.0249	0.0079	280	0.1118
29.65	0.3372	0.0258	0.0082	260	0.1137
29.55	0.3384	0.0271	0.0086	240	0.1145
29.35	0.3407	0.0271	0.0086	220	0.1160
29.05	0.3442	0.0261	0.0083	200	0.1184
28.95	0.3454	0.0160	0.0051	180	0.1193
28.85	0.3466	0.0157	0.0050	160	0.1201
28.71	0.3483	0.0141	0.0045	140	0.1213
28.30	0.3533	0.0125	0.0040	120	0.1248
28.04	0.3566	0.0109	0.0025	100	0.1271
27.90	0.3584	0.0034	0.0030	80	0.1284
27.64	0.3617	0.0031	0.001	60	0.1308
27.01	0.3701	0.0028	0.0009	40	0.1370
26.50	0.3773	0.0021	0.0007	20	0.1423

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$

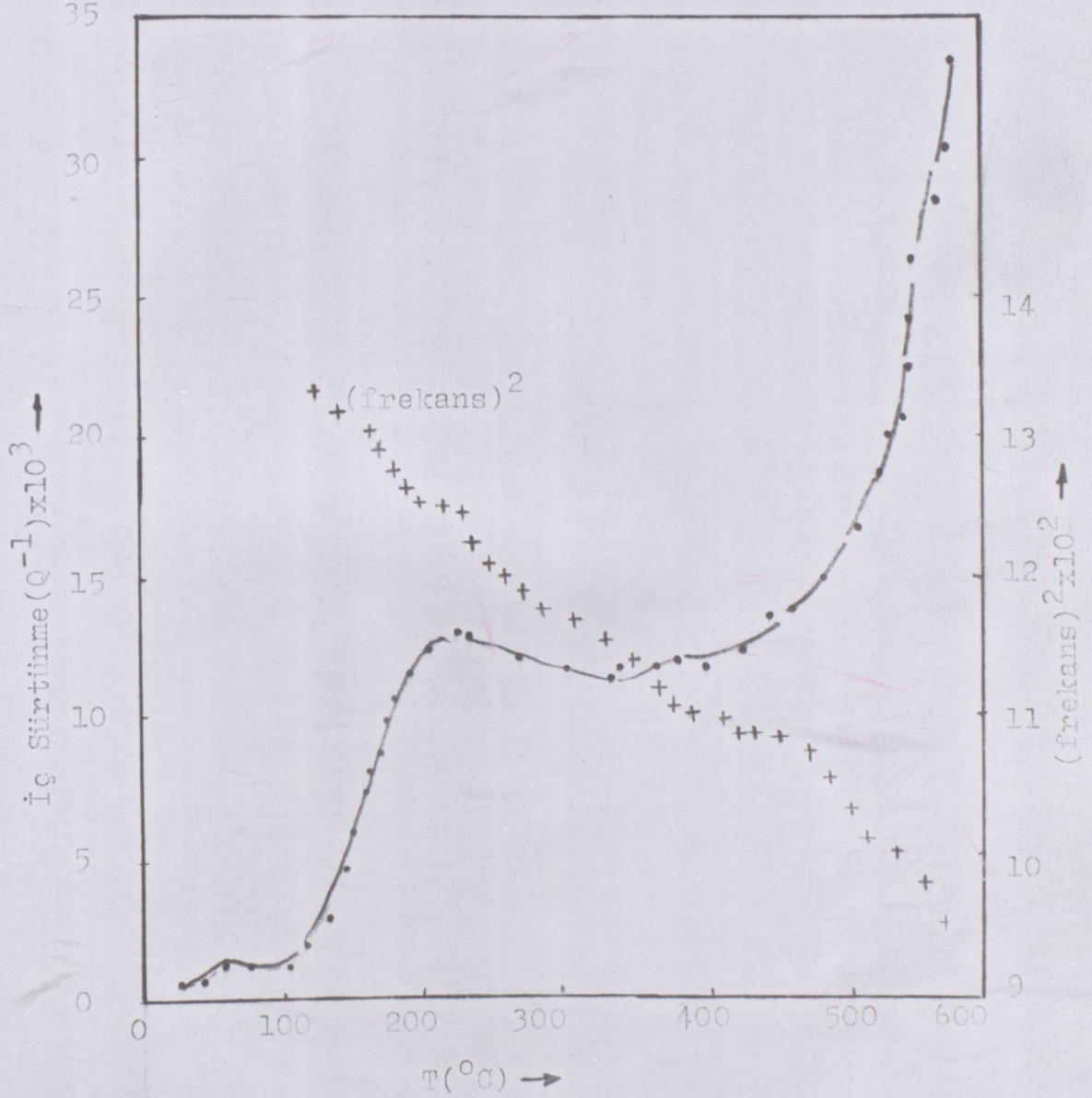


ŞEKİL 3.22- 0.29 Hz ve 575°C da 1 saat tutulup soğutulan parçada iç sürtünme değişimi

TABLO 3.20- Şekil 3.23'e ait deney sonuçları

t(sn)	f	δ	Q^{-1}	T(°C)	f^2
32.74	0.3054	0.10612	0.0337	600	0.0932
32.40	0.3086	0.10502	0.0334	580	0.0952
32.00	0.3125	0.0900	0.0286	560	0.0976
31.60	0.3164	0.06931	0.02206	540	0.1001
31.30	0.3194	0.0577	0.01838	520	0.1020
29.85	0.3350	0.0478	0.0152	500	0.1122
29.85	0.3350	0.0433	0.0138	480	0.1122
29.50	0.3389	0.0424	0.0135	460	0.1149
30.50	0.3282	0.0410	0.0130	440	0.1082
30.35	0.3294	0.0374	0.0119	420	0.1085
30.15	0.3316	0.0362	0.0115	400	0.1100
29.95	0.3338	0.0362	0.0115	380	0.114
29.82	0.3353	0.0346	0.0110	360	0.1124
29.65	0.3372	0.0355	0.0113	340	0.1137
29.35	0.3407	0.0341	0.01087	320	0.1160
29.10	0.3436	0.0351	0.0111	300	0.1180
28.90	0.3460	0.0355	0.0113	280	0.1197
28.80	0.3472	0.0372	0.0118	260	0.1205
28.65	0.3490	0.0390	0.0124	240	0.1218
28.35	0.3527	0.0411	0.0130	220	0.1244
28.10	0.3558	0.0407	0.0120	200	0.1266
27.80	0.3597	0.03465	0.00110	180	0.1293
27.70	0.3610	0.0266	0.0084	160	0.1303
27.50	0.3636	0.0146	0.0046	140	0.1322
27.30	0.3663	0.0101	0.0032	120	0.1341
27.10	0.3690	0.0009	0.0029	100	0.1361
26.90	0.3717	0.0007	0.0025	80	0.1381
26.60	0.3759	0.0006	0.0020	60	0.1413
26.10	0.3831	0.0003	0.0010	40	0.1467
25.70	0.3891	0.0001	0.0005	20	0.1514

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$

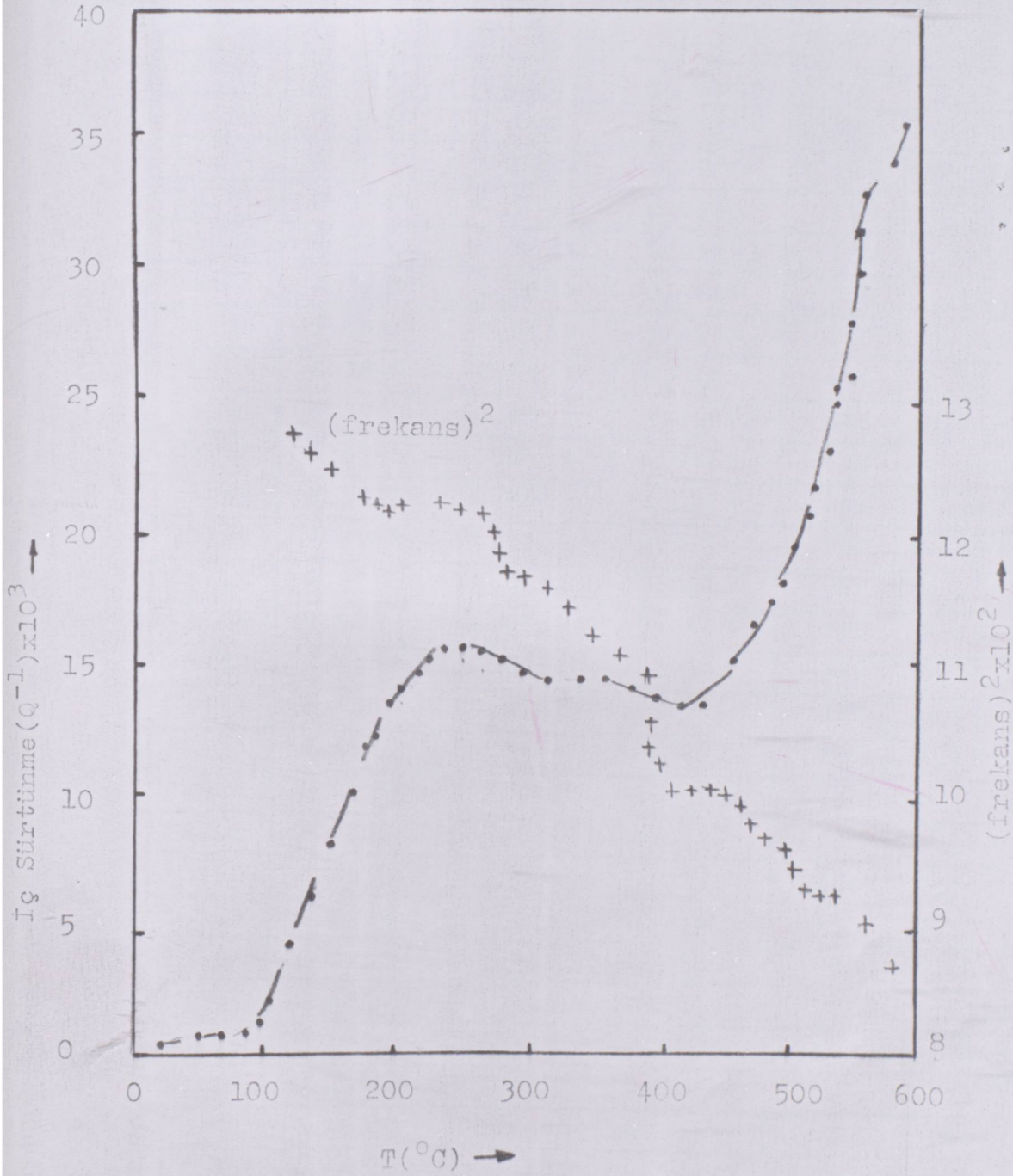


ŞEKİL 3.23- 0.29 Hz'de 575°C da 2 saat tutulup soğutulan parçada iç sürtünme değişimi.

TABLO 3.21- Şekil 3.24'e ait deney sonuçları

t(sn)	f	δ	Q^{-1}	T(°C)	f^2
34.15	0.2928	0.1193	0.0379	600	0.0854
33.85	0.2954	0.1131	0.0360	580	0.0872
33.20	0.0312	0.1058	0.0336	560	0.0907
32.75	0.0353	0.07788	0.0248	540	0.0932
32.75	0.0353	0.0789	0.0251	520	0.0932
32.30	0.3105	0.0602	0.0191	500	0.0964
32.00	0.3125	0.0535	0.0170	480	0.0976
31.70	0.3154	0.0478	0.0152	460	0.0995
31.50	0.3174	0.0441	0.0140	440	0.1007
31.25	0.0320	0.0433	0.0138	420	0.1024
31.00	0.3225	0.0450	0.0143	400	0.1040
29.90	0.3344	0.0462	0.0147	380	0.1118
29.70	0.3367	0.0462	0.0147	360	0.1133
29.35	0.3407	0.0448	0.01428	340	0.1160
29.25	0.3418	0.0449	0.0143	320	0.1168
29.15	0.3430	0.0450	0.01435	300	0.1176
29.00	0.3448	0.0462	0.0147	280	0.1189
28.60	0.3496	0.0488	0.155	260	0.1222
28.60	0.3496	0.0495	0.0157	240	0.1222
28.40	0.3521	0.0462	0.0147	220	0.1239
28.20	0.3546	0.0440	0.0140	200	0.1257
28.00	0.3571	0.0364	0.0116	180	0.1275
27.90	0.3584	0.0188	0.0060	160	0.1284
27.70	0.3610	0.0141	0.0045	140	0.1303
27.40	0.3649	0.01179	0.00356	120	0.1331
27.16	0.3681	0.00785	0.0025	100	0.1355
27.00	0.3703	0.00376	0.0012	80	0.1371
26.65	0.3752	0.00345	0.0011	60	0.1408
26.05	0.3838	0.00314	0.0010	40	0.1473
25.35	0.3944	0.0015	0.0005	20	0.1556

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$

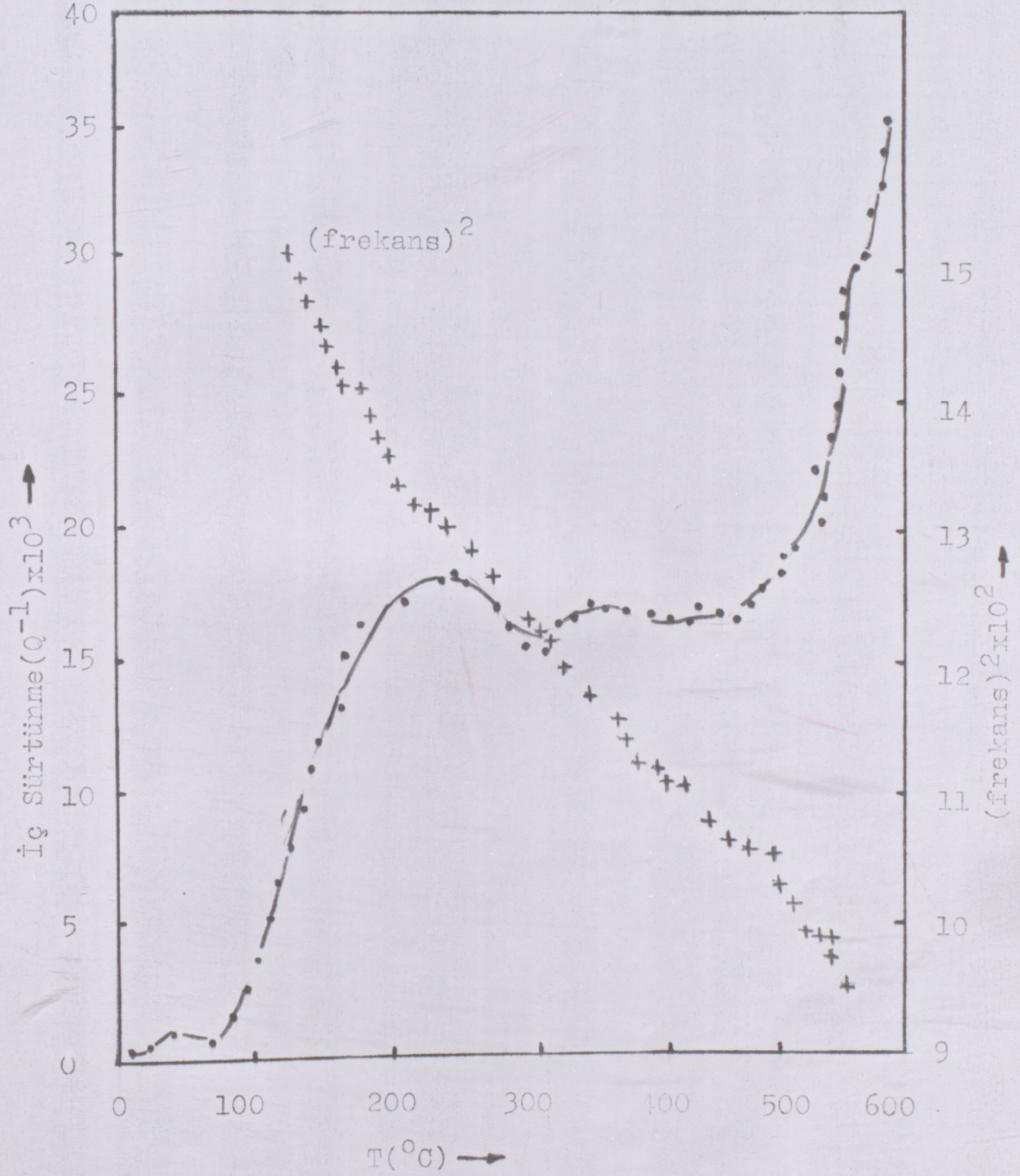


ŞEKİL 3.24- 0,29 Hz de 575°C da 4 saat tutulup soğutulan parçada iç sürtünme değişimi

TABLO 3.22- Şekil 3.25'e ait deney sonuçları

t (sn)	f	δ	ϕ^{-1}	T(°)	f^2
28.00	0.3571	0.0931	0.2924	600	0.1275
27.65	0.3616	0.0922	0.2896	580	0.1308
27.15	0.3683	0.0918	0.0292	560	0.1355
27.00	0.3703	0.0749	0.0285	540	0.1371
26.75	0.3732	0.0605	0.01927	520	0.1397
26.25	0.3809	0.0589	0.0187	500	0.1451
26.20	0.3816	0.0559	0.0178	480	0.1456
26.00	0.3846	0.0577	0.0183	460	0.1479
25.95	0.3853	0.0533	0.01697	440	0.1484
25.70	0.3891	0.0533	0.01697	420	0.1514
25.50	0.3921	0.0543	0.0173	400	0.1537
25.20	0.3968	0.0554	0.0176	380	0.1574
25.15	0.3976	0.0577	0.0183	360	0.1580
24.80	0.4032	0.0511	0.0163	340	0.1625
24.80	0.4032	0.0513	0.0163	320	0.1625
24.65	0.4056	0.0541	0.0172	300	0.1645
24.55	0.4073	0.0558	0.0177	280	0.1659
24.15	0.4140	0.0577	0.01834	260	0.1714
24.00	0.4166	0.0589	0.0187	240	0.1736
23.90	0.4184	0.0554	0.0176	220	0.1750
23.65	0.4228	0.0577	0.0183	200	0.1787
23.50	0.4255	0.0513	0.0163	180	0.1810
23.45	0.4264	0.0462	0.0147	160	0.1818
23.28	0.4295	0.0399	0.0125	140	0.1845
23.10	0.4329	0.01925	0.00612	120	0.1874
22.80	0.4385	0.00165	0.0052	100	0.1923
22.65	0.4415	0.00127	0.0040	80	0.1949
22.30	0.4484	0.00082	0.0026	60	0.2010
22.05	0.4535	0.00035	0.0011	40	0.2056
21.91	0.4557	0.00016	0.0005	20	0.2084

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$

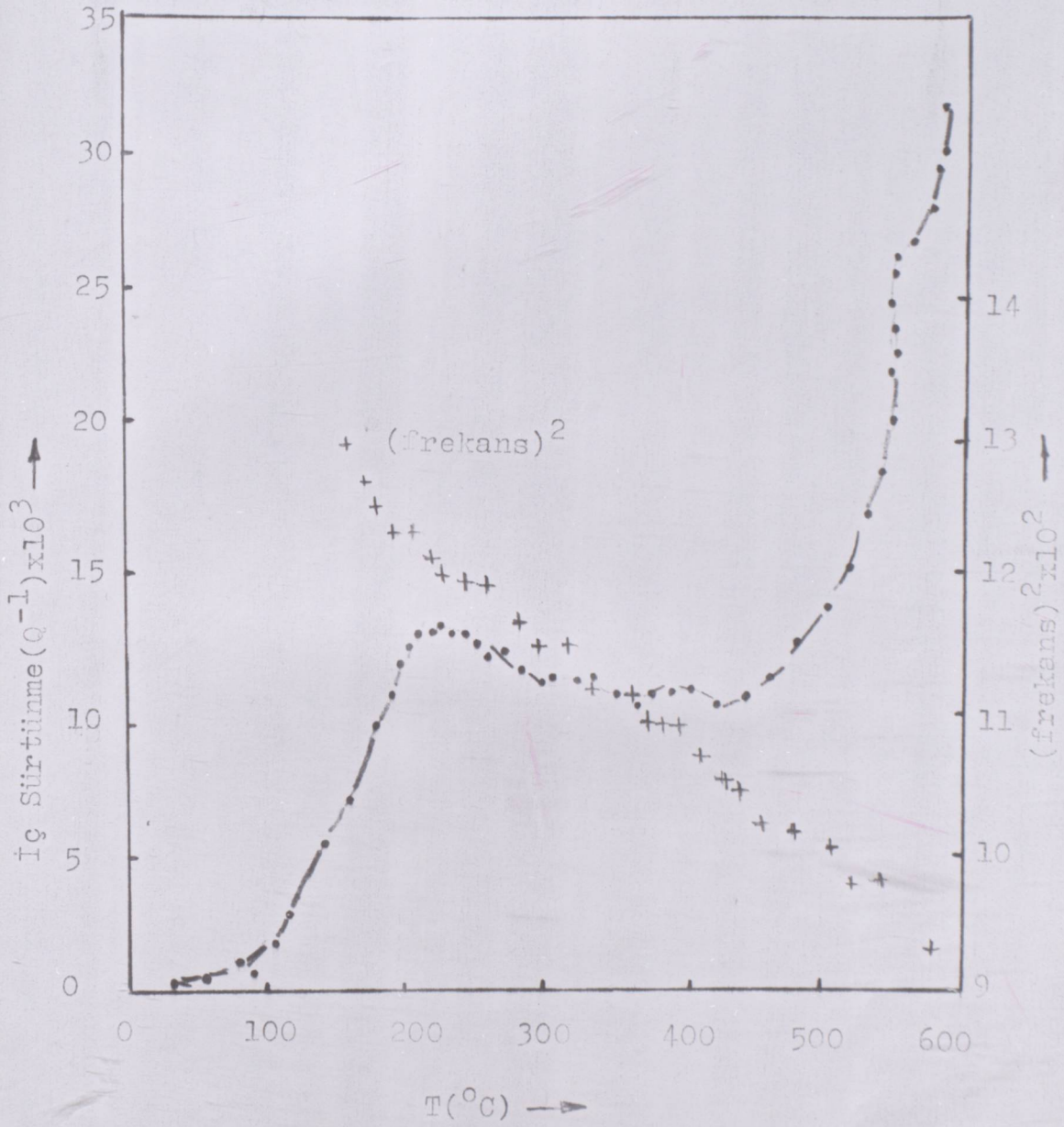


ŞEKİL 3.25- 0.29 Hz'de 575°C da 8 saat tutulup soğutulan parçada iç sürtünme değişimi.

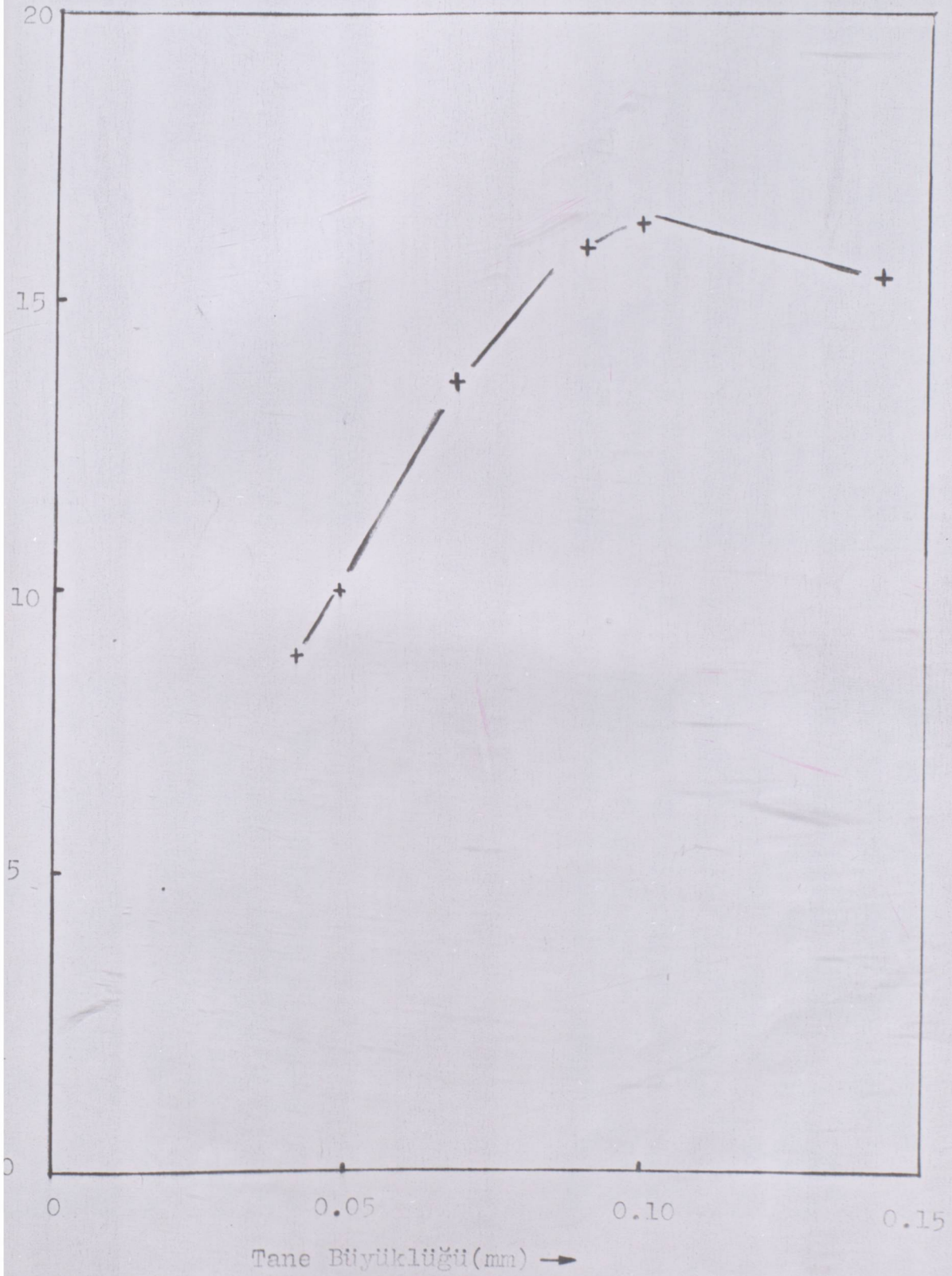
TABLO 3.23- Şekil 3.26'ya ait deney sonuçları

t(sn)	f	δ	Q^{-1}	T(°C)	f^2
32.80	0.3048	0.10045	0.03197	600	0.0929
32.70	0.3058	0.0885	0.02819	580	0.0935
32.54	0.3073	0.0840	0.02674	560	0.0944
32.30	0.3095	0.0700	0.02230	540	0.0958
31.80	0.3144	0.0480	0.0152	520	0.0988
31.55	0.3169	0.0462	0.0147	500	0.1004
31.20	0.3205	0.0396	0.0126	480	0.1027
31.10	0.3215	0.0367	0.0117	460	0.1033
30.90	0.3236	0.0336	0.0107	440	0.1047
30.70	0.3257	0.03373	0.01073	420	0.1061
30.35	0.3294	0.0350	0.0111	400	0.1085
30.22	0.3309	0.0342	0.0108	380	0.1094
30.10	0.3322	0.0322	0.0102	360	0.1103
29.80	0.3355	0.0338	0.0107	340	0.1126
29.72	0.3364	0.0338	0.0107	320	0.1132
29.75	0.3361	0.03509	0.0111	300	0.1130
29.30	0.3412	0.03576	0.0114	280	0.1164
29.00	0.3448	0.03850	0.01225	260	0.1189
28.90	0.3460	0.04077	0.01297	240	0.1197
28.70	0.3484	0.0420	0.01337	220	0.1214
28.40	0.3521	0.0393	0.01253	200	0.1239
28.20	0.3546	0.0277	0.0088	180	0.1257
27.80	0.3597	0.0207	0.0066	160	0.1293
27.45	0.3642	0.0166	0.0053	140	0.1327
26.85	0.3724	0.0087	0.0028	120	0.1387
26.65	0.3752	0.0062	0.0020	100	0.1408
26.20	0.3816	0.0050	0.0016	80	0.1456
25.85	0.3406	0.0037	0.0012	60	0.1496
25.19	0.3969	0.0031	0.0010	40	0.1575
25.07	0.3998	0.0015	0.0005	20	0.1591

$$f = \frac{10 \text{ (devir)}}{t \text{ (saniye)}}$$

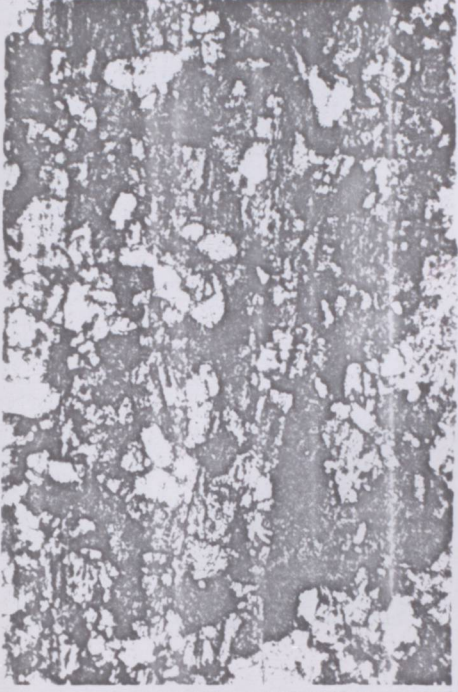


ŞEKİL 3.26- 0.29 Hz'de 16 saat tutulup soğutulan parçada iç sürtünme değişimi.



ŞEKİL 3.27- Tane büyüklüğü ile iş sürtünme değişimi

Tane Büyüklüğü İç Sürtünme Değişiminde Kullanılan
Numunelerin Mikrografik Yapıları(100XBüyütmede)



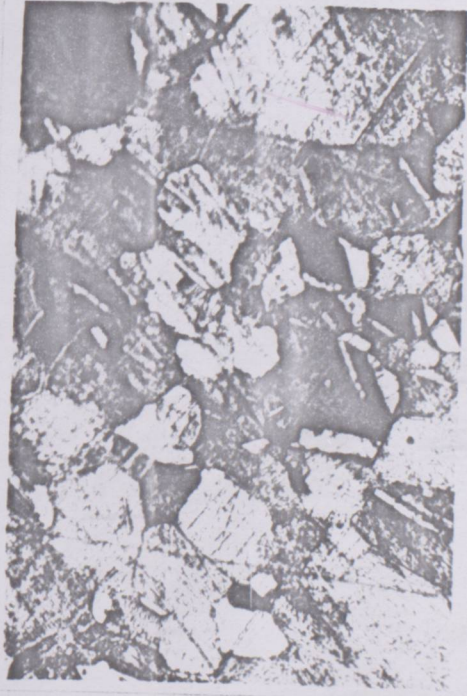
Şekil.1.



Şekil.2.



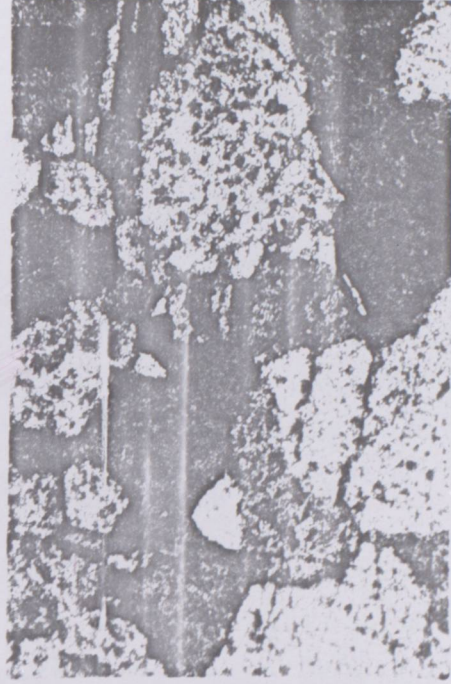
Şekil.3.)



Şekil.4.



Şekil.5.



Şekil.6.

Açıklama:

Şekil.1.	Tav süresi 1/2 saat	(575°C da)	Tane Büyüklüğü=0.045mm
Şekil.2.	Tav süresi 1	saat	" Tane Büyüklüğü=0.055mm
Şekil.3.	Tav süresi 2	saat	" Tane Büyüklüğü=0.071mm
Şekil.4.	Tav süresi 4	saat	" Tane Büyüklüğü=0.091mm
Şekil.5.	Tav süresi 8	saat	" Tane Büyüklüğü=0.11mm
Şekil.6.	Tav süresi 16	saat	" Tane Büyüklüğü=0.14mm

Alınan sonuçlar, topluca aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

1- İlk seri deneylerde, aynı tip ısıtma işlemi tabii tutulan ve frekans değeri 0.29 Hz-1.92 Hz arasında (Tablo 3.16) olacak şekilde beş ayrı kademede iç sürtünme ölçmeleri yapıldı. Elde edilen düşük sıcaklık maksimumlarının tepe nokta sıcaklıklarının 212°C ile 240°C arasında değiştiği tesbit edildi.

2- Birinci maddede belirtilen şartlar altında maksimum yükseklikleri önemli bir değişme göstermedi.

3- β değerleri 4.25 ile 3.65 arasında bulundu (Şekil 3.7).

4- Tane büyüklüğü, iç sürtünme ilişkisinin incelendiği deneylerde ısıtma işlemi değiştirilen tane büyüklüğü ile maksimum yüksekliği artmış ve belli bir değer aşıldığı zaman artma sabit kalmıştır.

5- Madde dörtteki deneylerde, tane büyüklüğü artarken maksimum tepe noktası sıcaklığı sabit bulundu (Şekil 3.27 ve Tablo 3.17).

6- Titreşim genliği değiştirilerek yapılan iç sürtünme ölçmelerinde kullanılan düşük genlik aralığındaki artmalarda; iç sürtünme artışı tesbit edildi. Titreşim genliği artışı ile bu artma, eğri eğimlerdeki artışla saptandı.

7- Titreşim genliği artması ile bilhassa yüksek sıcaklıklarda (550°C civarı) belirsizlik halleri görüldü.

8- Aktivasyon enerjisi değeri 31 kcal/mol olarak bulundu.

- 9- τ_0 ve Δe değerleri tesbit edildi. (sayfa 39, tablo 3.8)
- 10- $\ln(\delta_H \cdot \epsilon) - \epsilon$ eğrisinin lineer tipi tesbit edildi.
Aktivasyon Hacımları bulundu. (Tablo 3.13 ve 3.14)
- 11- Friedel analizleri ile $(\ln \delta_H - \epsilon)$ lineerliği tesbit edilmiştir. L_c değerleri hesaplanmıştır. (Tablo 3.11)
- 12- Bağlanma enerjileri $\ln \delta_H - 1/T(K)$ eğrilerinden bulunup teoriye uyarlık tesbit edilmiştir. (Tablo 3.12).

REFERANSLAR

- 1- C.Zener: "Elasticity and Anelasticity of Metals" Chicago Uni. Press, 1947.
- 2- W.Weber: "Über die Elastizität der Seidenfaden, Boggendorffs Ann., Vol.35, 247.
- 3- L.V.Vlack: "Mat.Science for Eng. Adison Wesley Pub." 1947, p.204-205.
- 4- A.S.Nowick and B.S.Berry: I.B.M.Res. and Dev., Oct.1961. Vol.5, 297, 312.
- 5- E.Wiechert: Annalen. Physic, Vol.50, 335, 546.
- 6- A.S.Nowick and B.S.Berry: I.B.M. Res. and Dev., Oct. 1961. Vol.15, 297, 332.
- 7- A.V.Granato and K.Lücke: J.Apply. Physies, Vol.27, 583, 1956.
- 8- A.V.Granato and K.Lücke: ibid., Vol.27, 789, 1956.
- 9- J.Friedel: Dislocations, Pergamon Press, 1965.
- 10- P.Peguin, J.Perez and P.Gobin: Trans.Met.Soc. A.I.M.E., Vol.239, 483, 1967.
- 11- T.S.Ke: Phys.Rev. Vol.73, 267, 1948.
- 12- J.P.Hirth and R.W.Balluffi: Acta Met., Vol.21, 929, 1973

- 13- R.S.Gates: Acta Met., Vol.21, 855, 1973.
- 14- R.S.Gates: Acta Met., Vol.21, 855, 1973.
- 14- T.S.Ke: Phys.Rev., Vol.71, 533, 1947.
- 15- M.E.DeMorton and G.M.Leak: Acta Met., Vol.14, 1140, 1966.
- 16- T.M.Williams and G.M.Leak: Acta Met., Vol.15, 1111, 1967.
- 17- L.Rotherham and S.Pearson: Trans.Amer.Inst.Min.Met.Eng., Vol.206, 881, 1956.
- 18- D.T.Peter, J.C.Bisseliches and J.W.Spretnak: Trans.Amer. Inst.Min.Met.Eng., Vol.230, 530, 1964.
- 19- Y.A.Shvedow: Scripta Met. Vol.13, 801, 1979.
- 20- A.Schnell and G.Sokolowski: 11 Nuovo Cimento, Vol.33, B,N,1,167, 1976.
- 21- K.Lücke, G.Sokolowski and H.Ebener: Phys.Stat.Sol. (a), 19, 493, 1973.
- 22- D.R.Marsh and L.D.Hall: Trans.Amer.Inst.Met.Eng., Vol. 197, 937, 1953.
- 23- J.N.Cordea and J.W.Spretnak: Trans.Met.Soc. A.I.M.E., Vol.233, 1685, 1965.
- 24- S.Weinig and S.S.Machlin: Trans. A.I.M.E., 209, 32, 1957.
- 25- D.T.Peter, J.C.Bisseliches and J.W.Spretnak: Trans. A.I. M.E., Vol.230, 1964.

26- W.Köster, L.Bangart and W.Lang: Z.Metall. 46, 84, 1955.

27- K.J.Marsh: Acta Met., Vol.2 May, 1954.

28- G.M.Leak; Progress Apply. Mat.Res., Vol 4, 1963.

29- J.T.A.Roberts and P.Barrand: J.I.M., Vol.96, 172, 1968.

30- P.Barrand: Acta Met., Vol.14, 1247, 1966.

HAL TERCOMESİ

1946 yılında Ankara (Çubuk)'da doğan Burkay Alnıpak: İlk öğretimini Ankara Çankaya İlkokulunda, Orta ve Lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 1966 yılında İ.T.Ü. Maden Fakültesi Metalurji Bölümüne girerek, 1972 yılında mezun oldu. 1974 yılında İ.D.M.M.A. Malzeme ve Ölçme Tekniği Kürsüsünde asistan olarak çalışmaya başladı, daha sonra Akademideki görevinden K.D.M.M.A. Malzeme ve İmal Usulleri Kürsüsüne geçti ve halen orada asistan olarak çalışmaktadır.

İÇİNDEKİLER

	<u>SAYFA</u>
ÖZET	i
SUMMARY	ii
GİRİŞ	1
 1. TEORİK İNCELEME	 2
1.1. İÇ SÜRTÜNME ve ANELASTİSİTE -----	2
1.2. DİSLOKASYONLARDA SÖNÜM -----	11
1.3. TANE SINIRLARINDA SÖNÜM -----	14
1.4. İÇ SÜRTÜNMENİN HESAPLANMASI VE TEMEL SÖNÜM EĞRİSİ -----	15
 2. DENEYSEL İNCELEMELER	 19
2.1. TORSİYONAL PENDULUM -----	19
2.2. DENEY PROGRAMI ve NUMUNE HAZIRLAMA -----	23
 3. DENEY SONUÇLARI VE YORUMLAMA	 27
3.1. SABİT GENLİKTE YAPILAN DENEYLER -----	27
3.1.1. Deney Sonuçları -----	27
3.1.2. Yorumlama -----	28
3.2. TİTREŞİM GENLİĞİNE BAĞLI SÖNÜM DENEYLERİ ---	45
3.2.1. Deney Sonuçları -----	45
3.2.2. Yorumlama -----	55
3.3. DEĞİŞİK TANE BÜYÜKLÜĞÜNDE YAPILAN DENEYLER -	63
3.4. GENEL SONUÇLAMA -----	63
 REFERANSLAR	 81

Ö Z E T

"Sönüm" veya "İç Sürtünme" malzemelerde mekanik titreşim enerjisinin ısıya dönüşmek suretiyle kaybolması olarak tarif edilebilir. Sönüm malzemelerin anelastik tutumları nedeni ile çok küçük gerilimlerde dahi ortaya çıkmaktadır. Arı metallerde görülen sönüm olayının tane sınırlarındaki dislokasyonlar nedeni ile oluştuğu bilinmektedir.

Arı bakır ile yapılan bu çalışmanın amacı, tane sınırı sönümünde çeşitli faktörleri sistematik olarak değiştirip aralarındaki ilişkileri bulmaktır. Bu maksatla, titreşim genliği, frekans, tane büyüklüğü, sıcaklık değiştirilip iç sürtünme değişimi tesbit edilmiştir.

Titreşim genliği ile tane büyüklüğünün tane sınırı sönümü üzerindeki etkilerini tesbit ve aralarındaki bağıntıyı kurmak maksadı ile konuya ait mevcut teoriler ve anelastisite prensipleri birlikte düşünülüp teori ve pratiğin uyumluluğu araştırılmıştır. Numunelere uygulanan tav koşulları değiştirilip tane büyüklüğü ile sönüm değişmesi incelenmiştir. Gevşeme parametreleri, aktivasyon enerjisi, titreşim genliğine bağlı sönüm incelemesi ve bağlanma enerjisi, aktivasyon hacmi hesaplamaları yapılmıştır. Bulunan sonuçların irdelenmesi ile teoriye uyarluluk saptanmıştır.

S U M M A R Y

"Damping" or "Internal Friction" is described as the irreversible dissipation of mechanical vibrational energy, in a solid. Damping occurs due to anelastic behaviour of materials even at very low stress levels. It is known that the damping which is observed in pure metals, can be caused by the dislocations in the grain boundary.

The purpose of this work is to investigate, the effects of frequency, strain amplitude and grain size on grain boundary relaxation in pure copper. These factors were changed systematically and internal friction measurements were made for each conditions. The grain boundary damping models which have been published are based on the theory of anelasticity and assumed that the grain boundary damping has its origins solely in anelasticity. Analysis have been made for investigation, the agreement with theory and practice. Changing the annealing conditions of samples were made for construct the diagram which show relationship between grain size and damping. After completing the experiments, relaxation parameters, activation energy were calculated and activation volumes, binding energies were also calculated from amplitude dependence measurements and results showed good agreement with theory.

G İ R İ Ş

Metallerde iç sürtünme konusu ilk defa 1947 yılında Ke,Ting Sui(11) tarafından ortaya atılmış ve günümüze kadar geçen sürede birçok araştırmacı bu konu ile ilgili birçok araştırmalar yapmışlardır. Tane sınırlarında bulunan dislokasyonların neden olduğu sönüm* Roberts ve Barrand'ın çalışmaları sonunda açıklık kazanınca(29), o zamana kadar mevcut teorik bilgiler ve modellerin konuya tam uyarlık göstermediği anlaşılmıştır. Halen mevcut teorilerin hiçbirisi kesinlik kazanmamıştır.

Roberts, Cordea ve Spretnak(23), Williams ve Leak(16), De Morton ve Leak(15) kübik yüzey merkezli metallerde tane sınırı iç sürtünmelerini araştırmışlar ve alınan sonuçlarda tam bir uygunluk olmadığı saptanmıştır.

Dolayısıyla bu çalışmada, tane sınırı iç sürtünmesi ile ilgili teorilere ve tane sınırlarının yapısına dayar verilmiş, teknik uyarlığının incelenmesi zorunlu görülmüştür.

*Sönüm deyiimi İngilizce damping karşılığı olarak kullanılmıştır.

TEŞEKKÜR

Tezimin meydana gelmesindeki çalışmalarımda yardım ve teşviklerini esirgemiyen Sayın Prof.Dr.Alpay ANKARA, Sayın Prof.Dr.Muzaffer SAĞIŞMAN ve Sayın Prof.Dr.Necdet TÜKEL'e, deneylerimi tamamladığım Manchester Üniversitesi Metalurji Fakültesine ve çalışmalarım tavsiieleriyle ışık tutan Sayın Dr.C.C.SMITH'e ve bu imkanı bana sağlayan Kocaeli Akademisine şükranlarımı sunarım.

Burkay Alnıpak

