

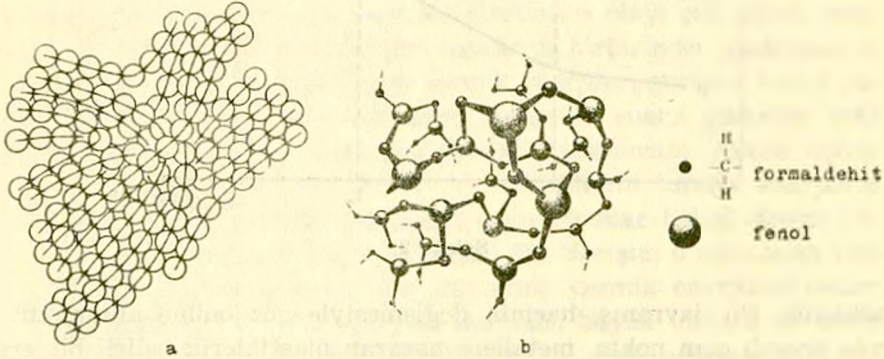
Plastik Malzemenin Viskoelastik Davranışları

Prof. Seiâhaddin ANIK *)

Y. Müh. Selma AKKURT **)

Plastik malzemenin en önemli özelliği; oda sıcaklığında ve yük altında, aynı anda katı ve sıvı cisimler gibi davranması yani hem elastik hem de viskoz özelliklere sahip olmasıdır. Bunun sonucu olarak da, uzun süre yük altında kalan plastik malzemeden yapılan elemanların boyut değişmesi ortaya çıkar. Boyut kararsızlığı olarak bilinen bu olay, plastiklerin önemli bir mahsurunu teşkil etmektedir. Bu makalenin amacı, plastik malzemenin boyut kararsızlığına neden olan viskoelastik davranışlarını incelemektir.

Bilindiği gibi, plastikler monomer denilen kimyasal bireylerin tekrarlanmasından oluşan malzemedir. Monomerlerin birbirine bağlanma şekline göre plastik malzeme, termoplastik ve termoset olmak üzere iki gruba ayrılır. Termoplastikler ayrı ayrı polimer zincirlerinden (Şekil 1-a).



Şekil 1.

oluşan malzemedir. Bu nedenle bunlara iki boyutlu polimer de denir. Termosetler ise, zincirlerin çapraz şekilde bağlanmasından oluşan üç boyutlu bir yapıya (Şekil 1-b.) sahip olan malzemedir.

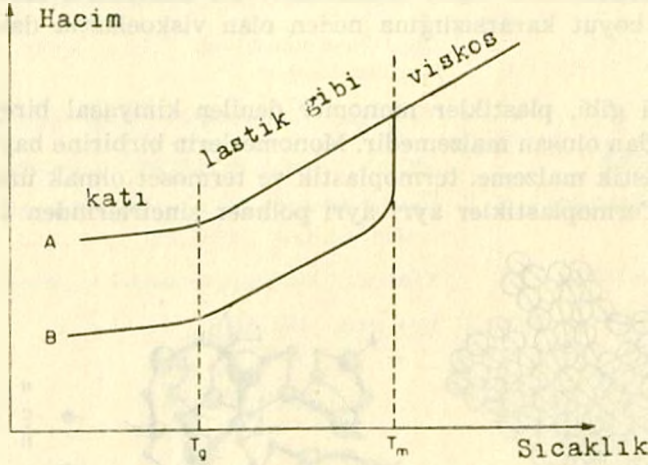
*) İ.T.Ü. Makina Fakültesi.

***) İ.T.Ü. Maçka - Makina Fakültesi.

Plastik malzemeyi oluşturan atom ve moleküller arasında primer ve sekonder olmak üzere iki türlü bağ vardır. Primer bağlar aynı zincirin atom ve molekülleri arasında bulunan bağlardır. Van der Waals kuvvetleri cinsinden olan sekonder bağlar, ayrı zincirlerin molekülleri arasında oluşan bağlardır. Primer bağlar, sekonder bağlardan daha kuvvetlidir.

Diğer taraftan, ayrı zincir molekülleri birbirine nazaran kritik mesafe denilen daha küçük bir mesafede bulunurlarsa, yerel kristalin yapısını oluştururlar. Bu halde moleküller arasında daha kuvvetli sekonder bağlar meydana gelir. Kristalin yapı, daha fazla termoplastik malzemeye aittir. Termosetler amorf bir yapıya sahiptirler.

Sekonder bağlar plastiklerin fiziksel özelliklerini ve bilhassa ergime noktasını etkiler. Şekil 2'de, amorf plastik malzeme (A) ile kristalin plastik malzemenin (B), sıcaklığın artışı karşısındaki davranışları görül-

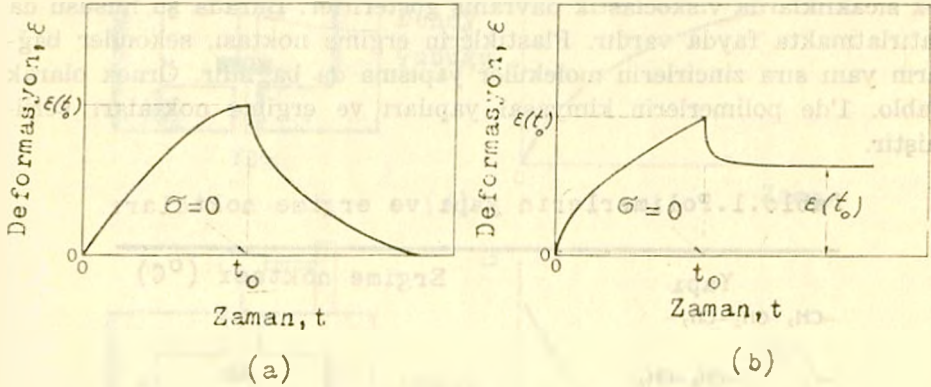


Şekil 2.

mektedir. Bu davranış, hacmin değişmesiyle göz önüne alınmıştır. Burada önemli olan nokta, metallere nazaran plastiklerin belirli bir ergime noktasının bulunmamasıdır. Amorf yapıya sahip olan plastikler, sekonder veya camlaşma sıcaklığı denilen belirli bir (T_g) sıcaklığından sonra yumuşama gösterirler ve lastik gibi, bir halden sonra viskos sıvı halini alırlar. Kristalin yapıya sahip olan plastiklerde, camlaşma sıcaklığından sonra kristalin yapı kaybolmaya başlar ve primer geçiş sıcaklığı denilen belirli bir (T_m) sıcaklığından sonra tamamen kaybolur. Malzeme

aniden viskos sıvı halini alır. (T_m) sıcaklığı, plastiklerin ergime sıcaklığı olarak kabul edilir.

Camlaşma sıcaklığının altında deformasyona tabi tutulan termoplastikler, yük kaldırıldıktan belirli bir zaman sonra tekrar ilk şeklini alabilirler (Şekil 3-a). Bu olaya etki sonrası elastisite (elastik hafıza) denir. Bununla beraber ilk şeklini kısmi olarak alan ve kalan deformasyon gösteren (Şekil 3-b) plastikler de mevcuttur. Oda sıcaklığında ilk şek-



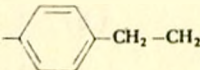
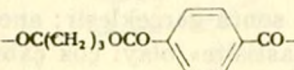
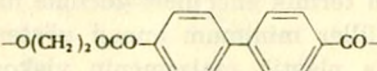
Şekil 3.

lini alma olayı oldukça uzun bir zamandan sonra gerçekleşir; ancak camlaşma sıcaklığının üstünde «etki sonrası elastisite» olayı çok çabuk meydana gelir. Bunun nedeni, deformasyon esnasında birbirinden uzaklaşan ve gerilme altında bulunan moleküllerin termik enerjileri gerilme halini yaratan kuvvetleri yenersen, bu moleküller minimum enerji gösteren eski tertipleme şekline dönerler. Aslında plastik malzemenin viskos deformasyonu, malzemeyi oluşturan atom ve moleküllerin termik enerjisine bağlıdır. Bilindiği gibi, malzemeyi teşkil eden atomlar belirli denge konumlarına göre titreşim halinde bulunurlar. Bu titreşim o atomların termik enerjisini ifade etmektedir. Bazı atomların termik enerjileri onları belirli bir konumda tutan bağ enerjisinden daha büyük olabilir ve atom denge konumundan çıkabilir. Bağ enerjisi (E_k) ile ifade edilirse, bu enerji sınırını yenme ihtimali $e^{-E_k/kT}$ dir. Burada (kT) atomun ortalama termik enerjisinin gösterir.

Dış kuvvete maruz kalmadığı sürece, malzeme atomlarının denge konumundan herhangi bir yöne çıkma ihtimali aynıdır; dolayısıyla de herhangi bir yönde malzeme deformasyon göstermez. Malzemeye belirli bir yönde kesme cinsinden bir yük tatbik edilirse, atomların denge konum-

larından çıkma ihtimali o yöne göre yönelir ve aynı yönde bir deformasyon gösterir. Yük sabit kalır ve atomlar denge konumundan aynı yöne çıkmaya devam ederlerse, malzeme belirli bir oranla şekil değiştirmeye devam eder; yani bir viskoelastik davranış gösterir. Şekil değiştirme veya sürünme oranı denilen bu oran, atomların termik enerjisinin bağ enerjisini yenme ihtimaline bağlıdır. Düşük ergime noktasına sahip olan plastikler, kurşun ve kadmiyum gibi metaller oda sıcaklığında dahi, yüksek ergime noktasına sahip olan çelik, tungsten gibi malzemeler ancak yüksek sıcaklıklarda viskoelastik davranış gösterirler. Burada şu hususu da hatırlatmakta fayda vardır. Plastiklerin ergime noktası, sekonder bağların yanı sıra zincirlerin moleküler yapısına da bağlıdır. Örnek olarak Tablo. 1'de polimerlerin kimyasal yapıları ve ergime noktaları verilmiştir.

Tablo.1. Polimerlerin yapı ve ergime noktaları

Yapı	Ergime noktası (°C)
$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	115
	380
$-\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{OCO}(\text{CH}_2)_6\text{CO}-$	45
	264
$-\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{OCO}(\text{CH}_2)_{12}\text{CO}-$	80
	330

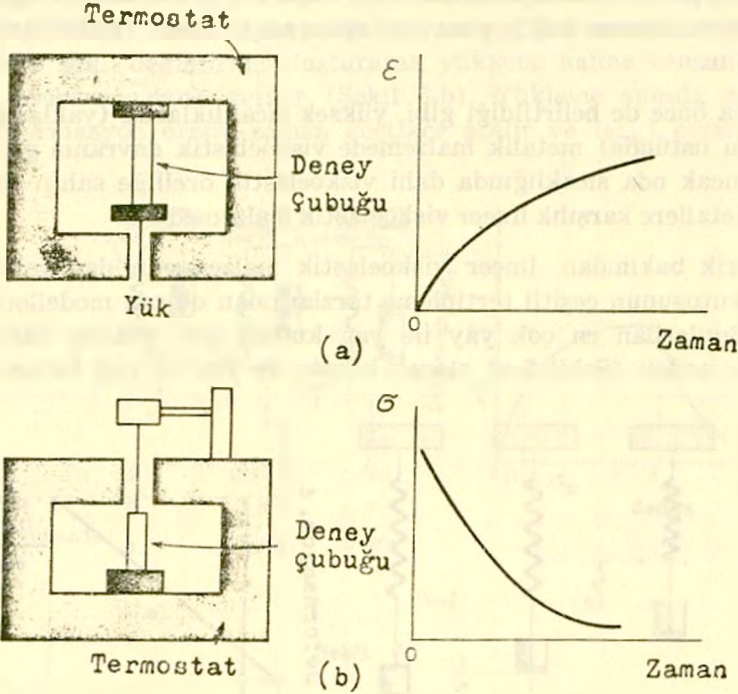
Elastik davranışa nazaran viskoelastik davranışın önemli özelliği, deformasyonun aynı zamanda gerilmeye ve zamana bağlı olmasıdır; yani genel olarak viskoelastik davranış gösteren malzeme için deformasyon :

$$\epsilon = f(\sigma, t) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada (σ) gerilme ve (t) ise zamandır.

Malzemenin viskoelastik davranışları sürünme ve gevşeme olmak üzere iki şekilde ortaya çıkabilir. Sürünme sabit yük altında bulunan bir cismin deformasyonunun zamanla büyümesine (Şekil 4-a); gevşeme ise

sabit deformasyon halinde bulunan bir cismin bünyesinde meydana gelen gerilmelerin zamanla azalmasına (Şekil 4-b) denir. Şekil 4-a ve 4-b'de aynı zamanda sürünme ve gevşeme olaylarını ölçmek için deney tertibatlarının basitleştirilmiş şemaları da gösterilmiştir.



Şekil 4.

Sürünme olayını karakterize eden deformasyon ve gerilme :

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (2)$$

oranına komplians denilir. Komplians zamana bağlı olan bir faktördür. Burada (σ_0) sabit gerilmedir. Kompliansı gerilmeye bağlı olmayan malzemeye, lineer viskoelastik malzeme denir.

Gevşeme olayını karakterize eden gerilme, deformasyon :

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

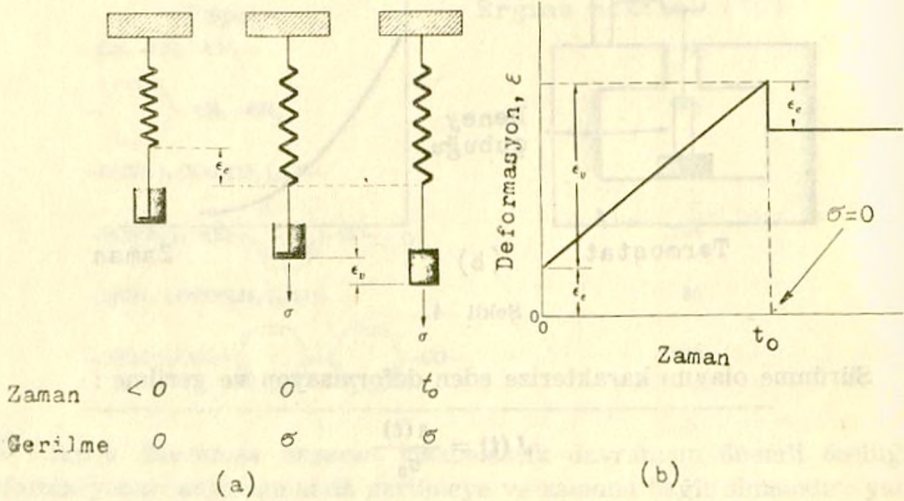
veya kayma (kesme) gerilmeleri $\tau(t)$ için :

$$G(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma_0} \quad (4)$$

oranına gevşeme modülü denir. Burada (ϵ_0) ve (γ_0) sabit deformasyonlardır. Gevşeme modülü $E(t)$ zamana bağlı bir faktördür. Gevşeme modülü deformasyona bağlı olmayan malzemeye lineer viskoelastik malzeme denir.

Daha önce de belirtildiği gibi, yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık olarak 400°C nin üstünde) metalik malzemede viskoelastik davranış göstermektedir. Ancak oda sıcaklığında dahi viskoelastik özelliğe sahip olan plastikler, metallere karşılık lineer viskoelastik malzemedir.

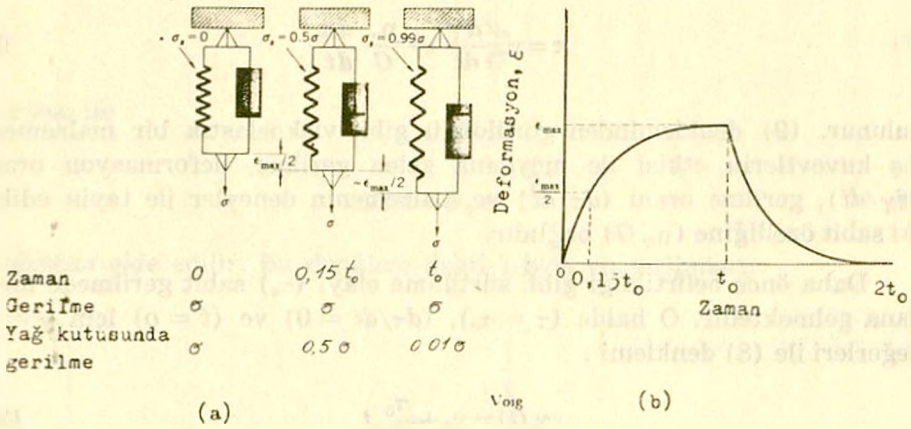
Teorik bakımdan, lineer viskoelastik malzemenin davranışları yay ve yağ kutusunun çeşitli tertipleme tarzlarından oluşan modellerle temsil edilir. Bunlardan en çok yay ile yağ kutusu seri şekilde bağlanan ve Maxwell modeli (Şekil 5-a) olarak bilinen ve yay ile yağ kutusu paralel



Şekil 5.

şekilde bağlanan ve Voight - Kelvin modeli (Şekil 6-a) denilen şemalar kullanılır. Maxwell modelinde sabit bir gerilme tatbik edildiğinde, yay tarafından derhal gerçekleştirilen bir (ϵ_e) elastik deformasyon meydana gelmektedir. Bunu takiben yağ kutusu tarafından oluşturulan bir (ϵ_v) deformasyon meydana gelecektir (Şekil 5-b). Gerilme hali kaldırılırsa, yalnız elastik deformasyon kaybolur. Voight - Kelvin modelinde (Şekil 6),

sistem belirli bir gerilmeye tabi tutulduğunda derhal elastik deformasyon meydana gelmez. Olay yağ kutusu tarafından kontrol edilir; şöyle ki, aynı anda viskos deformasyon ile birlikte yay tarafından gerçekleştirilen elastik deformasyonda meydana gelir. Sistemin maksimum deformasyonu yay tarafından sınırlanır. Yük kaldırıldığında, elastik şekil değiştiren yay önceki halini almaya çalışır ve yağ kutusunda, karışık yönde bir viskos şekil değiştirme oluşturarak yüklemeye haline benzer üssel bozalma eğrisi meydana getirir (Şekil 6-b). Yükleme anında maksimum olan deformasyon oranı, zaman geçtikçe azalır ve (ϵ_{max}) civarında sıfır olur.



Şekil 6.

Gerçek malzemede viskoelastik deformasyonların kayma gerilmeleri (τ) tarafından meydana getirildiği düşünülürse, esas deformasyonlar kayma cinsinden olacaktır. Dolayısıyla da Şekil 5 ve Şekil 6'daki sembollerin yerine, elastik deformasyonlar (γ_e) ve viskos deformasyonlar (γ_v) ile gösterilecektir.

Maxwell modeli göz önüne alınırsa, herhangi bir andaki deformasyon elastik ve viskos deformasyonların toplamı olarak ifade edilir; yani :

$$\gamma(t) = \gamma_e + \gamma_v \quad (5)$$

şekindedir. Elastik eleman Hook kanununa ve viskos eleman da Newton kanununa uyan elemanlar olarak kabul edilirse, elastik deformasyon :

$$\gamma_e = \frac{\tau}{G} \quad (6)$$

ve viskos deformasyon :

$$\gamma_0 = \left(\frac{\tau}{\eta_0} \right) t \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Bu halde (5) denkleminin temsil ettiği deformasyonun zamanla değişmesi :

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta_0} \quad (8)$$

şeklinde yazılır. Buradan :

$$\tau = \eta_0 \frac{d\gamma}{dt} - \frac{\eta_0}{G} \frac{d\tau}{dt} \quad (9)$$

bulunur. (9) denkleminden görüldüğü gibi, viskoelastik bir malzemede dış kuvvetlerin etkisi ile meydana gelen gerilme, deformasyon oranı ($d\gamma/dt$), gerilme oranı ($d\tau/dt$) ve malzemenin deneyler ile tayin edilen iki sabit özelliğine (η_0, G) bağlıdır.

Daha önce belirtildiği gibi, sürtünme olayı (τ_0) sabit gerilmeye meydana gelmektedir. O halde ($\tau = \tau_0$), ($d\tau/dt = 0$) ve ($t = 0$) için $\gamma = \gamma_0$ değerleri ile (8) denklemi :

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \frac{\tau_0}{\eta_0} t \quad (10)$$

şeklinde yazılır. Sürtünme olayını karakterize eden ve (2) denklemi ile ifade edilen komplians göz önüne alınırsa, (10) denkleminde dayanarak :

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0} = \frac{\gamma_0}{\tau_0} + \frac{1}{\eta_0} t \quad (11)$$

veya ($\gamma_0/\tau_0 = J_0$) değerleri ile :

$$J(t) = J_0 + \frac{1}{\eta_0} t \quad (12)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklem Şekil 7-a'da temsil edilmiştir.

Gevşeme olayı sabit bir (γ_0) deformasyonundan meydana geldiğinden, burada ($d\gamma/dt = 0$) ve ($t = 0$) için $\tau = \tau_0 = G_0\gamma_0$ değerleri ile, (8) denkleminin çözümünden :

$$\tau(t) = G_0 \gamma_0 e^{\left(-\frac{G}{\eta_v} t\right)} \quad (13)$$

bulunur. (4) denklemi ile ifade edilen gevşeme modülü göz önünde tutulursa :

$$G(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma_0} = G_0 e^{\left(-\frac{G}{\eta_v} t\right)} \quad (14)$$

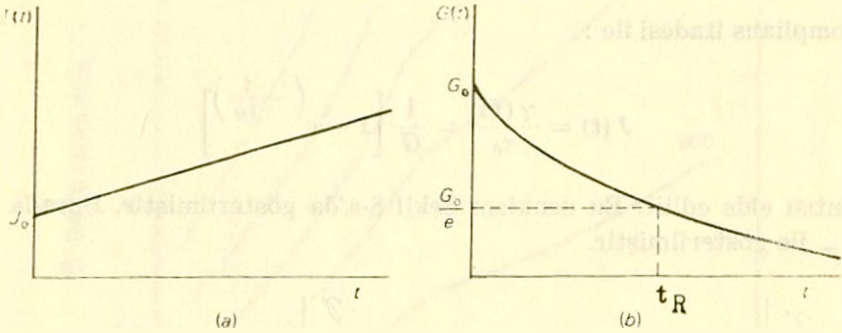
veya, gevşeme sabitesi veya gevşeme zamanı denilen :

$$t_R = \frac{\eta_v}{G} \quad (15)$$

ifadesi ile :

$$G(t) = G_0 e^{-\frac{t}{t_R}} \quad (16)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklem Şekil 7-b'de gösterilmiştir.



Şekil 7.

Burada (G_0) malzemenin başlangıçtaki elastiklik modülüdür. Gevşeme sabitesi veya gevşeme zamanı, malzemenin viskos akma karşı direncini göstermektedir. Aniden bir (γ_0) deformasyona maruz kalan bir malzemede, moleküllerin yeniden tertiplenmesi, gerilmenin azalmasına yol açar. Gevşeme zamanı küçük olan malzemede, moleküllerin akma karşı direnci küçüktür; dolayısıyla de bu malzemede gerilmenin düşüşü daha çabuk meydana gelir.

Voight - Kelvin modeli göz önünde tutulursa, malzemenin davranışı gerilmelerin yardımı ile ifade edilir. Bu halde sistemde meydana gelen elastik gerilme (τ_e) ve viskos gerilme (τ_v) ile gösterilirse, toplam gerilme :

$$\tau = \tau_e + \tau_v \quad (17)$$

şeklinde yazılır. Elastik gerilme Hook kanununa, viskos gerilme Newton kanununa uygun olarak kabul edilirse, ($\tau_e = G\gamma$) ve ($\tau_v = \eta_v (d\gamma/dt)$) değerleri ile (17) denklemi :

$$\tau = G\gamma + \eta_v \frac{d\gamma}{dt} \quad (18)$$

tarzında bulunur.

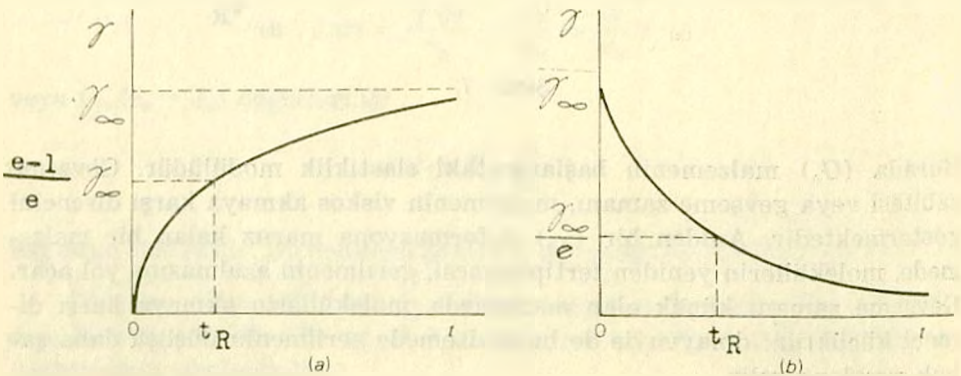
Sürtünme olayını karakterize eden ($\tau = \tau_0 = \text{sabit}$) ve ($t = 0$) için ($\gamma = 0$) sınır koşulları çerçevesinde (18) denklemi çözülmüşür :

$$\gamma(t) = \frac{1}{G} \tau_0 \left[1 - e^{-\frac{t}{t_R}} \right] \quad (19)$$

ve komplians ifadesi ile :

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0} = \frac{1}{G} \left[1 - e^{-\frac{t}{t_R}} \right] \quad (20)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklem Şekil 8-a'da gösterilmiştir. Burada $1/G = \gamma_\infty$ ile gösterilmiştir.

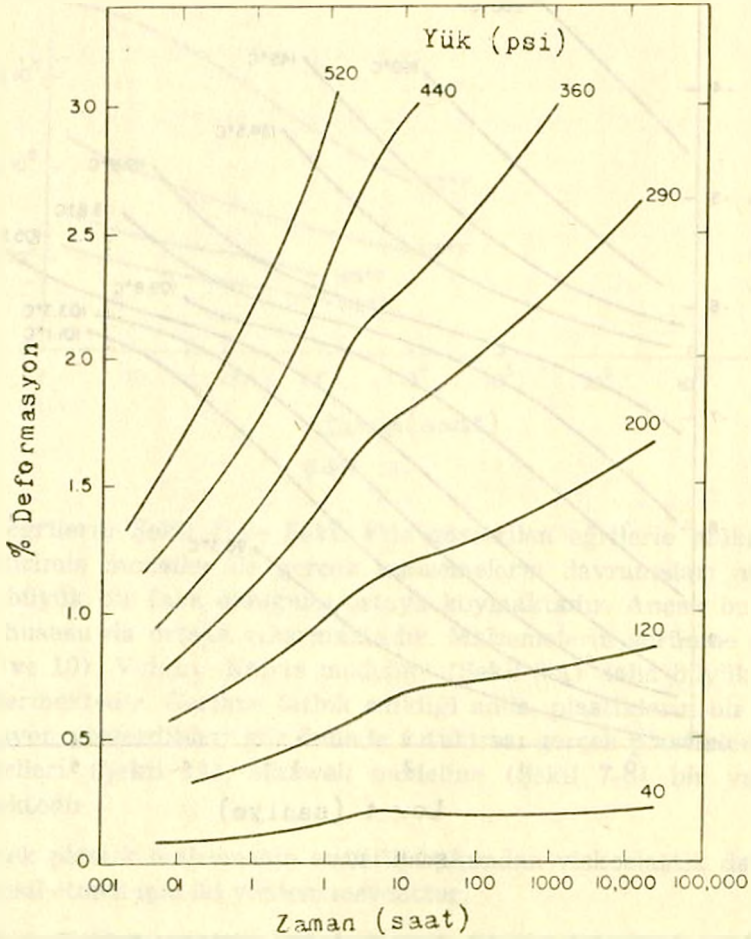


Şekil 8.

Görüldüğü gibi, Voight - Kelvin modeline göre, sisteme ani bir (τ_0) sabit gerilme tatbik edilirse, sistem aniden cevap vermeden «gecikmiş elastisite» gösterecektir. Sistemin deformasyonu zamana bağlı olarak üssel şekilde (γ_∞) değerine yaklaşacaktır. Aynı zamanda bu modele uyan malzemeler «elastik hafıza» gösterirler. Şöyle ki, ($t = 0$) için ($\tau_0 = 0$) ve ($\gamma = \gamma_\infty$) sınır koşullarında (18) denkleminin çözümü :

$$J.t) = \gamma_\infty e^{\left(-\frac{t}{t_R}\right)} \quad (21)$$

şeklindedir (Şekil 8-b).



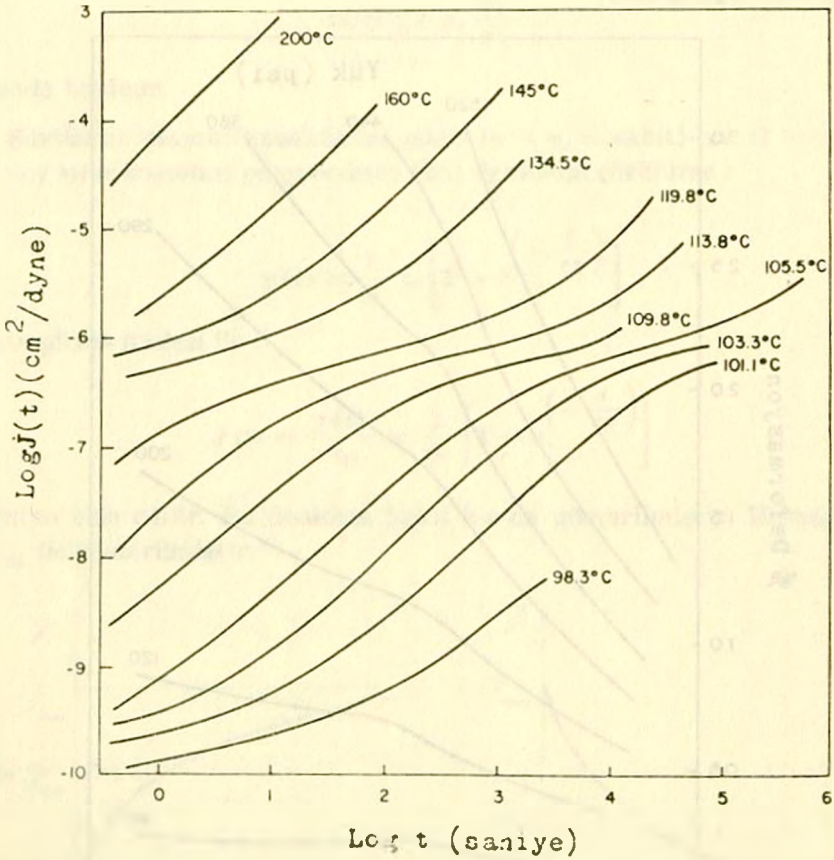
Şekil 9.

Yukarıdaki denklemlerde (t_R)'ye gecikme zamanı denir. Malzemede (γ_{sp}) deformasyon meydana getiren gerilme aniden kaldırılırsa, deformasyon zamana bağlı olarak sıfır değerine doğru üssel azalma gösterir.

Gevşeme koşulu ($d\gamma/dt = 0$) uygulanırsa, (18) denkleminde tüm (t) değerleri için :

$$\tau = G \gamma_{\infty} \quad (22)$$

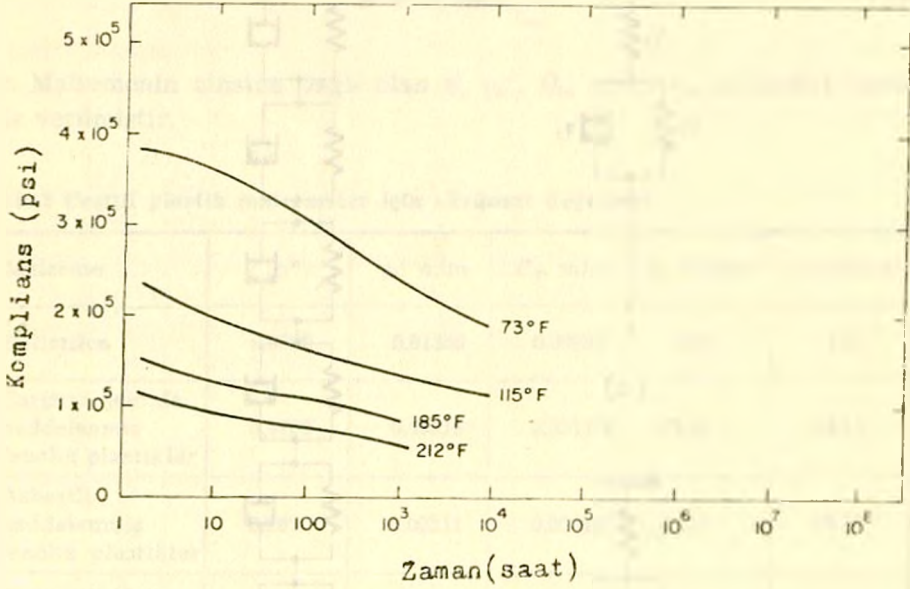
bağıntısı elde edilir. Başka bir deyimle Voight - Kelvin modeli gevşeme olayını göstermez.



Şekil 10.

Malzemelerin viskoelastik davranışlarını gösteren Şekil 7 ve Şekil 8'deki eğriler basitleştirilmiş eğrilerdir. Buna karşılık gerçek plastik mal-

zemelerin davranışları çok daha karışıktır. Örnek olarak Şekil 9'da (2), 10°C'ta çeşitli gerilmelere tabi tutulan polietilenin sürünme eğrileri, Şekil 10'da çeşitli sıcaklıklarda polistirenin kompliansı, Şekil 11'de çeşitli sıcaklıklarda poliasetalin (Delrin 500) gevşeme modülünü kullanarak gevşeme eğrileri verilmiştir.



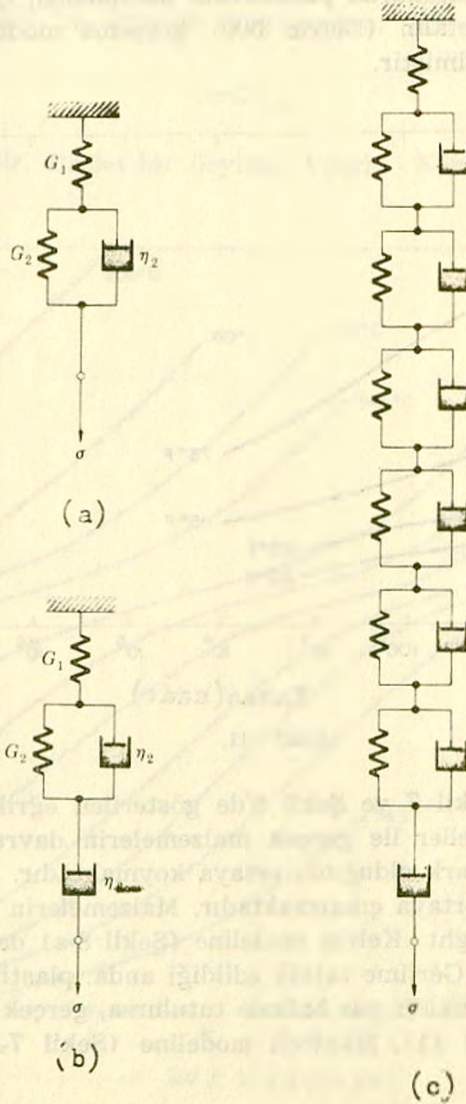
Şekil 11.

Bu eğrilerin Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilen eğrilerle mukayesesi, basitleştirilmiş modeller ile gerçek malzemelerin davranışları arasında oldukça büyük bir fark olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu mukayese şu hususu da ortaya çıkarmaktadır. Malzemelerin sürünme eğrileri (Şekil 9 ve 10), Voight - Kelvin modeline (Şekil 8-a) daha büyük yaklaşım göstermektedir. Gerilme tatbik edildiği anda, plastiklerin bir elastik deformasyon gösterdikleri göz önünde tutulursa, gerçek plastiklerin gevşeme eğrileri (Şekil 11), Maxwell modeline (Şekil 7-b) bir yaklaşım göstermektedir.

Gerçek plastik malzemenin analitik bakımdan viskoelastik davranışlarını temsil etmek için iki yöntem mevcuttur.

Birinci yöntem, yay ve yağ kutularını çeşitli şekilde tertipleyerek (Şekil 12) gerçek malzemeye daha yakın bir davranış denklemi elde et-

mektir. Ancak bu tertipleme tarzları ne kadar karışık olurlarsa olsun teorik anlamdan başka bir değer taşımazlar.



Şekil 12.

İkinci yöntemde plastiklerin viskoelastik davranışları ampirik bağıntılarla temsil edilir. Deneylerle bulunan değerlerin istatistik yolla elde edilen denklemlerden en çok kullanılanları (3,4) :

$$\gamma = \gamma_0 + B t^n \quad (23)$$

şeklindedir. Burada :

$$\gamma_0 = \gamma_0' \sinh \frac{\tau}{\tau_0} \quad (24)$$

$$B = C_0 \sinh \frac{\tau}{\tau_m} \quad (25)$$

dır. Malzemenin cinsine bağlı olan n , γ_0' , C_0 , τ_0 ve τ_m sabiteleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo.2 Çeşitli plastik malzemeler için sürünme değerleri

Malzeme	n^*	γ_0' m/m	C_0 , m/m	τ_0 , N/mm ²	τ_m , N/mm ²
Polietilen	0,0890	0,01350	0,00397	2,76	1,27
Çarpraz şekilde haddelenmiş fenolik plastikler	0,0763	0,00315	0,001176	82,74	55,16
Asbestli haddelenmiş fenolik plastikler	0,267	0,00311	0,000127	27,60	16,55
Polivinilklorür (tavlanmış)	0,3109	0,01150	0,00018	41,37	14,48

* Bu değerler ile (23) denklemdaki t saat olarak alınacak

LİTERATÜR :

- (1) Guy, G.A., «Introduction to Materials Science», McGraw - Hill, New York, 1971.
- (2) Suh, P.N., and Turner, L.P.A., «Elements of the Mechanical Behavior of Solids», McGraw - Hill, New York, 1975.
- (3) DiBenedetto, T.A., «The Structure and Properties of Materials», McGraw - Hill, New York, 1967.
- (4) Penny, K.R., and Marriott, L.D., «Design for Creep», McGraw - Hill, New York, 1971.