

Ezgi Günay
Y. Doçent Dr.

Gazi Üniversitesi
Makina Mühendisliği Bölümü
06570 ANKARA

Emre Uludoğan
Mak. Yük. Müh.

AR-EN Grup Makine
İvogsan 691. Sok., No. 42
Yenimahalle, 06370 ANKARA

Transvers İzotrop Değişik Ağaç Numunelerin Kayma Modülü Değişimlerinin Deneysel Belirlenmesi

Yapılan çalışmada, veri toplama sistemleri yardımıyla transvers izotrop fiber kompozit olarak bilinen değişik geometri ve türlerdeki ağaç örnekleri üzerinde burulma deneyi yapılmıştır. Kayma gerilmelerine karşılık elde edilen gerinim ölçümleri, gerinim pullarının içi dolu veya içi boş olmak üzere iki grup geometriye sahip daire kesitli ağaç numunelerin üzerine ve iç yüzeyine belirli koordinatlar boyunca yerleştirilmesiyle yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda, koordinat bağımlı fonksiyonlar ile kayma modülü değer değişimlerinin tanımlamaları yapılmıştır. Genellikle fiber asal eksen yönlerine bağlı ortalama değerler ile verilmekte olan kayma modülleri, bu çalışma ile yarıçap, çevresel ve eksenel yönlerdeki dağılımları ile beraber $G(r)$, $G(\phi)$ ve $G(z)$ eşitliklerinde polinom ve üstel fonksiyonlar ile tanımlanarak gösterilmiştir.

GİRİŞ

Ağaç malzeme, özellikleri açısından genel ortotropik veya transverse izotropik fiber kompozit malzeme olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde, ağaç numunelerin üzerinde araştırmaların devam ettiği deneysel çalışmaların ayrıca analitik formülasyonlarla desteklenerek yürütülmesini kapsayan çalışmalara az da olsa rastlanmaktadır. Malzeme sabitlerini yönler bağımlı fonksiyonlar ile tanımlamaya çalışan araştırmalardan birisi Turley vd. [1] (Bozorth [2]., Wooster [3]) tarafından verilmektedir. Bu çalışmada, anizotropik malzemenin fiziksel özellikleri, belirlenen düzlemlere göre fonksiyonlarla tanımlanarak verilmektedir. Bir diğeri, Sumi, vd. [4] tarafından ultrasonik gerinme ölçüm teknikleri kullanılarak, dokular üzerinde kayma modüllerinin tanımlanmasını içermektedir. Saliklis vd. [5-6], ağaç paneller üzerinde yaptığı çalışmada, düzlemsel kayma modülü $G(\theta)$ ve Young's modülü, $E(\theta)$ fonksiyonlarını θ çevresel yönüne bağlı değişimler cinsinden $\sin\theta$ ve $\cos\theta$ trigonometrik fonksiyonların ifadeleri ile deneysel çalışmalar sonucunda tanımlamışlardır. Salmén'in [7] yaptığı çalışmada ise mikromekanik seviyede fiber ve matris malzemenin elastik malzeme özelliklerinin ifadeleri ağaç-polimer yapılar için çıkarılmış olup, fiber ve fibere dik yönlerdeki elastik sabit değerleri kuadratik ifadeler ile verilmiştir.

Literatüre bakıldığı zaman genellikle ağaç paneller üzerinde tork uygulanan ve yalnızca, θ yönlü kayma modülü $G(\theta)$ fonksiyonu

tanımlamalarına ait deneysel çalışmaların sonuçlarını görmekteyiz [5]. Dairesel kesitli fiber kompozit çubuklar üzerindeki fonksiyon tanımlamaları için daha önce çalışılmamıştır. Yapılan bu çalışmada [8-9], fiber kompozit malzemelerin genel olarak üç asal yönde verilmekte olan G_{12}, G_{23}, G_{13} ortalama kayma modülü değerleri, transverse izotrop malzeme olan ağaç numuneler için silindirik koordinat sistemindeki radyal, çevresel ve eksenel yönler bağımlı ampirik değişim fonksiyonları $G(r)$, $G(\phi)$ ve $G(z)$ ile ifade edilebilmişlerdir. Yaklaşık değerleri itibariyle, bu çalışmada elde edilen $G(r)$ linear fonksiyonlarının G_{13} 'ü, $G(\phi)$ ve $G(z)$ üstel ve kuadratik fonksiyonlarının ise G_{23} 'e karşılık geldiklerini, söyleyebiliriz. Aynı zamanda bu çalışmada, malzeme sabitlerinin yanı sıra kayma ve normal gerinim değerleri arasında da herhangi bir simetri şartı olmadığı kabul edilerek çalışılmıştır. Deneyler, bütün bu değerlerin birbirlerine nasıl bağlı olduğunu gösterebilmek amacıyla yapılmıştır. Bu konu ile ilgili ek bilgi bir sonraki bölümde verilmektedir. Koordinat tanımlı gerinim ölçümleri için gerinim pulları ve yapılan ölçümlerin doğruluk testi için ise iki farklı veri toplama cihazı kullanılmıştır. Ortalama değerler için değişik ağaç türü ve geometrilerdeki (içi dolu/içi boş) ağaç numuneler test edilmiş, yaklaşık olarak yapılmış olan 100 deneye ait sonuçlar, tablolar ve eğriler halinde özetlenerek sunulmuştur. Ağaç malzeme üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ve sonucunda fonksiyonlarla belirlenmeye çalışılan doğrusal veya kuadratik elastik malzeme özelliklerinin, bir sonraki kısımda da açıklanacağı

üzere hem teorik alanda hem de diğer yanal izotropik fiber kompozit malzemelere ait deneysel çalışmalarda da yol gösterici olacağı düşünülmüştür.

DENEYLER

Formülasyon

Transverse izotropik malzeme olarak kabul edilen ağaç numunelerde kayma gerilme-gerinim dağılımlarının ortalama değerlerden daha farklı eğilime sahip olabileceği düşünülerek deneysel testlere başlanmıştır. Şekil 1 ile verilen ağaç kesiti, transvers izotropi düzlemlerinden birini göstermektedir. Burulma problemi için, genel Hooke kanununa ait kayma gerilmeleri ve gerinimleri arasındaki bağıntı aşağıdaki iki denklemde verilmektedir. En genel haldeki Hooke kanunu, burulma yükü altındaki transverse izotropik malzeme oluşabilecek bütün tepkilerin dikkate alınmasıyla beraber silindirik koordinatlarda, r yarıçap, z orta burulma eksenine bağlı olan ve silindirik simetriye sahip olduğu için de θ çevresel koordinatlardan bağımsız 11 farklı elastik sabit cinsinden Denklem (1) ve (2)'de görüldüğü gibi yazılabilmektedir [10-11]. Malzemenin simetri özellikleri dikkate alındığında ise 11 genel sabit sayısı 5 sabit sayısına indirgenmektedir (Ek A-Denklem (A1)). Bu durumda, malzeme matrisinin değerleri C_{ij} sayısal olarak azaltılmış olduğundan, uygulanacak mühendislik problem çözümlerinde malzeme içerisinde oluşmakta olan birim deformasyonların birbirleri üzerindeki etkileşimleri ifade edilemeyecektir.

$$\tau_{\theta z} = C_{14} \varepsilon_r + C_{24} \varepsilon_{\theta} + C_{34} \varepsilon_z + C_{44} \gamma_{z\theta} + C_{45} \gamma_{rz} + C_{46} \gamma_{r\theta} \quad (1)$$

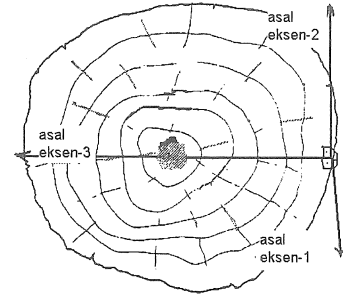
$$\tau_{r\theta} = C_{16} \varepsilon_r + C_{26} \varepsilon_{\theta} + C_{36} \varepsilon_z + C_{46} \gamma_{z\theta} + C_{56} \gamma_{rz} + C_{66} \gamma_{r\theta} \quad (2)$$

Yukarıdaki ifadelerde C_{ij} değerleri malzemenin lif yönlerine bağlı elastik sabit katsayılarıdır.

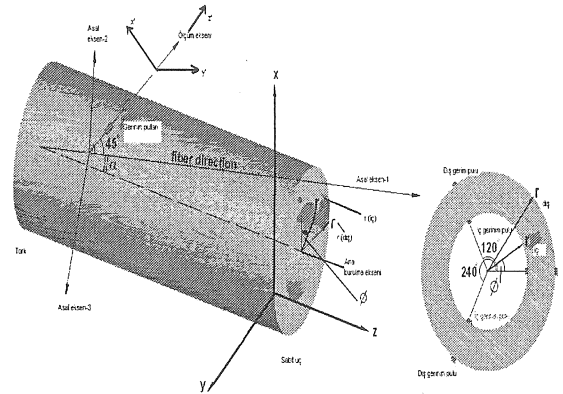
Denklem (1) ve (2)'de $\tau_{\theta z}$ ve $\tau_{r\theta}$ burulma yüklemesi altındaki çubukta oluşan kayma gerilmelerinin silindirik koordinatlardaki gösterimleridir. $\varepsilon_r, \varepsilon_{\theta}, \varepsilon_z$ değerleri ise r, θ, z yönlerinde oluşmakta olan normal, $\gamma_{z\theta}, \gamma_{rz}, \gamma_{r\theta}$ değerleri ise karşılıklı olarak kayma gerinim bileşenlerine ifade etmektedirler.

Yapılan deneysel çalışmalarda, silindirin dış ve iç yüzey kısımlarındaki fiberlerin açısal konumlarını, silindirik koordinat sistemine göre tanımlayabilmek için θ açısı kullanılmış olup orta burulma eksenine göre dönme ise ϕ (rad) açısı ile ölçülmektedir. Yüzeyler üzerindeki fiberlerin açısal konumları asal eksenlerin (1-2-3) kullanılması ile orta eksene göre α

açısı ile tanımlanırken, orta eksen ile gerinim pullarının yapıştirılarak ölçüm yapıldığı doğrultu arasındaki açı θ' ile gösterilmiştir. Böylece ölçüm ekseninin açıları $\theta' = \alpha + 0^\circ$, $\theta' = \alpha + 45^\circ$ ve $\theta' = \alpha + 90^\circ$ ile tanımlanmıştır (Şekil 2). Bu arada, ölçüm eksenini (gerinim pullarının sırayla yapıştirıldığı doğrultu) z' ile de tanımlanarak, x-y-z koordinat sisteminin ilk orijin konumundan, ölçüm eksenini doğrultusundaki z' nin z ile üst üste oturtulduğu konumuna transfer edilmesi ile de ifade edilmiştir. Böylece 1-2-3 asal eksenler ile ölçüm eksenini üzerinden çıkarılmış olan $x' - y' - z'$ eksen takımları arasındaki açısal konum tanımlamaları da yapılabilecektir.



Şekil 1. Transverse izotropik kompozit yapıya örnek bir ağaç kesiti yapısı ve malzemenin asal yönleri



Şekil 2. İçi boş ağaç numunenin r, ϕ, z silindirik

koordinat sisteminde α fiber açısı boyunca tanımlanmış ölçüm eksenini üzerine yerleştirilmiş tek eksenli gerinim pulları ve 1-2-3(LRT) asal eksenleri ile beraber gösterimi

Burada sonuçları anlatılmakta olan deneysel çalışmalarda, daha önce üzerinde çalışılan analitik ve deneysel çalışmaların bir devamı durumundadır [12-15]. Analitik çalışmalarda, burulma yüklemesi altındaki transvers izotropik kompozitlerin bünye denklemlerinin koordinatlara bağlı olarak 2. mertebeden kısmi diferansiyel denklem ifadeleri ile

ifade edilebilmeleri sayesinde kayma modülü değerlerinin koordinatlara bağlı sabitler şeklinde de ifade edilebileceği görülmüştür [12-13]. Bu arada da, deneysel çalışmalar ile de ağaç yapının burulma altındaki mekanik davranışları incelenmiştir [14-15]. Bu çalışmadan elde edilen kuadratik ve üstel ampirik ifadelerin, diferansiyel denklem ifadeleri ile verilmekte olan bünye denklemlerinde kullanılması ile C_{ij} sabitlerinin elde edilip edilemeyeceği ilerideki çalışmalarda test edilebilecektir.

Burulma deneylerinde, ortalama veya eşdeğer kayma gerilme-gerinim dağılımlarının elde edilmesinde aşağıdaki ifadeler kullanılmaktadır.

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{T}{J} r \quad (4)$$

$$\phi = \frac{TL}{JG} \quad (5)$$

Yukarıdaki Denklem (3)'de γ , τ , G sırasıyla kayma gerinimi, kayma gerilmesi ve kayma modülüdür. Denklem (4)'de T , J , r sırasıyla tork, kutupsal atalet momenti ve tork yüklemesi altındaki çubuğun yarı çap uzunluğudur. Denklem (5)'te ϕ ise L uzunluğundaki çubuğun yüklemeye yapılan ucunun, sabit ucuna göre olan dönme açısını belirtmektedir. Çalışmalar sırasında üzerinde deney yapılan sistem, SM21 [16] burulma cihazı ile birlikte (TDG) [17-18] ve ALMEMO 2590-9 veri toplama cihazlarının [19-20] ara çeyrek köprü bağlantı kabloları ile numunelere gerinim pullarına bağlanmaları ile oluşturulmuştur. SM21 burulma cihazı, numune üzerine uygulanan tork yükünü digital gösterge ile, ϕ dönme açısını ise sayaç değerleri ile vermektedir. Bu nedenle, her sayaç göstergesinin 0.3° dereceye tekabül ettiği dikkate alınarak; $\phi(\text{rad}) = (\text{sayaç değeri})(0.3^\circ)(\pi/180^\circ)$ şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, γ değerlerinin ϕ , L ve r cinsinden yazılması ile $\gamma_{\text{ort}} = \phi r / L$ eşitliği elde edilerek, her tork değerinin oluşturduğu kayma gerilmesine (τ_{ort}) karşılık oluşan kayma gerinimlerinin (γ_{ort}) eğrileri çizilmektedir.

Burulma probleminde, fiber kompozit yapılar için de Mohr dairesi yaklaşımının iki değişmezi olan I_1 ve I_2 cinsinden ifadeleri geçerlidir [21](Ek A, Denklem (A2)-(A4)). Bu durumda I_1 değişmezi, Mohr dairesinin merkezini ve I_2 değişmezi ise dairenin yarı çapını belirtmekte olup her ikisi de hem izotropik hem de fiber kompozit malzemeler için de geçerlidir. Böylece, maksimum kayma gerilmesi Mohr dairesinde $2\theta_p = 90^\circ$ açısı ile

gösterilmeye devam etmektedir. Ayrıca, burulma probleminde asal eksenlere göre $\sigma_1 = |\sigma_2| = \tau$ eşitliği de dikkate alınarak, orta eksene göre 45° açı ile dönmüş eksenlerde asal gerilmelere ulaşılabileceği açıktır. Denklem (6) ve (7) de görülen üç eksenli durumdaki ϵ_{asal} gerinim ifadeleri, [22] deneysel çalışmalardan elde edilen voltaj farkı ifadelerinde yerinde kullanılarak, γ birim kayma deformasyonunun ifadesi çıkarılmıştır.

$$\epsilon_{\text{asal}} = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu}{E} \sigma_2 \quad (6)$$

$$\epsilon_{\text{asal}} = \frac{\sigma_1(1+\nu)}{E} = \frac{\tau(1+\nu)}{E} \quad (7)$$

Fiber kompozit malzemeler için asal eksen olarak, fibere paralel yön için 1 ile, fibere dik iki düzlemdeki eksenler için ise 2 ve 3 doğrultuları ile gösterilmektedirler (Şekil 2). Mohr dairesine göre oluşmakta olan asal gerilmeler, maksimum kayma gerinimlerinin yarısı kadardır $\epsilon_{\text{asal}} = \gamma_{\text{mak}} / 2$. Bu ifade, ölçüm alınan 2-3 düzlemiyle çakışık durumdaki $r-\phi$ düzlemine göre aşağıdaki şekilde yazılacaktır.

$$\epsilon_{\text{asal}} = \frac{(\gamma_{23})_{\text{mak}}}{2} = \frac{(\gamma_{r\phi})_{\text{mak}}}{2} \quad (8)$$

Deneylerde tek yönlü KFG-5-120-C1-1, KFG-10-120-C1-1 ve KFG-10-120-D17 üç eksenli gerinim pulları [23] kullanılmıştır. Gerinim pulları ile ölçümleri gerçekleştirebilmek için yukarıdaki formülasyonun, veri toplama cihazlarından elde edilen v_0 voltaj fark değerinin, sinyal işleme devresinden gelen kazanç faktörü (GF: Gain Factor) ile yeniden tanımlanması gerekmektedir. Testler sırasında, iki ayrı veri toplama sistemi [17,19] kullanıldığı dikkate alınarak, ilgili eşitlikler, çalışma için hazırlanmış olan Excel veri tablosunda; voltaj farkı, sayaç ve tork değerleri girilerek, ortalama kayma modülü değerleri, $(\tau-\gamma)$ dağılımları otomatik olarak her deney için hazırlanmıştır.

Gerinim pullarından alınan voltaj farkı değerlerinin çeyrek köprü ile özel ara bağlantı kabloları üzerinde oluşturulması (TDG) [17-18] sağlanmıştır. ALMEMO 2590-9 veri toplama cihazı [19-20], 512Kb-100000 adet ölçülebilir değer saklayabilen hafızaya sahip, 9 kanal kapasiteli, 2 bilgisayar çıkışı soketine sahip bir cihazdır. ALMEMO veri toplama cihazına, $U=5V$ ve kazanç faktörü 10 olan EEPROM'lu birim deformasyon ölçümleri için kullanılan 9 ayrı, ZB 9060-K kod numaralı bağlantı soketlerinin ayrı ayrı ara bağlantı

kablolarına bağlanması ile ölçüm sistemi kurulmuştur (Şekil 3).

TDG veri toplama sisteminde ise gerinim pullarına bağlanan ara bağlantı kablolarının haberleşme birimine, oradan AI8a, 8 kanallı veri toplama birimine ve diz üstü bilgisayara bağlanması ile bağlantılar kurulmuştur (Şekil 4). Bu sisteme ait CoDA [17] veri toplama yazılım paketi ile veriler anlık değişen görüntülü ve grafiksel ekranda, voltaj farkları değerleri için toplanmıştır. Numunelerin nem oranları ise (%) olarak, mekanik nem ölçer [24] ile belirlenmiştir. Ölçülen voltaj farkı değerlerinin (ϵ) normal gerinim cinsinden yazılabilmesi için aşağıdaki ifadeler kullanılmaktadır [17,18];

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\epsilon_{\text{asal}}} \quad (9)$$

$$V_0 = -\frac{(GF)\epsilon_{\text{asal}}}{4} \left[\frac{1}{1 + (GF)\frac{\epsilon_{\text{asal}}}{2}} \right] V_i \text{ Gain (Volts)} \quad (10)$$

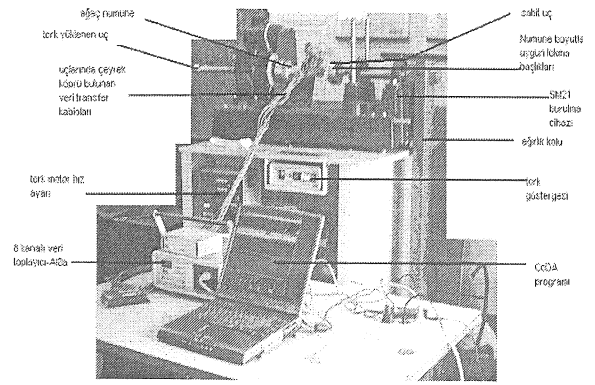
Tek puldan gelen bilginin doğru olarak gerinim bilgisine çevrilebilmesi için pulun kazanç faktörü (GF), köprü ikaz gerilimi (V_i) ve cihaza bağlı analog sinyal işleme devresi kazanç faktörünün tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Yapılan araştırmada kullanılan bu değerler; GF=2.1 (gerinim pulu direnci 120 Ω), $V_i = 2.00$ Volt [17,18], ve Gain=493,66 değerleri Denklem (10)'da yerleştirilir. Ayrıca, asal kayma gerinmesini tanımlayabilmek için de Denklem (8) ifadesi, Denklem (10) da yerine konulduğu zaman aşağıdaki voltaj farkına bağlı maksimum kayma deformasyon değeri için gerekli olan ve deneylerde kullanılan ifade bulunur.

$$\gamma_{\text{mak}} = -\frac{2V_0}{1.05V_0 + 1295.92} \quad (11)$$

Numuneler ve Burulma Deneyleri

Bu çalışmanın amacı, değişik tür ve geometrilerdeki ağaç numunelerin transverse izotropik fiber kompozit yapısı dikkate alınarak ($\tau-\gamma$) dağılım farklılıklarının belirlenmesi, aynı zamanda bu dağılımların numune yüzeylerinin belirlenen noktalarından alınmasıyla oluşmakta olan kayma modülündeki değişimlerinde bulunması şeklinde özetlenebilir [8]. Bununla beraber, bu değişimlere karşılık gelen ampirik ifadelerin de yazılıp yazılmayacağı test edilmiştir. Transvers izotropik malzemelere örnek gösterdiğimiz ağaç numuneler, eksenel simetri özelliği ile tanımlanmaktadırlar. Bununla beraber, numunenin ağaçtan kesilerek alındığı bölgede önem arz etmektedir. Hazırlanan numuneler, mümkün olduğunca kadar ağacın aynı bölgesinden ve ağaç

liflerinin paralelliğinin korunmasına dikkat edilerek hazırlanmış ve kullanılmıştır.



Şekil 4. Ağaç numune ve AI8a veri toplama sisteminin SM21 burulma cihazı ile bağlantı kabloları sayesinde bağlanmış durumu

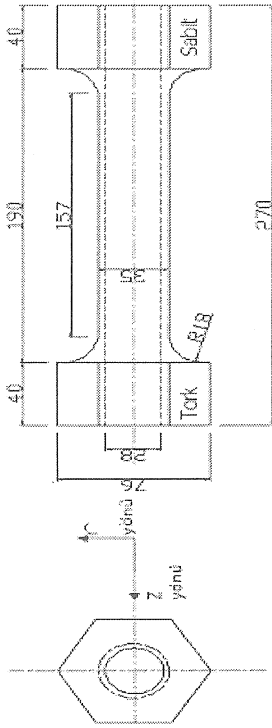
Gürgen (*Carpinus betulus*), sarı çam (*Pinus sylvestris*), meşe (*Quercus petraea ssp. iberica*), kestane (*Castanea dentata*) ağaç numuneler ilk olarak, ortalama eşdeğer kayma modülü ($G_{\text{ort,es}}$) değerlerinin daha sonra da gerinim pullarının kullanılması ile beraber, belirli koordinat noktaları üzerinden yapılan ölçümlerle elde edilen fonksiyonel (G_{fonk}) değerlerinin çıkarılması için, ayrı ayrı burulma yüklemesine maruz bırakılmışlardır. Sonuçlar, deney numaraları ile beraber, B(büyük), K(küçük), B(boş), D(dolu) numuneler, Ç(sarı çam), K(kestane), M(meşe) ve G(gürgen) tipi ağaçların baş harfleri kullanılarak "deney numarası-ağaç tipi-büyük/dolu/boş" sıralamasına göre kodlama yapılarak isimlendirilmiş olup, karşılaştırmalar buna göre kolaylıkla yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelerin boyutlandırılması [8], Şekil 5'de görüleceği üzere 270mm numune uzunluğu, 190mm test ölçüm uzunluğu, R18 eğrilik yarı çapı, 35mm ve 28mm sırasıyla dış ve iç çaplar alınmak suretiyle yapılmıştır [8,25]. Burulma yüklemesinde uygulanan burulma momenti, tork'u üreten motorun oluşturduğu maksimum hız olan 225 derece/dakika'ya karşılık gelen 7 değeri ile belirtilmekte olup, bütün deneyler (4-5) aralığında (≈ 145 derece/dakika) yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı laboratuvarın sıcaklığı 15-20 C° olup, numunelerin ortalama nem oranı 6-7% olarak ölçülmüştür.

DENEYSEL TESTLER VE DEĞERLENDİRME

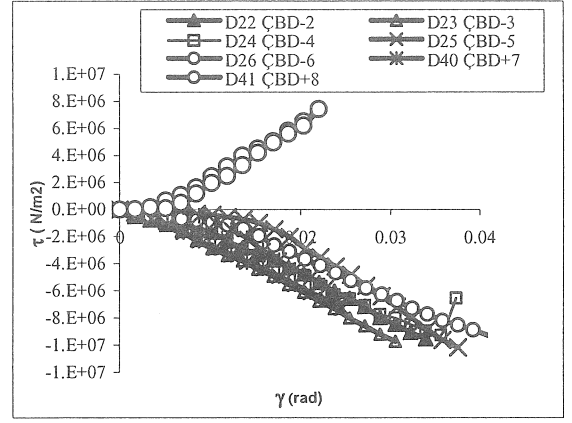
Ortalama Kayma Modüllerinin Belirlenmesi

Bu bölümde içi boş ve içi dolu, büyük boyutlardaki çam, gürgen, kestane ve meşe numunelerle yapılan testlerin sonuçları verilecektir.

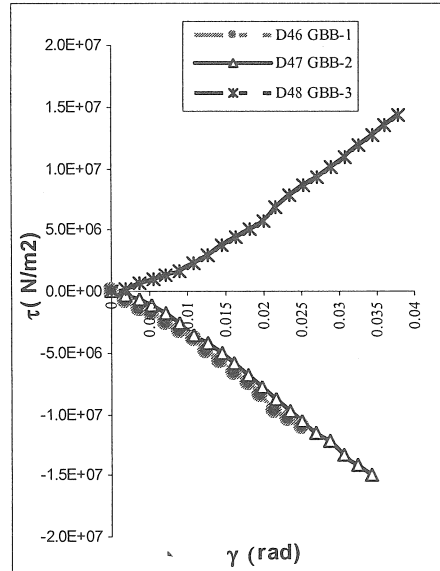
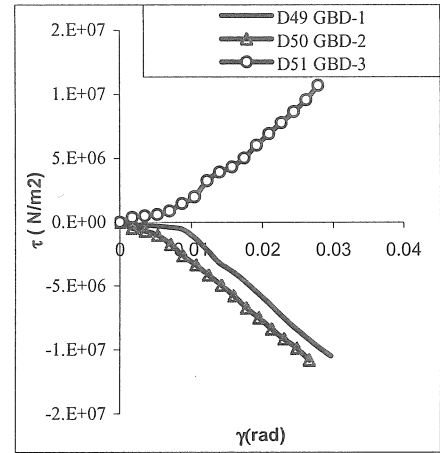
Şekil 6'de verilen eğride, çam numunelerin numaralandırmaları ile beraber 7 deneyin sonuçları gösterilmektedir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi yüklemelerden biri (+ α) yönlü iken, geri kalan altı yükleme (- α) yönlü olarak uygulanmıştır. Çalışmalar boyunca uygulanan burulma yükü, lif yönüne göre pozitif yönlü ise (+ α), lif yönüne ters yönlü ise (- α) işareti ile gösterilmiştir. Bu iki yükleme arasındaki malzemenin davranış farklılıkları, eğrilerde görülmektedir. Deneyler sırasında elde edilen pozitif yönlü yüklemeye ait (+ α) işaretli eğrilerde, numunenin kırılması relatif olarak çok daha büyük γ değerlerinde görülürken, ters yön işaretli (- α) yüklemelerde, numuneler çok daha düşük τ ve γ değerlerinde kırılmaktadırlar. Testlerden elde edilen $G_{ort,es}$ değerleri, Tablo 1' de verilmiştir. Pozitif yönlü (+ α) yüklemelerle elde edilen ortalama $G_{ort,es}$ değerlerinin (- α) yönlü olanlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. İçi dolu çam numunelerle yapılan deneylerde (+ α) yönlü yüklemeler daha yüksek $G_{ort,es}$ değerleri verirken, (- α) yönlü olanlar daha düşüktür (Şekil 6, Tablo 1).



Şekil 5. Değişik türlerdeki ağaç numunelerin geometrik boyutlandırmalarına (mm) ait teknik resim



Şekil 6. İçi dolu çam numunelere ait τ (N/m²) değerlerinin γ (rad) ile değişim eğrileri



Şekil 7. İçi dolu ve boş gürgen numunelere ait τ (N/m²) değerlerinin γ (rad) ile değişim eğrileri

Tablo 1. Değişik ağaç numunelerden gerinim pulu kullanılmadan elde edilen ortalama (eşdeğer) kayma modülü değerleri [8]

G _{ort.es} : Ortalama			G _{ort.es} : Ortalama		
No	Deney Kodu	Kayma Modülü (GPa) ve yüklenme yönü	No	Deney Kodu	Kayma Modülü (GPa) ve yüklenme yönü
1	D32ÇBB-6	0.349 (-α)	24	D54MBD-3	0.291 (-α)
2	D33ÇBB-7	0.464 (-α)	25	D55MBB-1	0.324 (+α)
3	D34ÇBB-8	0.270 (+α)	26	D56MBB-2	0.355 (+α)
4	D35ÇBB-9	0.325 (+α)	27	D57MBB-3	0.401 (-α)
5	D36ÇBB-10	0.343 (+α)	28	D58MBB-4	0.429 (-α)
6	D37ÇBB-11	0.405 (-α)	29	D59MBB-5	0.404 (+α)
7	D38ÇBB-12	0.379 (-α)	30	D60MBB-6	0.273 (+α)
8	D39ÇBB-13	0.321 (-α)	31	D61KBD-1	0.307 (+α)
9	D22ÇBD-2	0.288 (-α)	32	D62KBD-2	0.405 (+α)
10	D23ÇBD-3	0.324 (-α)	33	D63KBD-3	0.310 (+α)
11	D24ÇBD-4	0.259 (-α)	34	D64KBD-4	0.359 (+α)
12	D25ÇBD-5	0.284 (-α)	35	D10KBB-1	0.210 (-α)
13	D26ÇBD-6	0.248 (-α)	36	D21KBB-2	0.469 (-α)
14	D40ÇBD-7	0.299 (-α)	37	D27KBB-3	0.453 (+α)
15	D41ÇBD-8	0.344 (+α)	38	D28KBB-4	0.405 (-α)
16	D49GBD-1	0.387 (-α)	39	D29KBB-5	0.308 (+α)
17	D50GBD-2	0.425 (-α)	40	D30KBB-6	0.392 (+α)
18	D51GBD-3	0.392 (+α)	41	D31KBB-7	0.396 (-α)
19	D46GBB-1	0.457 (-α)	42	D11ÇBB-1	0.168 (+α)
20	D47GBB-2	0.464 (-α)	43	D12ÇBB-2	0.191 (+α)
21	D48GBB-3	0.397 (+α)	44	D13ÇBB-3	0.142 (+α)
22	D52MBD-1	0.473 (+α)	45	D32ÇBB-6	0.349 (+α)
23	D53MBD-2	0.427 (+α)	46	D33ÇBB-7	0.464 (+α)

Şekil 7 ile verilen eğrilerde sırasıyla önce gürgen büyük dolu (GBD) numunelere, daha sonra da gürgen büyük boş (GBB) numunelere ait deneylerin ortalama sonuçlarına ait dağılımlar görülmektedir. İçi boş numunelerin, G_{ort} modülü değerleri Tablo 1'de görüldüğü gibi (+α) yüklemesi için (-α) 'ya göre daha düşük değerlerde bulunmaktadır. İçi dolu numunelerde ise, tam ters olarak (+α) için büyük G_{ort} değerleri bulunurken, (-α) için ise küçük G_{ort} değerleri elde edilmiştir.

Şekil 8 ile verilen verilerde meşe ağaçlarına göre elde edilen sonuçlar doğrusal olmayan eğrileriyle birlikte sırasıyla verilmektedir. Ağaç malzeme genellikle doğrusal olmayan elastik davranış göstermektedir. Bu nedenle, kayma modülü hesaplamaları (τ-γ) eğrilerinin doğrusallaştığı belirli bölgelerinden alınarak bulunabilmektedir [14-15]. Meşe ağacına ait dolu numunelerde, (+α) yönlü yüklemelerde, (-α) yönlü olanlara göre daha büyük G_{ort} değeri bulunurken, içi boş olanlarda, (-α)

yönlüler (+ α) olanlara daha büyük değerler vermektedir. Bu nedenle, aynı γ değeri için $\tau(+\alpha) > \tau(-\alpha)$ ifadesi tanımlanabilir. Dolu numunelerde aynı γ değeri için $G(+\alpha) > G(-\alpha)$, içi boş olanlar için ise $G(+\alpha) < G(-\alpha)$ ve $\tau(+\alpha) < \tau(-\alpha)$ şeklindeki ifadeleri görülecektir. Ayrıca, içi boş numuneye ait eğrilerden görüldüğü gibi, D57, D58, D59 ve D60 deneylerine ait ($\tau-\gamma$) dağılımları yaklaşık olarak $\tau=1.5E+07N/m^2$ değerine D55 ve D56 tekrarlanan yüklemelerinden sonra geldikleri için kalıcı deformasyon göstermektedirler. Tekrarlanan yüklemeler ve kalıcı deformasyonlara ait bulunan çalışma sonuçları bu konu başlığında yer almaması nedeniyle ilerideki çalışmalarımızda anlatılacaktır.

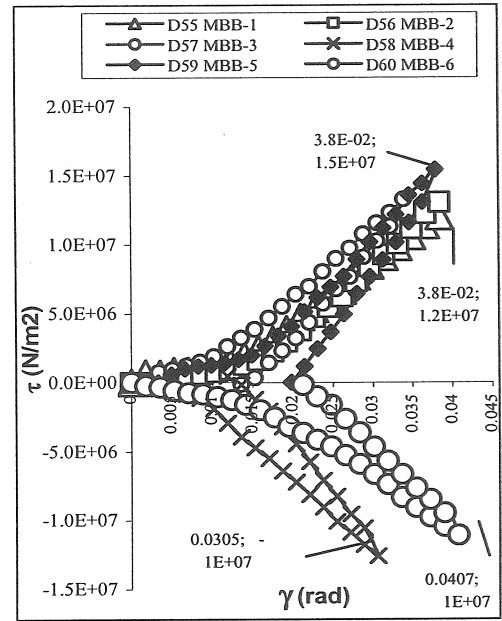
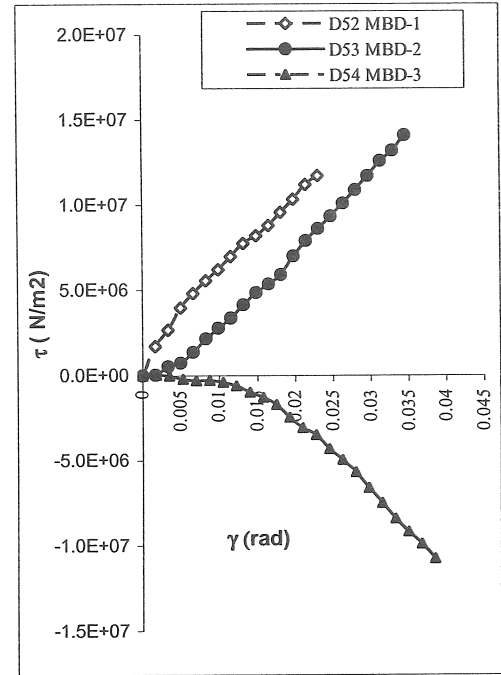
Kestane ağacından hazırlanmış numunelerden dolu ve içi boş olanların testlerinden (+ α), (- α) yönlerine ait olan sonuç eğrileri Şekil 9 ile verilmektedir. İçi dolu aynı numuneye ait eğrilerden görüldüğü gibi, D61, D62, D63 ve D64 deneylerinden ilk uygulanan D61 deneyinde, ($\tau-\gamma$) dağılımı yaklaşık olarak $\tau=1.1E+07N/m^2$ değerine ulaşmış ve kalıcı deformasyon göstermiştir. Aynı numune üzerinde yapılan diğer deneyler ise; D62, D63, D64 ile tekrarlanan yüklemeler altında daha önceki uygulamaların da etkilerini taşıdığı için kalıcı deformasyon göstermeye devam etmişlerdir.

Bunlara ek olarak, Şekil 9'a ait ilk eğride, yüklenme ve yüklemenin boşaltılması sonucu oluşan kalıntı γ değerleri görülmektedir. Yine diğer ağaç çeşitlerindeki numunelerle yapılmış deney sonuçlarına ortalama kayma modülü açısından bakıldığında, genel olarak dolu olanlarda $G_{ort}(+\alpha) > G_{ort}(-\alpha)$ ve içi boş olanlarda $G(-\alpha) > G(+\alpha)$ karşılaştırmaları görülmektedir [8].

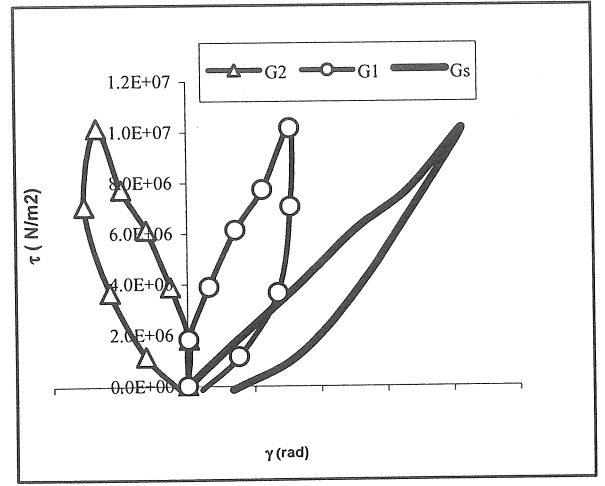
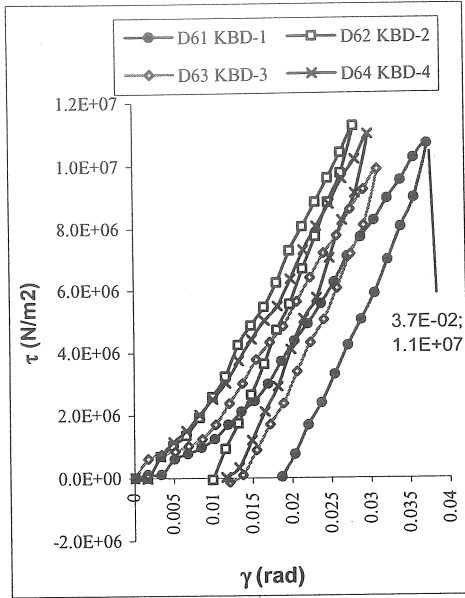
Koordinat Tanımlı Kayma Modülü Değerlerinin Belirlenmesi

Belirli noktalara yerleştirilen gerinim pullarıyla, yönler bağli olarak elde edilen gerinim değerleri, bu bölümde ayrıntılı olarak verilmektedir. Şekil 10, içi boş kestane numunesinin orta koordinat noktasındaki üst yüzeyine, z-eksenine göre $\theta' = 0^\circ, 135^\circ$ açılarıyla yerleştirilen iki gerinim pulu ile elde edilen değerlere ek olarak ($\tau-\gamma$)_{ort} dağılımlarını da göstermektedir. Numune üzerindeki ortalama ($\tau-\gamma$) değerleri koyu sürekli çizgi ile (G_s) gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi G1 gerinim pulu doğrultusundaki (+45°) lifler çekme gerilmeleri altındayken, G2 yönlüler (+135° veya -45°) basma gerilmeleri altında kalmaktadırlar. Diğer bir deyişle, fiziksel olarak fiber

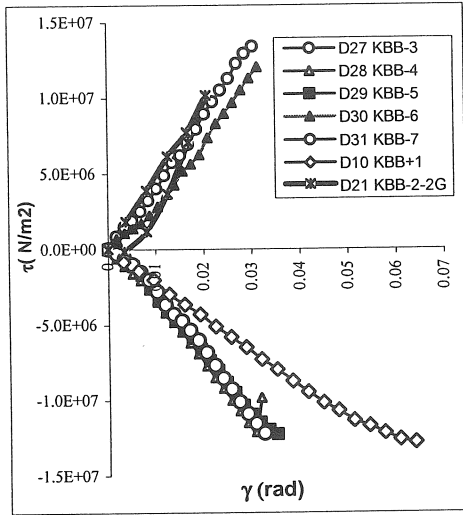
G1 yönündeyse, fiberin içinde bulunduğu matris malzeme G1 yönüne dik konumda daralma göstermektedir.



Şekil 8. İçi dolu ve boş meşe numunelere ait $\tau(N/m^2)$ değerlerinin γ (rad) ile değişimi

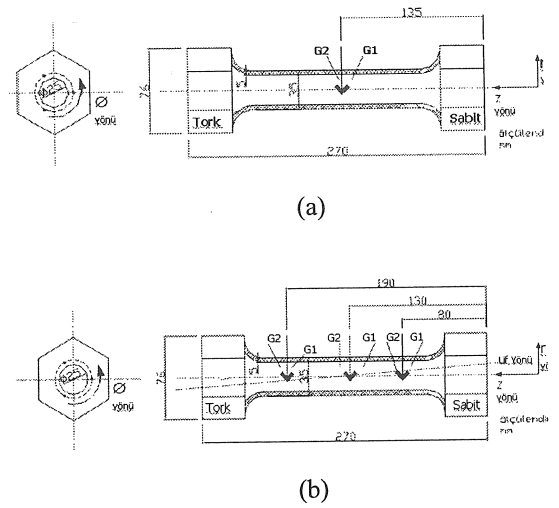


Şekil 10. D-21 kodlu deneyde iki gerinim pullu içi boş kestane numunesinin, birinci ve ikinci gerinim kullarından okunan değerler ile hesaplanan τ (N/m²) değerlerinin γ (rad) ile değişim eğrileri (Şekil 11)

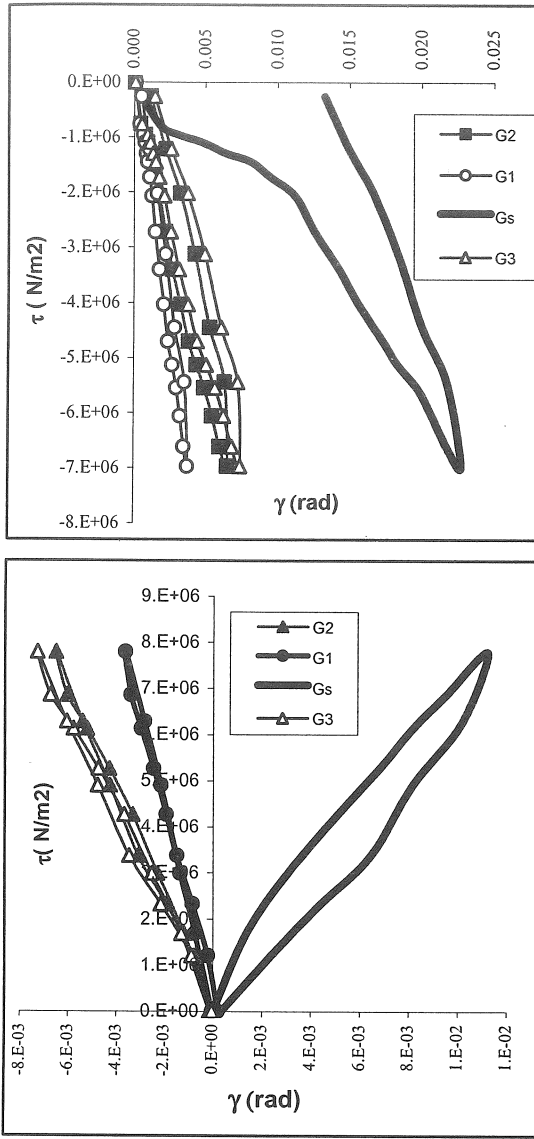


Şekil 9. İçi dolu ve boş kestane numunelere ait τ (N/m²) değerlerinin γ (rad) ile değişimi

Şekil 11'deki çam ağacından yapılmış numunelerin boyutlandırılmış teknik resimlerinden de görüleceği üzere, orta eksenle 45° ve 135° açılar yapacak şekilde yapıştırılmışlardır. Aynı numune önce lif yönüne paralel, daha sonra da lif yönüne dik yönlerde kayma gerilmeleri oluşturacak şekilde tork yüklemesi altında bırakılmışlardır. Şekil 12'deki koyu kalın sürekli çizgi, numunenin ortalama kayma gerilme-gerinim dağılımlarının Denklem(1-3) ifadelerinden elde edilerek çizilen grafiğidir (Tablo 1).



Şekil 11.a) D21 numaralı deneylerde kullanılan içi boş kestane numunesi ile yatay eksenle 45° ve 135°'lik açı yapan 2 adet gerinim pulunun konumları b) D42, D43, D44, D45 numaralı deneylerde kullanılan içi boş çam numunesi ile yatay eksenle 45° ve 135°'lik açı yapan 6 adet gerinim pulunun konumları



Şekil 12. D-22 numaralı deneyde geri ve ileri tork ($-\alpha/+ \alpha$) yükleme yönleriyle, içi boş çam numunesinden lif yönüne paralel ve dik yönlerden gerinim pulları ile elde edilen değerlerin, ortalama değer (G_s) ile karşılaştırıldığı $\tau(N/m^2)$ - γ (rad) eğrileri

Lif Yönüne Paralel Gerinim Ölçümleri

Bu gruptaki çalışmalarda, ağaç numunelerin lif doğrultularında, gerinim pullarının yapıştırılmaları ile elde edilmiş $(\tau-\gamma)_{\text{nokta}}$ eğrileri ve kayma modüllerinin değerlerindeki değişimler grafikler ile özetlenmektedir.

Şekil 13'de, 5 gerinim pulu ile içi boş gürgen numuneden elde edilen ölçümlerin eğrisel gösterimlerini vermektedir. Şekil 14 ise 6 gerinim pulu ile kestane ağaç numunesinden elde edilen ölçüm sonuçlarını vermektedir.

Şekil 14'de, AI8a ve ALMEMO iki farklı veri toplama sistemi ile elde edilen, aynı boş kestane numunesinin tekrarlanmış deney sonuçlarını vermektedir. Bu deneylerden elde edilen G_{nokta} kayma modülü değerleri Tablo 2 ile verilmektedir.

Tablo 3, kestane, gürgen ve çam numunelerine yapıştırılan 4, 5, 6 ve 7 adet gerinim pullarından alınan kayma modülü değerlerine ait sonuç değerleri özetlemektedir. Tabloda, karartılmış bölge olarak gösterilen kısım, iç yüzeyden alınan verilere karşılık gelen değerleri içermektedir. Her numunenin ağaç lif yapıları aynı olmadığı için değerlerde sapmalar görülebilmektedir. Tabloda, ayrıca genellikle dış yüzeye ait kayma modülü değerlerinin, iç yüzeydekilere göre daha küçük olduğu görülmektedir.

Tablo 4, kestane ağacına ait dört adet burulma numunesinden, belirli z, ϕ koordinat eksenleri boyunca alınan değerleri göstermektedir. Numuneler üzerinde z koordinatları boyunca her dört grup değeri için, standart hata değeri de hesaplanmıştır. Bu değer, z koordinatları boyunca elde edilen G kayma modülü değerlerinin değişimini gösteren ikinci mertebeden kuadratik eğriler için hesaplanarak verilmiştir [8-9].

Tablo 2. TDG A81a, ALMEMO 2590-9 veri toplama cihazlarının kullanılması ile aynı numuneye ve değişik sayılardaki gerinim pulları ile elde edilen kayma modülü değerleri [8]

Dene y Kod u	G_{ort} (GPa)	G_{1G} (GPa)	G_{2G} (GPa)	G_{3G} (GPa)	G_{4G} (GPa)	G_{5G-k} (GPa)	G_{6G-k} (GPa)	G_{7G-k} (GPa)
AD3-d-KBB-7G	0.462	0.667	1.65	0.874	5.77	8.57	5.63	14.0
AD3-e-KBB-7G	0.462	0.869	0.074	0.767	1.37	5.95	22.6	18.4

Tablo 3. İçi boş değişik burulma numunelerine 4, 5, ve 7 adet gerinim pullarının $\theta' = 0$ açısına göre yerleştirilmesiyle elde edilen kayma modülü değerleri

Dene y Kod u	$G_{\text{ort}} (\sigma)$	G_{1G-k} (GPa)	G_{2G-k} (GPa)	G_{3G-k} (GPa)	G_{4G-k} (GPa)	G_{5G-k} (GPa)	G_{6G-k} (GPa)	G_{7G-k} (GPa)	Dene y-Grup Ortalaması	Standar Sapma
AD1-a-KBB-4G	0.484	0.557	-	-	-	0.194	0.279	-	0.34	0.19
AD2-a-GBB-5G	0.539	0.543	2.08	3.40	-	4.71	3.24	-	2.79	1.57
AD3-a-KBB-6G	0.450	30.4	22.0	4.56	8.32	5.65	5.65	-	6.05	1.60
AD3-b-KBB-6G	0.217	1.57	1.21	0.930	1.49	6.71	1.44	-	2.23	2.27
AD3-c-KBB-7G	0.598	12.7	22.3	3.62	37.8	10.9	5.36	74.9	25.32	23.94
AD3-e-KBB-7G	0.462	0.667	1.65	0.874	5.77	8.57	5.63	14.0	5.31	4.85
AD4-a-CBB-6G	0.404	3.46	9.03	8.33	0.536	1.05	-	34.2	4.48	3.99

Tablo 4. Kestane içi boş numunelerine $\theta' = 0$ lif yönünde yapıştırılan gerinim pulları ile yapılan ölçümlere göre hesaplanan kayma modülü değerleri ve hata yüzdeleri [8,26]

Deney Koşu ve Gerinim Pulu Numaraları	z-koordinatı (mm)	ϕ -koordinatı (derece)	G_{ϕ} (GPa)	Deney Koşu ve Gerinim Pulu Numaraları	z-koordinatı (mm)	ϕ -koordinatı (derece)	G_{ϕ} (GPa)
AD3-a-ABB-6G			(Standart Hata ($z=200$); 4.519)	AD3-b-KBB-7G			(Standart Hata ($z=72$); 0.219)
G-1	200	0	30.4	G-7	72	0	1.57
G-2	200	65.04	25.0	G-8	72	121.89	1.21
G-3	200	182.73	4.56	G-9	72	229.19	0.93
G-4	200	229.19	8.32	G-10	72	300.42	1.49
G-5	133	6.19	5.65	G-5	133	6.19	6.71
G-6	133	185.82	1.71	G-6	133	185.82	1.44
AD3-c-KBB-7G			(Standart Hata ($z=200$); 21.47)	AD3-d-KBB-7G			(Standart Hata ($z=72$); 2.123)
G-1	200	0	12.7	G-7	72	0	0.67
G-2	200	65.04	22.3	G-8	72	121.89	1.65
G-3	200	182.73	3.62	G-9	72	229.19	0.87
G-4	200	229.19	37.8	G-10	72	300.42	5.77
G-14	210	4	10.9	G-14	65	41.94	8.57
G-24	210	108.40	5.36	G-24	65	123.88	5.63
G-34	210	139.37	74.9	G-34	65	185.82	14.0

Gerinim Pulları ile Asal Yönlere Göre Ölçümler

Bu grup deneysel çalışmalarda, gerinim pulları ağaç lif yönleri ile 45° açı oluşturacak şekilde yapıştırılarak ölçümler yapılmıştır. Böylece, asal yönler için Denklem (6-11) ifadeleri kullanılarak, normal yönlü birim deformasyon değerleri, kayma birim deformasyona dönüştürülmüştür. Değerler r, z ve ϕ yönlü olmak üzere, 3 ayrı alt grup halinde ele alınmıştır. Bu aşamada ifade edilen z bağımlı bütün fonksiyon tanımlamaları kolaylık olması amacıyla kısaca z ile gösterilmiştir.

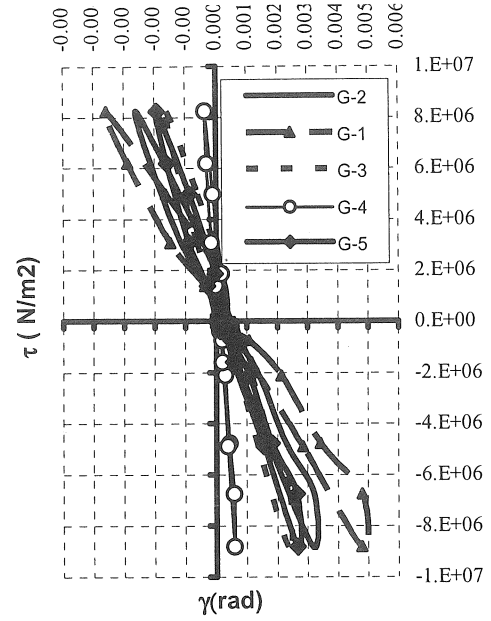
Çizilen $(\tau-\gamma)_{\text{nokta}}$ koordinat bağımlı eğrilerin eğimlerinden elde edilen kayma modülü değerlerinin değişimlerinin çıkarımları, r, z, ϕ yönleri boyunca çizilen eğriler yardımıyla gösterimleri sağlanırken, fonksiyonel ifadeleri de Excel programından yararlanılarak elde edilmiştir.

Şekil 16 ve 17, ϕ açısının belirlenen $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ değerlerinde, numunenin dış yüzeyine yapıştırılan gerinim pullarından alınan bilgilere göre elde edilen $G(\phi)$ grafiğini vermektedir. Burada yaklaşık olarak kuadratik ve üstel fonksiyonlar ile verilmekte olan eğri ifadeleri, yalnızca belirtilen eğri yüzeyleri için geçerlidir. Eğrilerin periodik fonksiyonlar ile tekrarlanması beklenmemektedir. İç yüzeyden, yine aynı açılarda alınan bilgiler Şekil 18 ile verilmektedir. Şekil 19'da ise, bu iki grafiğin bir arada gösterimleri ile karşılıklı değişimleri gözlemlenmektedir.

Şekil 20'de yarıçap- r boyunca çam numunenin iç ve dış yüzeylerinden elde edilen ölçümlere göre çizilmiş G doğrularının değişim eğrileri ampirik ifadelerle birlikte verilmektedir. ϕ

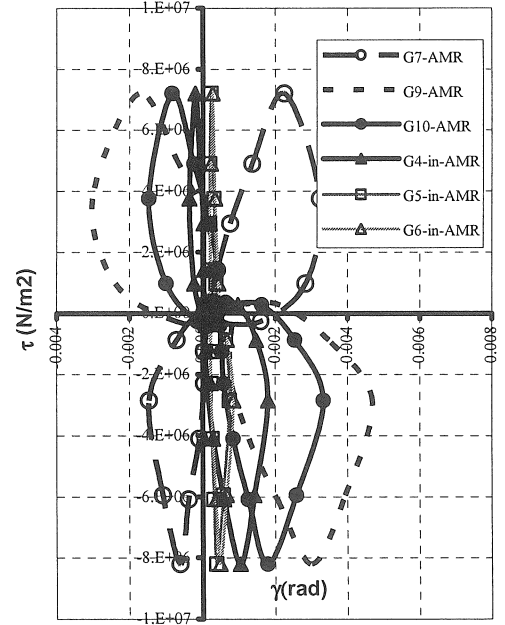
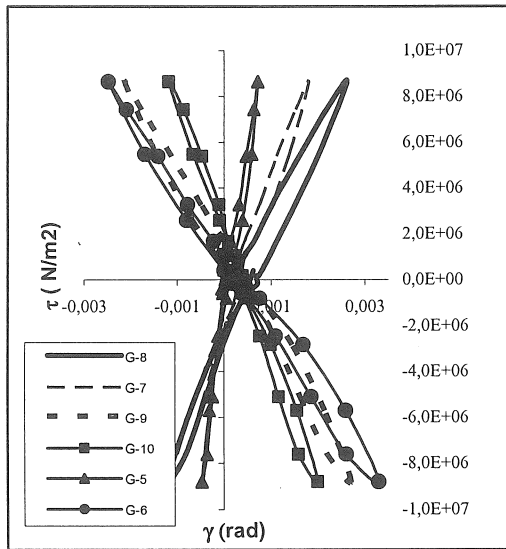
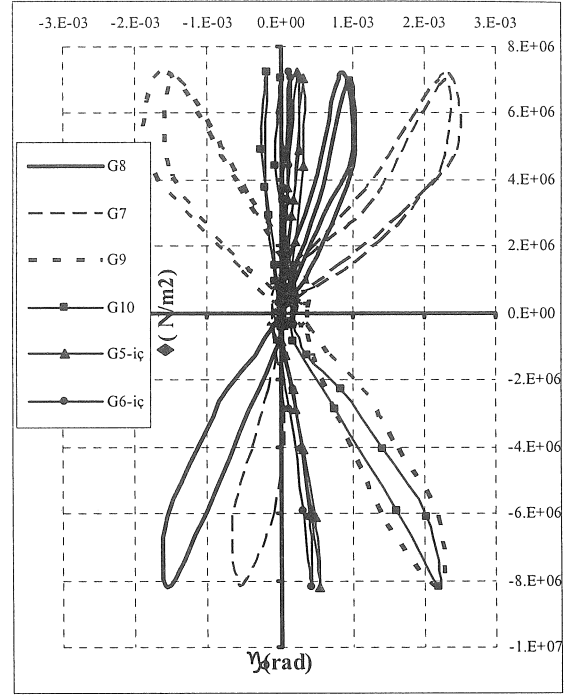
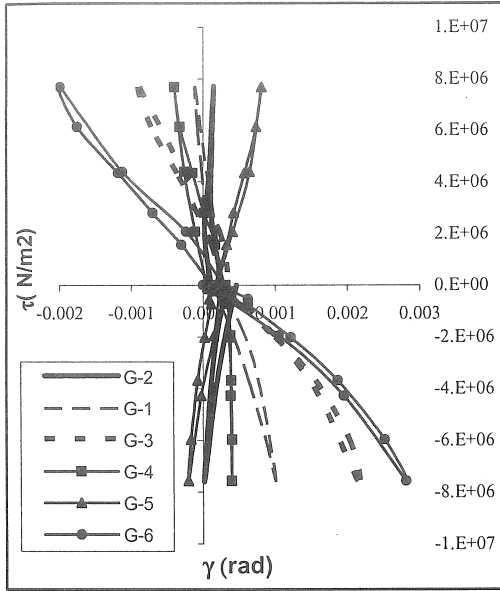
yönünde $0^\circ, 120^\circ$ ve 240° 'ye karşılık gelen numunenin sabit ucuna yapıştırılmış pullardan elde edilen değerlerin lineer dağılımları, G1, G2, G3 gerinim pulu sıralamasına göre eğim farklılıklarıyla beraber görülmektedir.

Şekil 21, burulma momentinin uygulandığı kenardaki (Ek C: şekillerde sol kenar), yine aynı açılarda yüzeye yapıştırılmış gerinim pullarından alınan bilgilerin değişim eğrilerinin toplam şeklidir.



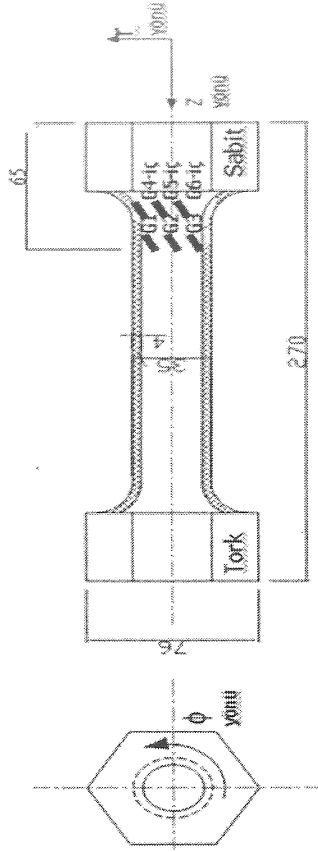
Şekil 13. AD2-a-GBB-5G numaralı deneydeki içi boş gürgen numunesine için τ (N/m²)- γ (rad) eğrileri (Ek C-Şekil C1)

Şekil 22 ve 23, çam numunelerin $G(z)$ fonksiyonlarının z koordinatına bağlı elde edilen kuadratik değişimlerini lif yönünde birbirlerine paralel olarak dizilmiş gerinim pullarından ölçülen değerlerine, önce $z = 65, 117, 157, 200$ (mm)'de daha sonra da $z = 65, 110, 155, 200$ (mm) koordinatlarında göstermektedir. Şekil 22 ve 23, çam numunelere ait $G(z)-z$ eğrileri 4 noktadan geçen ortak eğim çizgilerinin gösterilmesiyle de ifade edilmeye çalışılmıştır.

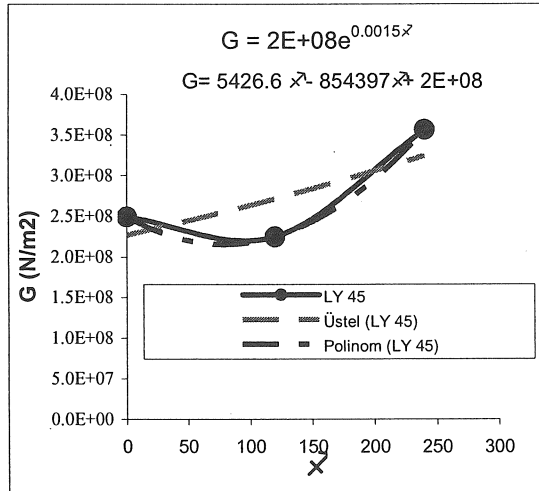


Şekil 14. AD3-a-KBB-6G ve AD3-b-KBB-6G numaralı deneylere ait içi boş kestane numunelerine ait τ (N/m²)- γ (rad) eğrileri (Ek C-Şekil C2-C3)

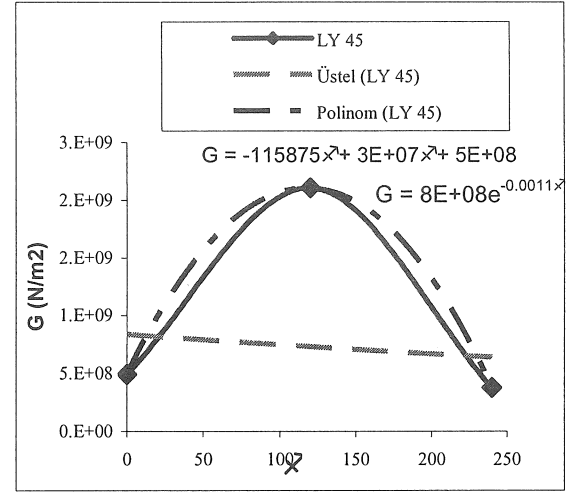
Şekil 15. AD3-e-KBB-6G numaralı deneyde tekrarlanan yükler altındaki içi boş kestane numunesinden, TDG, ALMEMO veri toplama cihazları ve gerinim pulları yardımı ile aynı numunedan oluşturulan τ (N/m²)- γ (rad) eğrileri (Ek C-Şekil C4)



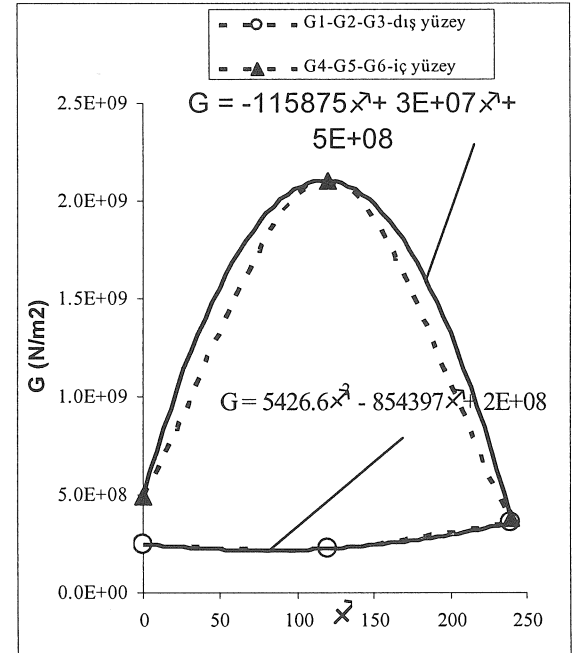
Şekil 16. İçi boş AD9-a-ÇBB çam numunesine yapıştırılmış gerinim pullarının görünümü



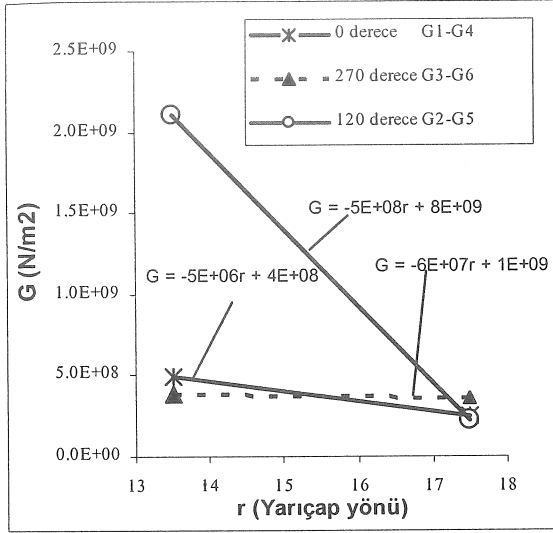
Şekil 17. AD9-a-ÇBB numunesi üzerinde bulunan G1-G2-G3 gerinim pullarına ait $G(\phi)$ -kayma modülü fonksiyonunun ϕ koordinat değerine bağlı değişimi



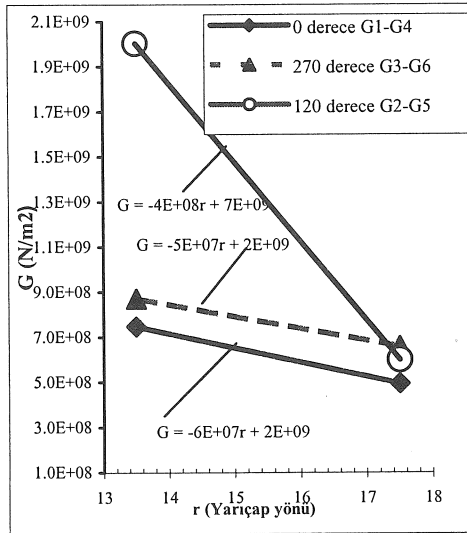
Şekil 18. AD9-a-ÇBB numunesi iç yüzeyinde bulunan G4-G5-G6 gerinim pullarına ait $G(\phi)$ kayma modülü fonksiyonunun ϕ koordinat değerine bağlı değişimi



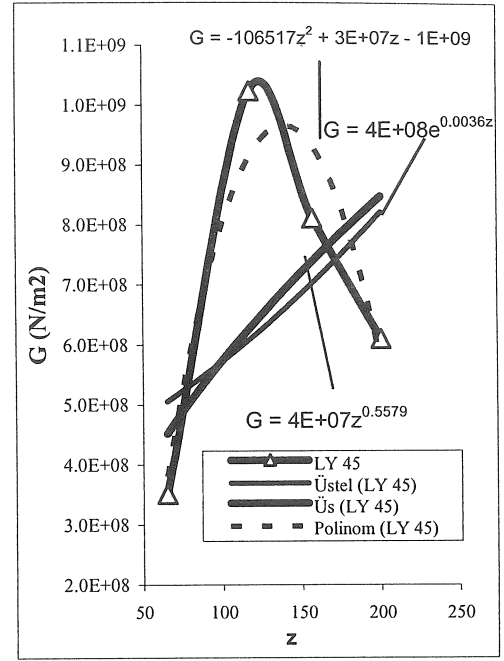
Şekil 19. AD9-a-ÇBB numunesinde iç ve dış yüzeylerinde bulunan gerinim pullarına ait $G(\phi)$ kayma modülü fonksiyonunun ϕ koordinat değerine bağlı değişimi



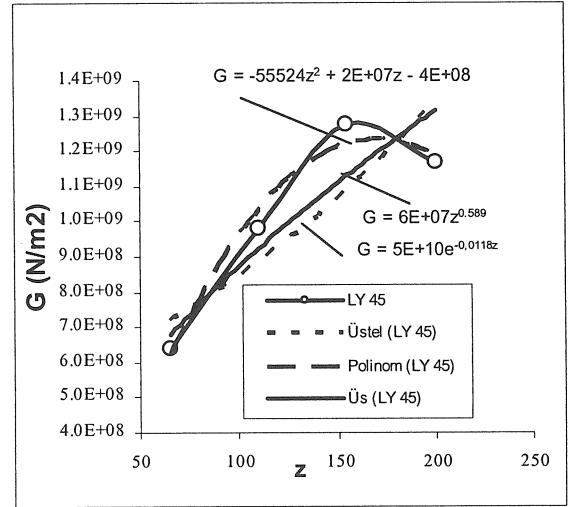
Şekil 20. AD9-a-ÇBB numunesinde iç ve dış yüzeylerine belirli ϕ aralıklarıyla yapıştırılmış olan gerinim pullarından alınan değerlerin r yarıçap doğrultusuna bağlı $G(r)$ değişimi



Şekil 21. AD9-b-ÇBB numunesinde iç ve dış yüzeylere belirli ϕ açısız aralıklarıyla yapıştırılmış olan gerinim pullarından alınan τ ve γ değerlerinden elde edilen $G(r)$ değişim (Ek C-Şekil C5)



Şekil 22. $G(z)$ - z eğrisinin, AD7-b-d-c ÇBB numunesi üzerinde, gerinim pullarının ana eksen üzerindeki $z = (65,117,157,200)$ mm konumlarında yerleştirilmesi ile oluşturduğu üstel, üs ve polinom ifadeleri ile gösterimleri (Şekil C6)



Şekil 23. $G(z)$ - z eğrisinin, AD7-a-ÇBB numunesi üzerinde, gerinim pullarının $z = (65,110,155,200)$ mm konumlarında yerleştirilmesi ile üstel, polinom ve üs eğri denklemleri ile gösterimleri (Şekil C6)

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmamızda, dairesel kesitli yanal izotrop fiber kompozit yapıya sahip değişik ağaç numuneler burulma yüklemesi altında bırakılarak, malzemenin bu yüklemeye karşı gösterdiği tepkiler kayma modülü değer değişimlerinin kayma gerilme-gerinim ($\tau-\gamma$) dağılımları içindeki değerlerine göre incelenmeye çalışılmıştır. Bütün deneysel veriler tablo ve eğriler ile verilmektedir [8]. Belirlenen sonuçlar aşağıdaki basamaklarda kısaca özetlenmiştir.

1- Ağaç malzemenin belirli bir kayma gerilme değerine kadar yüklendiği durumda kayma gerilme-gerinim ($\tau-\gamma$) eğrisinin elastik doğrusal olmayan dağılım göstermesidir. Verilerin belirli bir yük değerini aştıktan sonra ise yine doğrusal olmayan aynı yolu takip ettiği görülmektedir. Yükleme gerinin geri alınması durumunda ise doğrusal olmayan fakat simetrik olarak oluşan geri dönüş yolu izlenmektedir. Sonuçta ise, kalıcı kayma gerinim değeri ($\tau-\gamma$) eğrisinde görülmektedir. İleri ve geri yüklemelere ait bu iki eğri arasında kalan alan, malzemede oluşan toplam potansiyel enerjiye karşılık gelmektedir.

2- Ağaç malzemenin kayma modülünün tek bir ortalama değer yerine, ağaç yapının iç ve dış yüzeyleri üzerindeki koordinatlara bağlı değişimlerinin ifade edildiği fonksiyonlar ile tanımlanabilmesidir. Gerinim pulları yalnızca yüzeylere yapıştırılabildiği için veriler yalnızca yüzeylerden toplanabilmektedir ve böylece mühendislikte bu problem hem düzlemsel gerilme hem de düzlemsel gerinme problemi olarak tanımlanmaktadır. Elde edilen fonksiyonlar silindirik koordinat sisteminin üç yönü ile tanımlıdır; yarıçap yönü r , dairesel kesit boyunca çevresel yön ϕ ve ana dönme eksenini z . Böylece kayma modülü G 'nin üç ayrı fonksiyon ile tanımlanması ile burulma numunesi üzerinde üç boyutlu bir dağılımın tanımlanmasının da mümkün olabileceği görülmüştür; yarıçap yönlü $G(r)$, dairesel kesit boyunca çevresel yönlü $G(\phi)$ ve ana dönme eksenini yönlü $G(z)$.

3- Kayma modülü fonksiyonlarından yarıçap yönlü olan $G(r)$ 'in hep iki koordinat noktası arasında çizilebildiği için ($r_{iç} - r_{dış}$) bir doğru denklemi ile gösterilebildiği, dairesel kesit boyunca çevresel yönlü $G(\phi)$ ve ana dönme eksenini yönlü $G(z)$ elde edilen fonksiyonların ise üst, üstel ve kuadratik fonksiyonlar ile gösterilebildiği (Ek B, Tablo B1) anlaşılmıştır. ϕ ve z yönlü kayma modülü veri dağılımlarına bakıldığı zaman ise kuadratik yerine kübik fonksiyonların da tanımlanabilirliği görülmüştür. Elde edilen fonksiyonlar, tekrarlanan yapıda olmayıp yalnızca, çubuk üzerinde belirlenen bölgelerde geçerlidirler. Fakat ilgili problemin bünye

denklemlerinin kısmi türevler cinsinden ifade edilmesine baktığımızda [12-13], en yüksek mertebedeki türevli ifadenin 2. mertebeden olduğu düşünülerek, bu çalışmadaki fonksiyonlar 2. mertebeden seçilmiştir. Böylece, bu fonksiyonlar sayesinde genel Hooke kanununa ait Denklem (1) ve (2) içerisinde bulunan bilinmeyen elastik sabit katsayılarının C_{ij} bulunması ileriki çalışmalarla mümkün olabilecektir.

4- İçi dolu ve boş numuneler arasındaki belirli bir gerilme τ değerinden sonra oluşan davranış farklılıklarının ($\tau-\gamma$) eğrilerindeki eğimlerden elde edilebileceği görülmüştür. Ağaç malzemelerin lifli yapılarına bağlı olarak, uygulanan tork yüklemesinin yönünün, malzemenin tepkisi olarak değerlendirilmesi ($\tau-\gamma$) gerekliliği ve bu eğrilerin eğim açısı değişimlerinin de yarattığı etkisi bu probleme ayrı bir önem kazandırmaktadır. Böylece, transvers izotrop malzemelerin yüklemeye tarzına göre değişimlerinin daha detaylı analizlerinin ileriki çalışmalarda yapılabileceği görülmüştür [15].

5- Değişik ağaç numunelerinden elde edilen ortalama kayma modülü değerinin 0.2-0.6 GPa değerleri arasında değişirken, koordinatlara bağlı bulunan değerlerin ise 0.2-8.0 GPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Gerinim pulları ile yapılan koordinat bağımlı ölçümlerde, kayma modülü G değerlerinin ortalama değerlerine göre daha çok sapma göstermesi, malzemede homojen olmayan gerilme ve gerinme dağılımlarıyla açıklanabilir. Diğer bir deyişle gerinme değerleri arasındaki etkileşimler bu durumu ortaya çıkarmaktadır.

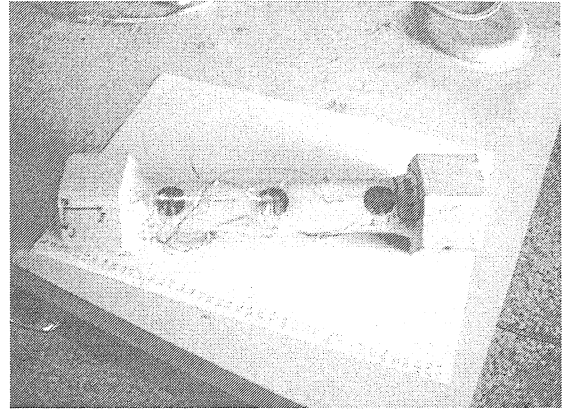
6- Koordinata bağlı ($\tau-\gamma$) eğrilerinin ve dolayısıyla G kayma modülü değerlerinin sabit ve tork yüklenen uçlara göre farklılık gösterdiği şeklinde açıklanabilir. Genellikle, $G_{yüklemeye-ucu} < G_{sabit-ucu}$ eşitsizliği görülmektedir. Böylece $\gamma_{yüklemeye-ucu} > \gamma_{sabit-ucu}$ olacaktır (Şekil 22-23).

7- Literatürde bulunan Yoshihara vd. [27], Saliklis vd. [5-6] ve Kubojima vd. [28]'nin çalışmalarındaki sonuçları inceleyerek verebiliriz. Literatürde verilmekte olan ilk dört kaynağa mikro düzeyde yapılan diğer çalışma örnekleri ve teknikleri verilmektedir [1, 2, 3, 4]. Literatürde, ağaç malzeme fiber kompozit yapı olarak kabul edilmiş ve kayma gerilmesi ile ilgili veriler çok eksenli çekme deneyleri [27] veya Iosipescu kayma testlerinin düz ince dikdörtgen kesitli çubuklar üzerinde uygulanması ile elde edilmiştir. Mack [25]'in çalışması dışında, ince duvarlı prizmatik çubukların homojen olmayan malzemelerden imal edilerek burulma altındaki kayma modülü fonksiyonlarının koordinat bağımlı ifadelerinin çıkarımlarını Stokes [29] yapmıştır. Ayrıca Yoshihara [27] vd., G_{LR}, G_{LT} kayma modülü değerlerini (Ek A, Denklem (A5), (A6)) deneysel çalışmalardan alınan verilerle yakınsayan seri

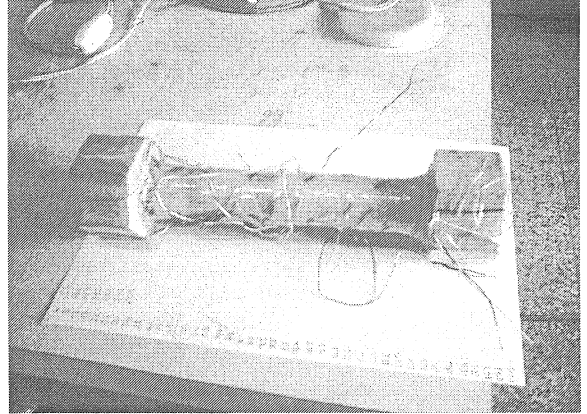
açılımlarda kullanılmasıyla iterasyonlar sonucu bulmaktadırlar. Koordinat bağımlı fonksiyonların tanımlamaları üzerinde Saliklis [5,6] $E(\theta), G(\theta)$ elastik ve kayma modüllerini θ 'ya bağlı olarak [30] ağaç paneller için ve daha sonra ise G_{12} değerini deneysel formülasyondan elde ederek kağıt (selülozik malzeme) yapı için çift doğrusal bünye denklemi modelini sayısal modellemeler yardımıyla bulmaya çalışmıştır. Dairesel kesitli çubuklar üzerinde çalışılmamış olması, bu araştırmayı geometrik faktörlerin etkisi açısından da önemli kılmaktadır.

8- Burulma yüklemesinin yapıldığı ve ağaç numunenin bağlandığı uçlara yakın bölgelere yapıştırılan gerinim pullarının, gerilme yığılmaları altında olup olmadığı ve eğer altındaysa ne kadar etki altında kaldıklarına ait durumu araştırmak için yeni ek çalışmalar yapılması gerektiğidir. Bununla beraber iç yüzeyde, başlıklardan iç yüzeye geçiş bölgelerine büyük eğrilik yarıçapları verilmiştir (Şekil 24, (c)). Yapılan bu çalışma sırasında, iç yüzeye 45° açı ile gerinim pullarını yapıştırabilmek için başlangıçtan ancak belirli uzaklıklara kadar ulaşılabilmek için bir mekanik mekanizmanın oluşturulması gerekliliği düşünülmüş fakat oluşturulamamıştır.

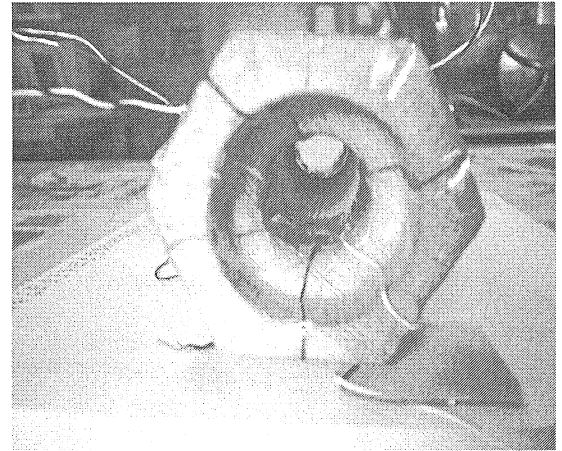
9- Rozet tip gerinim pulunun 0° açısını göstereni, lif yönüne paralel doğrultuya oturtulması sonucu, $0^\circ - 45^\circ - 90^\circ$ doğrultularından alınan birim kayma deformasyonu ölçümlerine göre; $0^\circ - 45^\circ$ ile $45^\circ - 90^\circ$ açılar arasında oluşan relatif kayma gerinim farklılıklarının görülmesini söyleyebiliriz (Şekil 24-a)). Bu iki açı doğrultuları aralığına ait değerler birbirlerine eşit değildir. Fiber eksenine yakın olan $0^\circ - 45^\circ$ açı aralığında oluşan toplam kayma deformasyonu değişimi, $45^\circ - 90^\circ$ aralığına göre daha düşüktür. Bu önemli sonucu, ilk bakış açısına göre fiber etrafında gerilme yığılması oluşurken kayma deformasyonunun az olmasına, diğer ikinci bölgede; fiberden uzaklaştıkça kayma gerilmeleri daha az olurken birim kayma deformasyon değerlerinin birinci bölgeye göre daha büyük olmasına göre açıklayabiliriz. İlerde yapılacak deneysel çalışmalarda, özellikle bu konu ile ilgili daha çok sayıda deney yapılarak, detaylı bilgilerin alınmasıyla, fiber kompozit malzemeler için Mohr daireesi üzerinde çalışılabilineceği görülmüştür.



(a)



(b)



(c)

Şekil 24. (a) Rozet, (b) tek yönlü gerinim pullarının numunelerin dış yüzeyine yerleştirilmesiyle ve (c) tek yönlü gerinim pullarının numunelerin iç yüzeyine yerleştirilmesiyle hazırlanan numuneler

Teşekkür

Bu araştırma, Gazi Üniversitesi 06/2003-21 numaralı Bilimsel Araştırmalar Projesi (BAP) olarak desteklenmiş ve deneyler G.U. Makine Mühendisliği Mekanik Mukavemet Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, her iki veri toplama sisteminin deneylere uygun şekilde kurulup kullanılması aşamasındaki teknik yardımlarından dolayı TDG şirketine teşekkür ederler.

SEMBOLLER

a, b	dikdörtgen kesitli çekme numunesinin genişlik ve kalınlığı
C_{ij}	fiber kompozit malzeme elastik sabitleri
$G_{ort}, \epsilon_s, G_{fonk}, G_{nokta}$	ortalama eşdeğer, fonksiyonel, koordinat noktasına bağlı kayma modülleri
$G(r)$	iki boş numunenin yarıçap yönündeki kayma modülü fonksiyonu
$G(\theta')$	yanal yüzey üzerinde numunenin orta z-eksenine göre θ' açısı ile değişen yöndeki kayma modülü fonksiyonu
$G(\phi)$	kesit üzerinde çevresel yönlü kayma modülü fonksiyonu
$G(z), G(z')$	Numunenin z-eksenine ve fiber yönüne göre tanımlanan kayma modülü fonksiyonları
I_1, I_2	Mohr dairesindeki değişmezler
M	burulma momenti
T	uygulanan tork yükü
$G_{LT} = G_{13}$	shear modulus on LT (1-2) surface
$G_{RT} = G_{23}$	shear modulus on RT (2-3) surface
V_o	voltaj farkı (mV)
V_f (%)	hacim oranı
ϕ	yanal kesit yüzeyinde çevresel açı
$\tau_{\theta z}, \tau_{r\theta}$	silindirik koordinat sisteminde burulma yüklemesine ait kayma gerilmesi bileşenleri (N/mm ²)
τ_{ort}	ortalama kayma gerilmesi
α_{ref}	silindirik yanal yüzey üzerindeki, z eksenine göre ağaç fiber doğrultusu arasında kalan açı
$\theta' (= \alpha_{ref} + 45^\circ)$	silindirik yanal yüzey üzerindeki, z eksenine göre ölçüm doğrultusu arasında kalan açı
θ_p	asal yön
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	asal ve silindirik koordinat sistemlerinde normal gerinme bileşenleri
$\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$	
$\gamma_{23}, \gamma_{31}, \gamma_{12}$	asal ve silindirik koordinat sistemlerinde, kayma gerinmesi bileşenleri (rad)
$\gamma_{z\theta}, \gamma_{rz}, \gamma_{r\theta}$	(not: modelde θ yerine ϕ kullanılmıştır)
$(\gamma_{z\phi}, \gamma_{rz}, \gamma_{r\phi})$	

γ_{nokta}	koordinat bağımlı kayma gerinme değeri
γ_{mak}	ölçüm düzlemindeki maksimum kayma gerinmesi
γ_{ort}	ortalama kayma gerinmesi

Ek A : Transverse İzotrop Malzeme için Genel Hook Kanunu [10-11], Değişmezler ve Kayma Modülleri Seri Açılımlarının Matematiksel İfadeleri

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (A1)$$

$$\sigma_x = I_1 + I_2 \cos 2\theta_p \quad (A2)$$

$$I_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (A3)$$

$$I_2 = \sqrt{\left[\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (A4)$$

Burada θ_p , Mohr dairesindeki asal yönü gösteren açının değeri, I_1, I_2 değişmezlerdir (invariants) [21].

$$G_{LR} = \left(\frac{M}{\theta}\right)_{LR} \left[a^3 b \left\{ \frac{1}{3} - \frac{2a}{b} \sqrt{\frac{G_{LR}}{G_{LT}}} \left(\frac{2}{\pi}\right)^5 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^5} \tanh \frac{(2n-1)\pi b}{2a} \sqrt{\frac{G_{LT}}{G_{LR}}} \right\} \right]^{-1} \quad (A5)$$

$$G_{LT} = \left(\frac{M}{\theta}\right)_{LT} \left[a^3 b \left\{ \frac{1}{3} - \frac{2a}{b} \sqrt{\frac{G_{LT}}{G_{LR}}} \left(\frac{2}{\pi}\right)^5 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^5} \tanh \frac{(2n-1)\pi b}{2a} \sqrt{\frac{G_{LR}}{G_{LT}}} \right\} \right]^{-1} \quad (A6)$$

Burada, $\left(\frac{M}{\theta}\right)_{LR}, \left(\frac{M}{\theta}\right)_{LT}$, fiber kompozit ağaç yapının LR ve LT doğrultularındaki ilk uygulama anında oluşmakta olan burulma momentinin, burulma açısına olan oranları, a ve b değerleri ise çekme numunesinin genişliği ve kalınlığıdır [27].

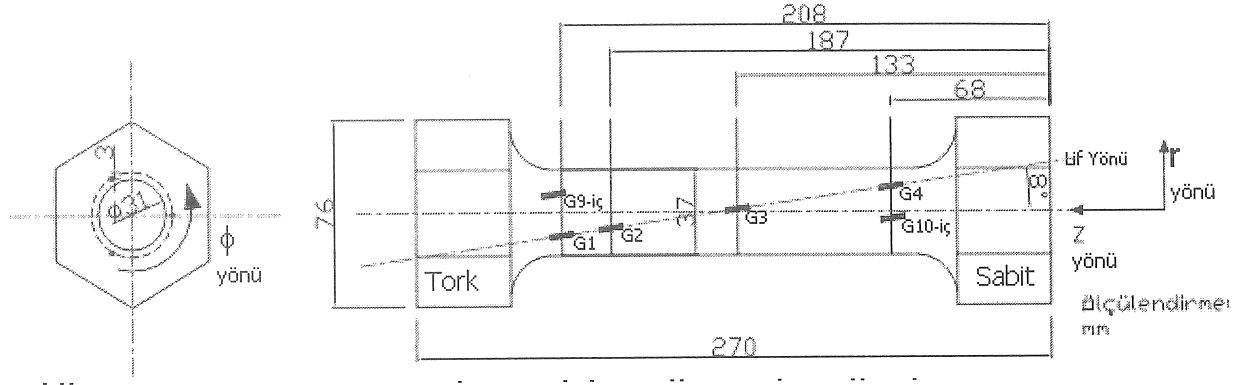
Ek B : Kayma Modülü Fonksiyon Tablosu

Tablo B1. İçi boş ve dolu çam ağacı numunelerinden elde edilen yaklaşık koordinat bağımlı kayma modülü fonksiyonlarından bazıları (Z' ile tanımlanan koordinatlar kolaylık olması amacıyla tabloda kısaca Z şeklinde gösterilmektedir)

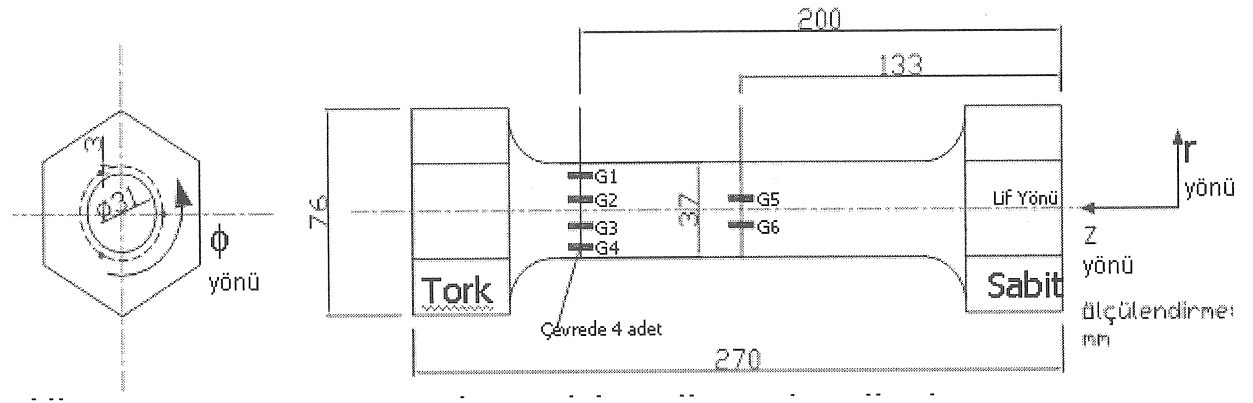
Fiber Açısı	Doğru Denklemi	2. Derece Fonksiyonlar			Üstel Fonksiyonlar		
		$G(r)$	$G(\phi)$	$G(Z')$	$G(r)$	$G(\phi)$	$G(Z')$
0° (dolu)				$G = 7.08 \times 10^5 z^2 - 3 \times 10^8 z + 4 \times 10^{10}$			$G = 5 \times 10^{10} e^{-0.0118 z}$
45° (dolu)				$G = 1.22 \times 10^3 z^2 + 6 \times 10^6 z - 2 \times 10^8$			$G = 1 \times 10^8 e^{0.0105 z}$
45° (içi boş)				$G = -4.3 \times 10^3 z^2 + 4 \times 10^6 z + 4 \times 10^7$			$G = 2 \times 10^8 e^{0.0062 z}$
45° (içi boş)				$G = 1.9 \times 10^4 z^2 - 1.9 \times 10^5 z + 3 \times 10^8$			$G = 2 \times 10^8 e^{0.0082 z}$
45° (içi boş)				$G = -5.9 \times 10^4 z^2 + 1.0 \times 10^7 z + 5 \times 10^9$			$G = 2 \times 10^8 e^{0.0096 z}$
45° (içi boş-dış)				$G = 9.9 \times 10^4 \phi^2 - 2 \times 10^7 \phi + 8 \times 10^9$			$G = 7 \times 10^9 e^{0.0009 \phi}$
45° (içi boş-iç)				$G = -2 \times 10^6 \phi^2 - 3 \times 10^8 \phi + 6 \times 10^{10}$			$G = 8 \times 10^{10} e^{-0.0085 \phi}$
45° (içi boş)	$G = -2 \times 10^{10} r + 3 \times 10^{11}$						$G = 8 \times 10^{14} e^{-0.6607 r}$
45° (içi boş)	$G = -2 \times 10^{10} r + 3 \times 10^{11}$						$G = 3 \times 10^{15} e^{-0.7347 r}$
45° (içi boş)	$G = 7 \times 10^8 r - 3 \times 10^9$						$G = 2 \times 10^9 e^{0.0889 r}$
45° (içi boş)				$G = -3 \times 10^3 \phi^2 + 6.7 \times 10^5 \phi + 3 \times 10^8$			$G = 3 \times 10^8 e^{-0.0002 \phi}$
45° (içi boş-dış)				$G = -2.37 \times 10^4 \phi^2 + 6 \times 10^6 \phi + 7 \times 10^8$			$G = 8 \times 10^8 e^{-0.0009 \phi}$
45° (içi boş-iç)				$G = 2.15 \times 10^4 \phi^2 - 8 \times 10^6 \phi + 2 \times 10^9$			$G = 2 \times 10^9 e^{-0.0018 \phi}$
45° (içi boş-iç/dış)	$G = -5 \times 10^8 r + 9 \times 10^9$						$G = 3 \times 10^{11} e^{-0.3537 r}$
45° (içi boş-iç/dış)	$G = -8 \times 10^7 r + 3 \times 10^9$						$G = 3 \times 10^9 e^{-0.0638 r}$
45° (içi boş-iç/dış)	$G = -1 \times 10^8 r + 3 \times 10^9$						$G = 9 \times 10^9 e^{-0.1333 r}$

Tablo B1. (devamı)

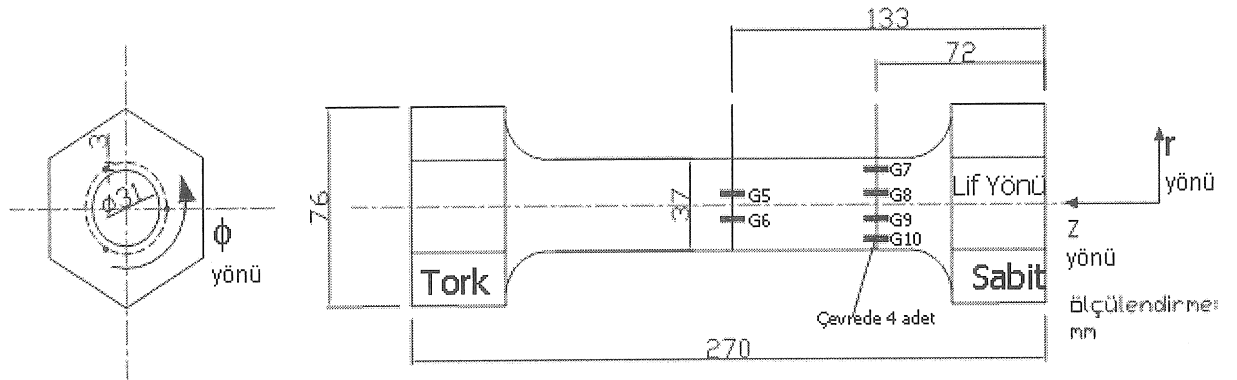
Fiber Açısı	Doğru Denklemleri	2. Derece Fonksiyonlar	Üstel Fonksiyonlar	
θ (Derece)	$G(r)$	$G(\phi)$	$G(z')$	
45° (içi boş-dış)		$G = -9,9 \times 10^3 \phi^2 - 4 \times 10^6 \phi + 7 \times 10^8$	$G = 7 \times 10^8 e^{0,0016 \phi}$	
45° (içi boş-iç)		$G = 1,09 \times 10^3 \phi^2 - 4,8 \times 10^5 \phi + 5 \times 10^8$	$G = 5 \times 10^8 e^{0,0013 \phi}$	
45° (içi boş-dış)			$G = 4,3 \times 10^4 z^2 - 9 \times 10^6 z + 8 \times 10^8$	$G = 3 \times 10^8 e^{0,0046 z}$
45° (içi boş-dış)			$G = 7,5 \times 10^4 z^2 - 1 \times 10^7 z + 9 \times 10^8$	$G = 1 \times 10^8 e^{0,0098 z}$
45° (içi boş-dış)			$G = -5,9 \times 10^4 z^2 - 1 \times 10^7 z + 5 \times 10^9$	$G = 4 \times 10^8 e^{0,0036 z}$
45° (içi boş)			$G = -5,6 \times 10^4 z^2 - 2 \times 10^7 z - 4 \times 10^8$	$G = 5 \times 10^{10} e^{-0,0036 z}$
(içi boş iç/dış)	$G = -3 \times 10^8 r + 6 \times 10^9$		$G = 1 \times 10^{11} e^{-0,2992 r}$	
45° (içi boş iç/dış)	$G = -8 \times 10^8 r + 2 \times 10^{10}$		$G = 1 \times 10^{12} e^{-0,3846 r}$	
45° (içi boş-dış)		$G = 1,57 \times 10^4 \phi^2 - 2 \times 10^6 \phi + 4 \times 10^8$	$G = 4 \times 10^8 e^{0,0029 \phi}$	
45° (içi boş-iç)		$G = 1,8 \times 10^4 \phi^2 + 2,799 \times 10^4 \phi + 5 \times 10^8$	$G = 5 \times 10^8 e^{0,0026 \phi}$	
45° (içi boş-dış)		$G = 7,4 \times 10^3 \phi^2 - 2 \times 10^6 \phi + 4 \times 10^8$	$G = 4 \times 10^8 e^{-0,0007 \phi}$	
45° (içi boş-iç)		$G = -1,0 \times 10^5 \phi^2 + 3 \times 10^7 \phi + 8 \times 10^8$	$G = 1 \times 10^9 e^{0,0005 \phi}$	
45° (içi boş iç/dış)	$G = -1 \times 10^8 r + 3 \times 10^9$		$G = 2 \times 10^{10} e^{-0,2183 r}$	
45° (içi boş iç/dış)	$G = -7 \times 10^8 r + 1 \times 10^{10}$		$G = 8 \times 10^{13} e^{-0,7164 r}$	
45° (içi boş iç/dış)	$G = -2 \times 10^8 r + 3 \times 10^9$		$G = 8 \times 10^{10} e^{-0,3103 r}$	
45° (içi boş-dış)		$G = -4,38 \times 10^4 \phi^2 + 9 \times 10^6 \phi + 9 \times 10^8$	$G = 1 \times 10^9 e^{-0,0016 \phi}$	
45° (içi boş-dış)		$G = -4,26 \times 10^4 \phi^2 + 9 \times 10^6 \phi + 2 \times 10^8$	$G = 2 \times 10^9 e^{-0,0005 \phi}$	
45° (içi boş iç/dış)	$G = -4 \times 10^8 r + 7 \times 10^9$		$G = 8 \times 10^{10} e^{-0,2583 r}$	



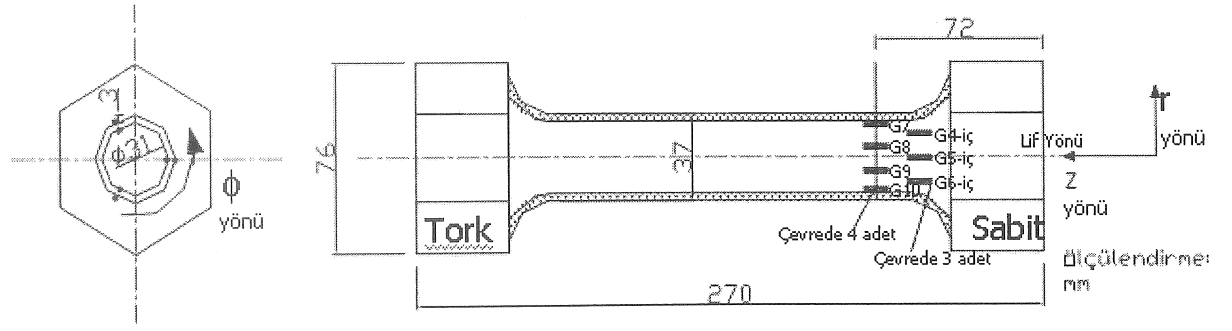
Şekil C1. AD2-a-GBB numunesi ve gerinim pullarının koordinatları



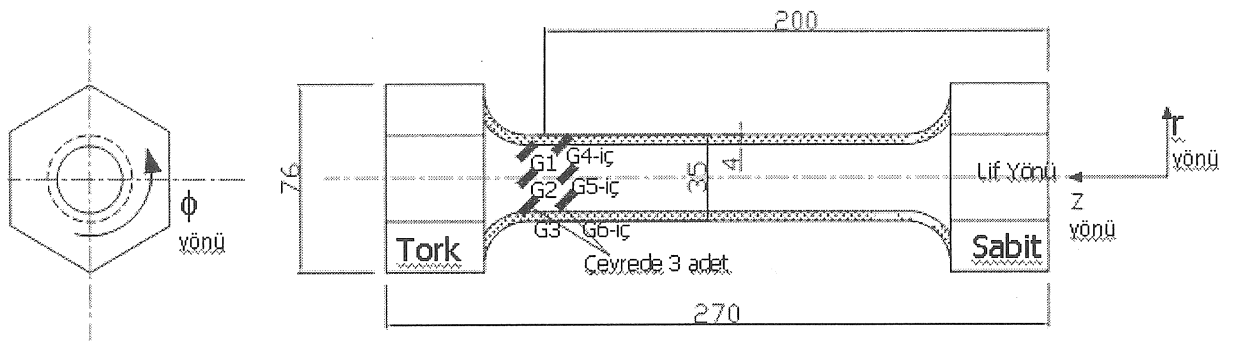
Şekil C2. AD3-a-KBB numunesi ve gerinim pullarının koordinatları



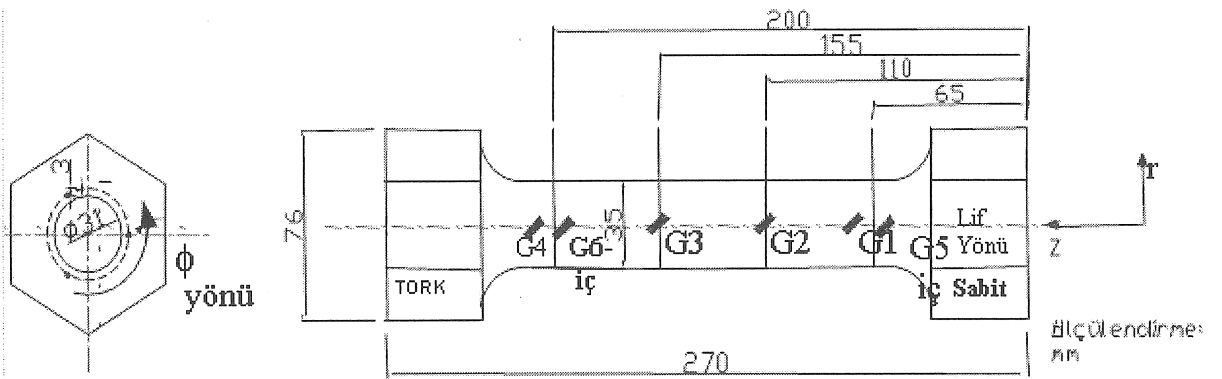
Şekil C3. AD3-b-KBB numunesi ve gerinim pullarının koordinatları



Şekil C4. AD3-e-KBB-6G numaralı deneye ait içi boş kestane numunesine ait gerinim pulları ve koordinatları



Şekil C5. AD9-b-ÇBB numunesi ve gerinim pullarının koordinatları



Şekil C6. AD7-a-ÇBB numunesi ve gerinim pullarının koordinatları

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SHEAR MODULUS VARIATIONS OF TRANSVERSLEY ISOTROPIC VARIOUS WOOD SPECIMENS

In this study, different geometries and types of wood samples were tested under torsion loading with the help of data loggers. Strain measurements corresponding to applied shear stresses were obtained by arranging the strain gauges on and the inner surfaces of the two different geometrical circular cross sectional wood specimens in which they have solid or tubular shapes. As a result of this study, the variations of shear modulus values were expressed in terms of the coordinate dependent functions. Shear modulus values which are given generally according to the principal fiber directions with their average values, were defined with radial, circumferential and axial directional distributions together with polynomial and exponential functions in the equations $G(r)$, $G(\phi)$ and $G(z)$ with this work.

Key words: Transversely isotropic composite, wood specimen, torsion loading, shear modulus, distribution function

KAYNAKÇA

1. Turley, J., Sines, G., The Anisotropy of Young's Modulus Shear Modulus and Poisson's Ratio in Cubic Materials, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 4, 264-271, 1971.
2. Bozorth, R. M., *Ferromagnetism*, New York: Van Nostrand, 1951.
3. Wooster, W.A., *A Text-Book on Crystal Physics*, London: Cambridge University Press, 1949.
4. Sumi, C., Nakayama, K., Kubota, M., "An Effective Ultrasonic Strain Measurement-Based Shear Modulus Reconstruction Technique for Superficial Tissues-Demonstration on in Vitro Pork Ribs and in Vivo Human Breast Tissues", *Phys. Med. Biol.*, 45, 1511-1520, 2000.
5. Saliklis, P.E., Tokyay, B., "Empirical Prediction of Shear Modulus and Young's Modulus of Plywood Panels", *14th Engineering Mechanics Congress*, Department of Civil Engineering, The Univ. of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, 21-24, May, 2002.
6. Saliklis, E.P., Urbanik, T.J., Tokyay, B., "Bilinear Modelling of Cellulosic Orthotropic Nonlinear Materials", *Journal of Pulp and Paper Science*, 29:12, 407-411, 2003.
7. Salmén, L., "Micromechanical Understanding of the Cell-Wall Structure", *C.R. Biologies*, 327, 873-880, 2004.
8. Uludoğan, E., *Ağaç Burulma Numuneleri Kullanılarak Transvers İzotrop Kompozitlerin Kayma Modüllerinin Koordinat Bağımlı Fonksiyonel İfadelerinin Deneysel Tayini*, Gazi Univ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık, Ankara, 2005.
9. Günay, E., Uludoğan, E., *Değişik Ağaçlardan Alınarak Hazırlanmış Burulma ve Çekme Numuneleri ile Yapılan Deneysel Çalışmalar ile Yanal-Ortotropik Kompozitlerin Elastik ve Kayma Modüllerinin Tayini ve Diğer Malzemelerle Sonuçların Karşılaştırılması*, Gazi Univ. Bilimsel Araştırma Proje (BAP) Raporu, Ankara, 2005.
10. Jones, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, Hemisphere Publishing Co., Boca Raton, 1975.
11. Reddy, J.N., *Mechanics of Laminated Composite Plates - Theory and Analysis*, Boca Raton, FL: CRC Press, Inc., New York, 1997.
12. Günay, E., Konaklı S., "Yanal İzotropik Fiber Kompozit Çubuklarda Burulma Yüklemeleri için Yeni Formda Kayma Modülü Tanımlamaları", *J. Fac. Eng. Arch.*, Gazi Univ., 19:1, 1-12, 2004.
13. Günay, E., Konaklı, S., "Formation of Shear Stress Equations for Transversely Isotropic Finite Length Bar under Torsion", *Science and Engineering of Composite Materials*, 13, 255-269, 2006.
14. Günay, E., Sönmez, M., "Mechanical Behavior of Wood under Torsional and Tensile Loadings", *G.U. Journal of Science*, 16, 733-749, 2003.
15. Günay, E., Orçan, Y., Experimental Investigation of the Mechanical Behavior of Solid and Tubular Wood Species under Torsional Loading, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 31, 89-118, 2007.
16. TecEquipment (TQ)-SM21, Torsion Testing Machine, TecEquipment Group of Companies, Nottingham, England, 1982.
17. TDG-CoDA-AI8a, *Veri Toplama Sistemi Kullanım Klavuzu*, Ankara, 2003.
18. TDG-CoDA-AI8b, *Veri Toplama Sistemi Kullanım Klavuzu*, TDG, Teknik Destek Grubu, ODTU Teknokent, Silikon Blok, Ankara, 2007.
19. ALMEMO (2590-9), *Manual*, V5, Holzkirchen, 2003.
20. AHLBORN, *Mess-und Regelungstechnik GmbH*, Eichenfeldstr, 1-3, D-83607 Holzkirchen, Germany.
21. Gibson, R.F., *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill, Inc., Singapore, 1994.
22. İnan, M., *Cisimlerin Mukavemeti*, Ofset Matbaacılık Ltd. Şti., 1970.
23. Strain Gauges, *Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd*, Tokyo.
24. Delmhorst BD 10, *Delmhorst Instr. Co.*, 51 Indian Lane East Towaco, NJ 07082, New Jersey, U.S.A.
25. Mack, J.J., "Australian Methods for Mechanically Testing Small Clear Specimens of Timber", *Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization. Division of Building Research.*, Technical paper, 31, Melbourne, 1979.
26. Chapra, S.C., Canale, R.P., *Numerical Methods for Engineers - TOOLKIT*, 3rd Ed., WCB/ McGraw-Hill, Boston, 1998.
27. Yoshihara, O., Ohta, M., "Estimation of the Shear Strength of Wood by Uniaxial-Tension Tests of Off-Axis Specimens", *J. Wood Sci.*, 46, 159-163, 2000.
28. Kubojima, Y., Yoshihara, H., Ohsaki, H., "Accuracy of Shear Properties of Wood Obtained by Simplified Iosipescu Shear Test", *J. Wood Sci.*, 46, 279-283, 2000.
29. Stokes, V.K., "Design with Nonhomogeneous Materials- Part II: Torsion of Thin-Walled Prismatic Bars", *Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, 109, 87-91, 1987.
30. Panc, V., *Differential Equations of the Component Theory in Theories of Elastic Plates*, Noordhoff International, Leyden, Netherlands, 399, 1975.