

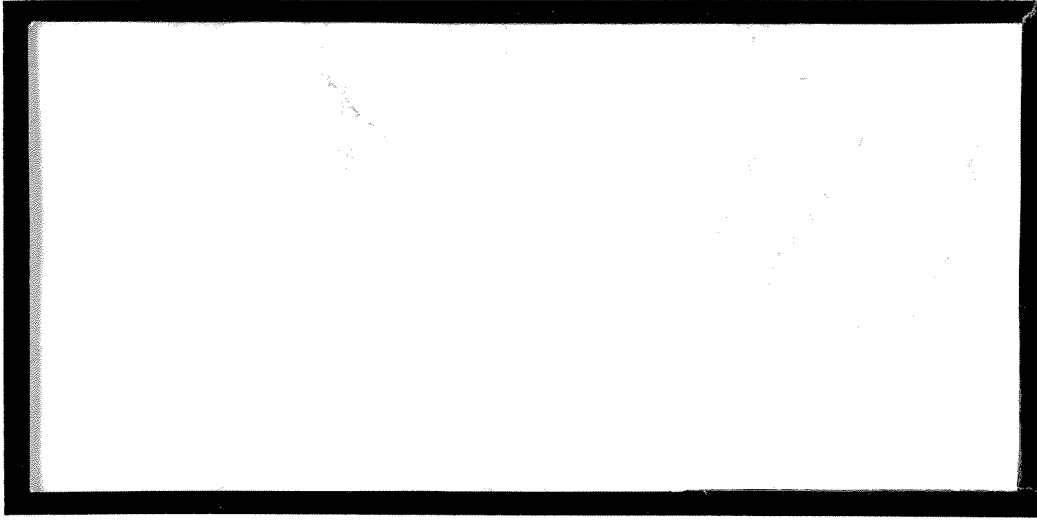
2001-198

DUP



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY



**Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee**

**KOMPOZİT CAM KİRİŞLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN
DAVRANIŞLARI**

PROJE NO : MİSAG-137

DOÇ.DR.MEHMET ZÜLFÜ AŞIK

SELİM TEZCAN

**TEMMUZ 2001
ODTÜ - ANKARA**

ÖNSÖZ

KOMPOZİT CAM KİRİŞLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞLARI

MİSAG-137 nolu proje lamine cam kirişlerin davranışı üzerine bir çalışmadır. Projeye ilgili çalışmalar 20 Ağustos 1999 tarihinde başlamış ve 20 Şubat 2001 tarihinde sonuçlanmıştır. Doç. Dr. Mehmet Zülfü Aşık projede yürütücü olarak, ODTÜ Mühendislik Bilimleri Bölümü araştırma görevlisi Sayın Selim Tezcan proje araştırmacısı olarak görev almışlardır. TÜBİTAK tarafından desteklenen projenin deneyleri ODTÜ Mühendislik Bilimleri Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Proje'ye katkısı olan diğer kurumlar ise ODTÜ ve Trakya Cam Sanayii A.Ş. Otocam Fabrikası'dır. Proje araştırmacıları, projenin gerçekleşmesinde katkıları olan kurum ve kuruluşlara teşekkür ederler.

ABSTRACT

NONLINEAR BEHAVIOR OF COMPOSITE GLASS BEAMS

In this study, a mathematical model for the bending of laminated glass beams is developed by the minimization of total potential energy of the system. The model is then verified by conducting experiments and by using finite element models for a simply supported beam. It is further used to investigate the effect of various factors like ambient temperature, thickness of the interlayer, width ve length of the beam etc. as well as to distinguish the effect of the transition temperature of the interlayer on the strength factor of the laminated glass from the effect of nonlinearity observed in plate behavior. To this latter end, the nonlinear behavior of fixed end laminated glass beams is also investigated through finite element method.

Keywords: Laminated glass, glass beams, large deflection, strength factor, PVB

ÖZ

KOMPOZİT CAM KİRİŞLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞLARI

Bu çalışmada sistemin tüm potansiyel enerjisinin en azlanması yolu ile, lamina cam kirişlerin eğilmesi üzerine bir matematiksel model geliştirilmiştir. Ardından bu model deney yapılmak suretiyle ve sonlu elemanlar modelleri kullanılarak doğrulanmıştır. Ayrıca geliştirilen model, ortam sıcaklığı, ara katmanın kalınlığı, kirişin eni ve uzunluğu gibi çeşitli faktörlerin etkileri ile; ara katmanın geçiş derecesinin etkisini, doğrusal-olmayan davranışın etkisini incelemek için kullanılmıştır. Hem bu son amaç için hem de kirişlerin doğrusal olmayan davranışını anlamak için, iki ucu ankastre lamina cam kirişlerin doğrusal olmayan davranışı da sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Lamina cam, cam kirişler, büyük yer değiştirme, dayanım çarpanı,

PVB

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLoların LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Lamina Cam	1
1.1.1 Kullanım.....	1
1.1.2 Yapı ve ara tabakanın özellikleri.....	1
1.2 Ön bilgiler	3
1.3 Önceki araştırmalar	4
1.4 Çalışmanın amacı ve kapsamı.....	7
BÖLÜM 2 MATEMATİKSEL MODEL.....	8
2.1 GİRİŞ	8
2.2 Matematiksel model için yapılan varsayımlar.....	9
2.3 Toplam potansiyel enerjinin enazlanması.....	10

2.3.1	Doğrusal durum (basit mesnetli kiriş)	10
2.3.2	Doğrusal olmayan durum (sabit mesnetli kiriş).....	13
BÖLÜM 3 TKURAMSAL ÇÖZÜMLER VE SONUÇLAR.....		15
3.1	Basit mesnetli kiriş için analitik çözüm.....	15
3.2	Sabit mesnetli kirişin doğrusal olmayan davranışın ANSYS ile modellenmesi..	19
3.3	Sonuçlar ve tartışma	19
3.3.1	Basit mesnetli kiriş için analitik çözüm sonuçları	19
3.3.1.1	Geçiş sıcaklığı için kuramsal ve deneysel sonuçlar	19
3.3.1.2	Yumuşak ve sert PVB için geçiş aralığı.....	21
3.3.1.3	Basit mesnetli kiriş için yerdeğiştirme ve dayanım çarpanı	23
3.3.1.4	Kiriş uzunluğu boyunca yerdeğiştirme ve gerilme işlevleri.....	24
3.3.1.5	Kesitte gerilme dağılımı.....	27
3.3.2	Sabit mesnetli kirişler	29
3.3.2.1	Geometri ve sıcaklık ile DC'nin değişimi.....	29
3.3.2.2	Kiriş merkezindeki yerdeğiştirme-yük eğrileri	33
BÖLÜM 4 DENEYLER		36
4.1	PVB deneyleri.....	36
4.1.1	Çekme deneyleri.....	36
4.1.1.1	Numuneler.....	36
4.1.1.2	Deney gereçleri	38
4.1.1.3	Deneyin yapılışı	38
4.1.1.4	Sonuçlar	38
4.1.2	Kesme deneyleri	41
4.1.2.1	Örnekler	41
4.1.2.2	Deney gereçleri	41
4.1.2.3	Deney yapılışı	43
4.1.2.4	Sonuçlar	43
4.2	Kiriş Deneyleri.....	45
4.2.1	Örnekler.....	45
4.2.2	Deney gereçleri.....	45
4.2.3	Deneyin yapılışı.....	47
4.2.4	Sonuçlar.....	47
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....		51
KAYNAKLAR.....		53

TABLULARIN LİSTESİ

Tablo 3.1. Model sonuçlarıyla Edel'in deney sonuçlarının karşılaştırılması	20
Tablo 3.2. Sıcaklığa göre yumuşak ve sert PVB'nin kesme modülü.....	22
Table 4.1. Çekme deneylerinden elde edilen kesme modülleri. Sonuçlar kPa cinsindedir.....	40
Tablo 4.2. PVB numunelerinin kalınlığı ve deneyler için sıcaklık/nem şartları.	41
Tablo 4.3. Kesme deneylerinden elde edilen kesme modülü değerleri. Değerler kPa cinsindedir.....	44
Tablo 4.4. Deneysel ve matematiksel sonuçların karşılaştırması.....	49
Tablo 4.5. Gerinme ve gerilme değerleri.	50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 1.1. Lamina Cam.	2
Şekil 2.1. Kullanılan cam kirişler.....	8
Şekil 2.2. Basit mesnetli lamina cam kiriş, geometri ve yükleme.	10
Şekil 2.3. Şekil değiştirmeden önceki ve sonraki durum.	11
Şekil 3.1. Deneysel (Edel) ve kuramsal sıcaklık geçiş eğrisi.	20
Şekil 3.2. Yumuşak PVB kullanıldığında dayanım çarpanının sıcaklık ile değişimi.....	21
Şekil 3.3. Sert PVB kullanıldığında dayanım çarpanının sıcaklık ile değişimi.	22
Şekil 3.4. Basit mesnetli kiriş için enbüyük yerdeğiştirme-yük grafiği.	23
Şekil 3.5. Basit mesnetli kiriş için DÇ'nin yük ile değişimi.	23
Şekil 3.6. Krişin yarısı boyunca -1.11° C sıcaklıkta yerdeğiştirme grafiği.	24
Şekil 3.7. Krişin yarısı boyunca -1.11° C sıcaklıkta gerilim grafiği.	25
Şekil 3.8. Krişin yarısı boyunca 21.11° C sıcaklıkta yerdeğiştirme grafiği.	25
Şekil 3.9. Krişin yarısı boyunca 21.11° C sıcaklıkta gerilme grafiği.....	26
Şekil 3.10. Krişin yarısı boyunca 48.89° C sıcaklıkta yerdeğiştirme grafiği.	26
Şekil 3.11. Krişin yarısı boyunca 48.89° C sıcaklıkta gerilme grafiği.....	26
Şekil 3.12. Cam kiriş kesitinde gerilme dağılımı	28
Şekil 3.13. DÇ'nin yük ile değişimi, açıklık/kalınlık = 100.	30
Şekil 3.14. DÇ'nin 150 N'da sıcaklık ile değişimi, açıklık/kalınlık = 100.	30
Şekil 3.15. DÇ'nin yük ile değişimi, açıklık/kalınlık = 150.	32
Şekil 3.16. Enbüyük çekme gerilmesinin yük ile değişimi, açıklık/kalınlık = 150.....	32

Şekil 3.17. DÇ'nın 150 N'da sıcaklık ile değişimi, açıklık/kalınlık = 150.	33
Şekil 3.180. Kiriş merkezindeki yerdeğiştirme-yük, açıklık/kalınlık = 300.	35
Şekil 4.1. PVB çekme deneyi düzeneği.	37
Şekil 4.2. PVB çekme deneyi.	37
Şekil 4.3. Çekme altındaki PVB için tipik yük-gerinim eğrisi.	39
Şekil 4.4. Düzeltilmiş kesit alanı A_c ve ilk kesit alanı A_o ile hesaplanan gerilmeler.	39
Şekil 4.5. PVB Kesme Deneyi kurulumu.	42
Şekil 4.6. Kesme kutuları.	42
Şekil 4.7. Kesme deneyi gereci.	43
Şekil 4.8. Kesme deneyleri için tipik kesme gerilim-gerinim eğrisi.	44
Şekil 4.9. Basit mesnetli kiriş için 3-noktalı eğilme düzeneği.	45
Şekil 4.10. Lamina cam eğilme deneyi düzeneği.	46
Şekil 4.11. Whetstone Köprüsü ile HP çoklometresi.	46
Şekil 0.12. Model ve deneyden elde edilen merkezi yerdeğiştirme değerleri.	48
Şekil 4.13. Deney ve modelden elde edilen enbüyük çekme gerilmesi değerleri.	49

SEMBOL LİSTESİ

h_1, h_2	Üst ve alt camların kalınlığı
t	PVB'nin kalınlığı
b	Kiriş genişliği
h	Distance between the midpoints of the top ve bottom plies
N_1, N_2	Üst ve alt cam kirişlerdeki aksenal kuvvetler
u_1, u_2	Üst ve alt cam kirişlerde x yönündeki yerdeğıştirmeler
A_1, A_2	Üst ve alt cam kirişlerin kesit alanları
w	Düşey yönde yerdeğıştirme
L	Kirişin yarısının uzunluğu
E	Camın elastik modülü
G	PVB'nin kesme modülü
x, z	kartezyan koordinatlar
P	Kirişin ortasında uygulanan nokta yük
q	Düzgün yayılı yük
U	Toplam gerinme enerjisi

V	Uygulanan kuvvetlerden dolayı toplam potansiyel enerji
Π	Dizgedeki toplam potansiyel enerji
α, β, λ	Kesit geometrisi ve malzeme özellikleriyle ilgili parametreler
I_1, I_2	Üst ve alt kirişlerin kesit eylemsizlik momentleri
I	Cam kirişlerin toplam kesit eylemsizlik momenti
γ_{xz}, γ	PVB'nin kesme gerinmesi
τ	PVB'nin kesme gerilmesi
U_m^i	Cam kirişlerdeki zar gerinme enerjisi
U_b^i	Cam kirişlerdeki eğilme gerinme enerjisi
$U_{\tau_{xz}}$	Ara tabakadaki kesme gerinme enerjisi
ρ	Ara tabakanın Poisson oranı
ε_x^i	Cam kirişlerdeki aksenal gerinme
ε_b^i	Cam kirişlerdeki eğilme gerinmesi
M	Cam kirişlerdeki eğilme momenti
$\sigma_1^{üst}, \sigma_1^{alt}$	Alt cam kirişin üst ve alt yüzeylerindeki eğilme gerilmeleri
$\sigma_2^{üst}, \sigma_2^{alt}$	Üst cam kirişin üst ve alt yüzeylerindeki eğilme gerilmeleri

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Lamina Cam

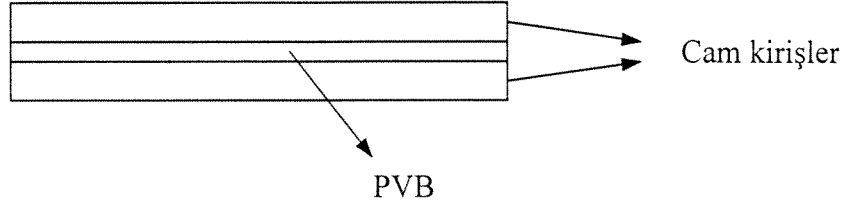
1.1.1 Kullanım

Lamina camlar, emniyet amaçlı olarak binalardaki cephe kaplamalarında kullanılırlar. Rüzgardan dolayı ya da herhangi bir nedenden dolayı kırıldıklarında ara tabaka olan Polyvinyl Butyral (PVB) parçaların etrafa saçılmasını ve insanları kesmesini önler. PVB, emniyet amacı yanında ısı ve ses yalıtımı amaçlı olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca, lamina camlar ani kuvvetlere karşı dayanıklı olması nedeniyle avantaj sağlamaktadır. Lamina camların, yekpare camlara nazaran, üstte sayılan üstünlüklerine daha başka eklemeler yapılabilir. Örneğin aydınlık kontrolü, güneş enerjisinden yararlanma (Hooper 1993), ultraviolet ışınlarının önlenmesi (Edel 1997) lamina camlarının kullanım alanlarını ve amaçlarını genişletmektedir. Böylece lamina camlar yekpare camlarla kıyaslandığında daha tercih edilir duruma gelmektedir.

1.1.2 Yapı ve ara tabakanın özellikleri

Lamina cam, iki cam tabaka ve ara tabaka olan polimer bir malzeme PVB'den oluşmaktadır. PVB farklı plastisayzır miktarı kullanılarak farklı üreticilerce

üretilmektedir: ne kadar çok plastisayzır kullanılırsa PVB o kadar yumuşak olmaktadır. Lamina camların davranışı sıcaklık değişiminden de çok etkilenmektedir. Çünkü düşük sıcaklıklarda PVB'nin kesme modülü epey yükselmektedir yüksek sıcaklıklarda ise düşmektedir.



Şekil 1.1. Lamina Cam.

PVB'nin elastik özellikleri sıcaklığın bir işlevidir ve geçiş sıcaklığı T_g 'de önemli değişikliklere uğramaktadır. Polimerler geçiş sıcaklığı T_g 'nin epey altındaki sıcaklıklarda sert, eğilmeye dirençli ve camsı malzemelerdir. T_g 'nin yeterli üzerindeki sıcaklıklarda ise lastik özellikleri gösterirler.

PVB'nin geçiş sıcaklığı T_g , 49°C ile 70°C arasındadır. Bu nedenle oda sıcaklığında (25° C) sert, bükülmeye dirençli ve camsı malzeme olduğundan bu haliyle kırılğan, ani kuvvetlere karşı zayıf ve cama iyi tutamaz durumdadır. PVB'yi yumuşatmak ve daha yeterli hale getirebilmek için plastisayzır eklenir. Böylece PVB ani kuvvetlere karşı dirençli olur ve cam kirişleri olukça sıkı tutar. Çünkü plastisayzırların geçiş sıcaklığı -150° C ile -50° C arasındadır ve PVB'ye eklendiğinde PVB'nin geçiş sıcaklığı düşer geçiş aralığını artırır. Böylece PVB'nin kesme modülü çok değiştiğinden geçiş sıcaklığı lamina camların davranışlarında çok önemli rol oynar.

1.2 Ön bilgiler

Hooper (1973), Behr vd. (1993), Edel (1997) ve Norville vd. (1998) basit mesnetli kirişler üzerine çeşitli sıcaklıklarda ve çeşitli yükler altında araştırmalar yapmışlardır. Bu dört çalışmada da lamina camların davranışının üst sınırının tabakalı camlar ve alt sınırının ise eşdeğer yekpare cam yerine toplam kalınlığı iki cam kiriş ve PVB'nin kalınlığına eşit olan gerçek yekpare cam olduğu sonucuna varılır. Norville vd (1998) bunun nedeninin ara tabaka kalınlığı nedeniyle kesit modülünün artmasının olduğunu ileri sürmüşlerdir. Edel (1997) araştırmalarının sonucu olarak dayanım çarpanının eşdeğer yekpare cam için 0.6, gerçek yekpare cam için 0.4 olarak önermiştir. Bilindiği gibi kullanılan dayanım çarpanı 0.75 ve PVB üreticileri 1.0 olmasını öneriyorlar.

Üstteki çalışmalar ve bu çalışma sonucu basit mesnetli krişlerin doğrusal davranış gösterdiği sonucuna varılmıştır. Tabakalı camda oluşan gerilmeler yekpare camda oluşan gerilmelerin iki katıdır. Dayanım çarpanı sabit ve sıcaklık geçiş eğrisi yüke bağlı olarak değişmemektedir.

Fakat Vallabhan vd. (1987), Behr vd. (1993) ve Van Duser vd. (1999) doğrusal olmayan davranış gösteren lamina plaklarda durumun oldukça farklı olduğunu göstermişlerdir. Çünkü büyük yerdeğiştirmeler altında cam plaklar doğrusal olmayan davranış göstermekte, yüksek zar gerilimleri oluşmaktadır. Vallabhan vd. (1987), çalışma şartlarında, tabakalı camlarda oluşan gerilmelerin eşdeğer yekpare camlarda oluşan gerilmelere eşit ya da bu gerilmelerden küçük olabileceğini göstermiştir. Bunun nedeni, Behr vd. (1993) tarafından, aynı yük altında, tabakalı camların zar gerilmeleri etkisine, eşdeğer yekpare camlara göre daha çabuk girmesi olarak verilmektedir. Norville vd. (1998) ise lamina camlardaki kesit modülünün artmasına dik-

kat çekmişlerdir. Sıfır ve 50 derece sıcaklıklardaki gerilmeler arasındaki fark doğrusal durumdan belirgin olarak daha düşüktür (Van Duser vd. 1999). Edel (1997) tarafından incelenen dayanım çarpanı ve sıcaklık geçiş eğrisi, doğrusal olmayan durumda, yüke bağlı olarak değişmektedir. Basit mesnetli lamina plakların doğrusal olmayan davranışı nedeniyle yüksek doğrusal olmama seviyelerine ulaşıldığında dayanım çarpanı 1.0'a yaklaşmakta ve hatta 1.0 değerini aşmaktadır.

1.3 Önceki araştırmalar

İlk defa Hooper (1973) lamina cam kirişleri incelemek için matematiksel model geliştirdi ve deneyler yaptı. Deneylerde (ağırlık olarak yüzde 21 plastisayzır içeren) sert ve (ağırlık olarak yüzde 41 plastisayzır içeren) yumuşak PVB ara katmanı olan lamina cam kirişler kullandı. Deneylerinde hem kısa (<3 dakika) hem de uzun (80 gün) süreli yükler uyguladı. Aynı zamanda sert ve yumuşak ara tabakasının kesme modülünün sıcaklık ile değişimini ortaya koydu. Kısa süreleri yükleme deneylerinden elde ettiği sonuçlar ile matematiksel modelden elde ettiği sonuçlar arasında yüzde 2 fark vardı. Sünme deneylerinin sonucu olarak yumuşak aratabakanın kesme modülünde 10 ile 20° C derece arasında düşmeler olurken sert aratabakanın kesme modülünde 30 ile 40° C derece arasında düşmeler olduğunu gördü ve PVB'nin plastisayzır içeriğinin miktarının önemine dikkat çekti. Dayanım çarpanı çözümlemesi yapıldığında plastisayzır içereğinin önemi ortaya çıkmaktadır. Uzun süreli yükler altında sünme deneyleri, sünmeden dolayı şekil değiştirmelerin oluştuğunu ve sıcaklığa göre yumuşak ve sert aratabakada davranışın farklı ortaya çıktığını izledi.

Vallabhan vd. (1987) dayanım çarpanı için çeşitli düzgün yayılı yük ve cam plak geometrilerini göz önüne alarak yekpare ve tabakalı camlar için çözümleme yaptılar. Çözümleme için von Karman plak kuramını kullanarak doğrusal olmayan

türevsel denklemler geliştirdiler ve bu denklemleri çözmek için sonlu farklar yöntemi kullandılar. Çalışmaları sonucunda bazı plak boyutları için dayanım çarpanının 1 değerini aşabileceğini ortaya çıkardılar. Dayanım çarpanının tanımı göz önüne alınırsa (yekpare camdaki en büyük gerilimin tabakalı camdaki en büyük gerilime oranı) tabakalı camların aynı yük altında daha az gerilmelere maruz kaldığı yani yekpare cama göre daha dayanıklı olduğu anlaşılır.

Behr vd. (1985), lamina, tabakalı ve yekpare camlar üzerine deneyler yaptılar. Deneyler sonucunda lamina camlarının davranışlarının oda sıcaklıklarında yekpare caminkine yüksek sıcaklıklarda ise tabakalı camınki yaklaştığını gördüler. Böylece lamina camın davranışının sınırlarının, toplam olarak aynı kalınlıkta, tabakalı camlar ve yekpare camlar olduğu sonucu vardılar. Aynı zamanda geometric olarak doğrusal olmayan denklemlerin sonlu farklar çözüm sonuçlarının deney sonuçlarıyla oldukça iyi örtüştüğünü gördüler. Doğrusal olmayan davranış göz önüne alındığında tabakalı camdaki en büyük gerilimin yekpare camdaki en büyük gerileme oranının 1.5 olduğunu gösterdiler. Bilindiği gibi bu oran doğrusal davranış göz önüne alındığında 2'dir.

Behr vd. (1993) deneylerine devam ettiler ve bu deneyler sonucunda lamina camlar için dayanım çarpanının 1 alınabileceğine karar verdiler. Dayanım çarpanının 1 olabileceği daha sonra Minor ve Reznik (1990), Kanabolo ve Norville (1985), Linden vd. (1984), Reznik ve Minor (1986) tarafından yapılan deneylerle de desteklendi. Deneylerde kullanılan lamina camlardaki aratabaka PVB'nin içeriği azdı ve aratabaka sertti. Kesme modülündeki düşme 49° C dereceden sonra başladığı için geçiş sıcaklığı 49° C derecenin üzerindeydi. Deneylerden lamina camların davranışının

yüksek sıcaklıklarda tabakalı camlara yaklaştığı düşük sıcaklıklarda ise yekpare camlara yaklaştığı sonucu gelişti.

Vallabhan vd. (1993) değişim ilkelerine dayanarak lamina camların çözümlemesi için oldukça etkin bir matematiksel model geliştirdiler. Modelde lamina camların davranışı beş doğrusal olmayan türevsel denklemlerle temsil edildi. Bu denklemler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözüldü ve sonuçlar Texas Tech üniversitesinin İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki Cam Araştırma Laboratuvarı'nda yapılan deneylerle doğrulandı.

Edel (1997) lamina camların geçiş sıcaklığı ve dayanım çarpanı üzerine çalışmalar yaptı. Bu çalışmalarda 3-noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirdi ve sonuçları sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırdı. Çalışmaların sonucunda sıcaklığa ve yüke bağlı dayanım çarpanı grafikleri oluşturdu. Dayanım çarpanını gerçek yekpare cam (lamina camdaki iki cam tabaka kalınlığı+aratabaka kalınlığında yekpare cam) için 0.4, eşdeğer yekpare cam (lamina camdaki iki cam tabakanın kalınlığında yekpare cam) için 0.6 olarak önerdi.

Norville vd. (1998) lamina cam kırışların çözümlemesi için mekanik bir model geliştirdiler. Modeli doğrulamak için model sonuçlarını Behr vd. (1993) yaptığı deneylerin sonuçlarıyla karşılaştırdılar.

Van Duser vd. (1999) lamina cam plaklar üzerine çalışma geliştirdiler. Aratabakayı viskoelastik malzeme olarak modellediler. Çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi kullandılar. Ayrıca cam kırılmalarıyla ilgili olarak Weibull etkin gerilimine dayanan istatistiksel model de geliştirdiler. Bu model Weibull etkin gerilimin – çökme olasılığının istatistiksel ölçüsü- lamina camlarda yekpare camlara göre daha

düşük olduğunu gösterdi. Sonuç olarak yazarlar lamina camların yekpare camlardan daha dayanıklı olabileceğini vurguladılar.

1.4 Çalışmanın amacı ve kapsamı

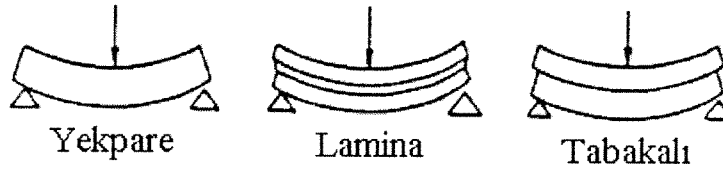
Bu çalışmanın amacı kamina cam kirişlerin davranışı üzerine çözümler yapmak. Bu amaçla, değişim ilkeleri kullanılarak basit mesnetli kirişler için denklemler türetilmiş, sonuçlar yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış, aratabaka PVB'nin geçiş sıcaklığının etkisi araştırılmış, sabit mesnetli kirişlerin doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Geliştirilen matematiksel model kullanılarak sıcaklık, aratabaka kalınlığının, kiriş boyutlarının etkisi, mekanik davranışı araştırılmıştır.

BÖLÜM 2

MATEMATİKSEL MODEL

2.1 GİRİŞ

Şekil 2.1’de literatürde ismi geçen cam kirişler görülmektedir: yekpare, lamina ve tabakalı (ya da katmanlı). Yekpare cam kiriş tamamen camdır ve yekparedir. Kalınlığı lamina camdaki iki cam kirişin toplam kalınlığına eşittir. Lamina cam kiriş iki cam kiriş ve PVB olarak bilinen bir aratabakadan oluşmaktadır. Aratabaka iki cam kirişi birbirine bağlar ve cam kırıldığında parçaların etrafa saçılmasını ve insanlara zarar vermesini önler. Bağın mükemmel olduğu varsayılır.



Şekil 2.1. Kullanılan cam kirişler

Şekilde görülen kirişler basit mesnetlidir. Bu çalışmada doğrusal olmayan davranışı görmek için sabit mesnetli kirişler de incelenmiştir.

2.2 Matematiksel model için yapılan varsayımlar

1. Kiriş dizgesindeki her parça homojen ve izotropiktir.
2. Kullanılan malzemeler elastik ve Hooke kanunu geçerlidir.
3. Kirişteki kesme şekil değiştirmeleri kirişin kalınlığı çok küçük olduğundan ihmal edilir.
4. Şekil değiştirmeden önce kirişin orta düzlemine dik olan doğrular şekil değiştirdikten sonra da orta düzleme dik kalırlar.
5. Doğrusal olmayan durum için aksenal yerdeğiştirmelerin türevleri çok küçüktür ve bunların üslü olanları ihmal edilir.

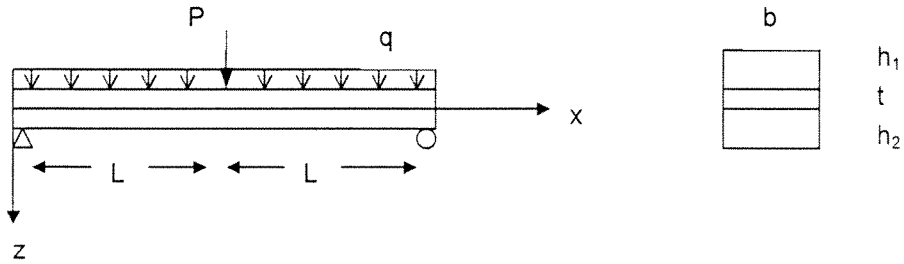
Aratabaka PVB için aşağıdaki varsayımlar kabul edilir:

1. Şekil değiştirmeden önceki düzlem kesitler şekil değiştirmeden sonra da düzlem kalır.
2. Malzeme homojen ve izotropiktir.
3. Malzeme elastik ve Hooke's kanunu geçerlidir. Aratabaka kesme modülü sabittir.
4. Cam iç yüzeyleri ile aratabaka mükemmel bağlıdır, kayma yoktur.
5. Aratabakada kesme gerinmesi enerjisi belirgindir, diğer enerjiler ihmal edilir.
6. Kesme gerinmeleri sonsuz küçüklüktedir.
7. Kirişe dik, yüke koşut yönde bir sıkışma yoktur, göreceli yerdeğiştirme sıfırdır.

2.3 Toplam potansiyel enerjinin enazlanması

2.3.1 Doğrusal durum (basit mesnetli kiriş)

Şekil 2.2’de verilen, genişliği b , uzunluğu L olan ve kalınlıkları h_1, h_2 iki cam tabaka ile kalınlığı t olan aratabaka PVB’den oluşan ve noktasal ve/veya yayılı yüklerle maruz kalan lamina cam kirişin potansiyel enerjisi değişim ilkeleri kullanılarak enazlanacaktır. Toplam potansiyel enerji işlevini yazmak için cam tabakalardaki eğilme ve zar gerinme enerjileri, aratabakadaki kesme gerinmesi enerjisi ve kuvvet potansiyel enerjileri göz önüne alınır.



Şekil 2.2. Basit mesnetli lamina cam kiriş, geometri ve yükleme.

Böylece lamina camdaki toplam potansiyel enerji aşağıdaki gibi yazılır:

$$\Pi = U + V \quad (2.1)$$

$$\Pi = \sum_i (U_m^i + U_b^i) + U_{\tau_{xz}} + V \quad (2.2)$$

$$\Pi = \sum_{i=1}^2 \left\{ \int_V \frac{1}{2} E (\varepsilon_x^i)^2 dV + \int_V \frac{1}{2} E (\varepsilon_b^i)^2 dV \right\} + \int_V \frac{1}{2} G (\gamma_{xz})^2 dV - \int_L q dx - \frac{P}{2} w_L \quad (2.3)$$

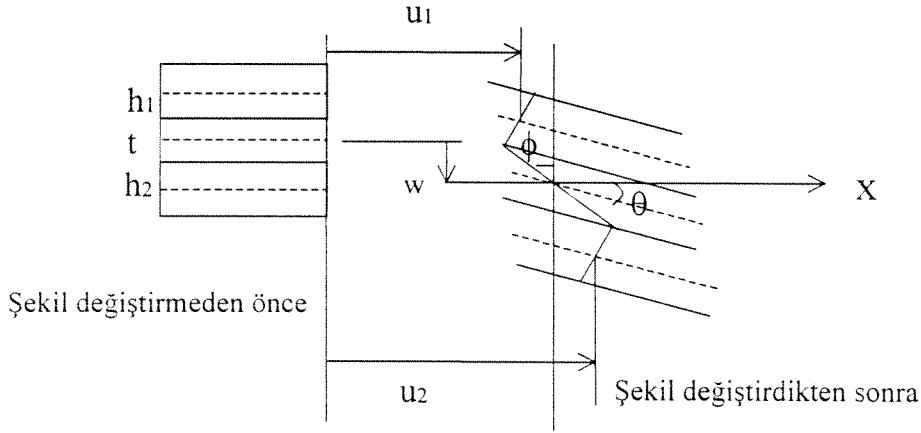
bu denklemlerde i cam tabaka sayısını, ilk terim camdaki aksenal gerinim enerjisi, ikinci terim camdaki eğilme gerinim enerjisi, üçüncü terim aratabakadaki kesme

gerinim enerjisi ve son iki terim ise uygulanan kuvvetlerden dolayı kuvvet potansiyel enerjisidir. Gerinmeler ise aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon_x^i = \frac{du_i}{dx} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_b = -z \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2.5)$$

$$\gamma_{xz} = \phi_x + \theta_x = \frac{u_1 - u_2 - \frac{dw}{dx} \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right)}{t} \quad (2.6)$$



Şekil 2.3. Şekil değiştirmeden önceki ve sonraki durum.

Değişim ilkeleri yöntemi ile toplam potansiyel enerjinin w , u_1 ve u_2 'ye göre değişimi alınarak sıfıra eşitlenir:

$$\delta\Pi[w]=0$$

$$\delta\Pi[u_1]=0$$

$$\delta\Pi[u_2]=0 \quad (2.7)$$

ve aşağıdaki üç türevsel denklem elde edilir:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \frac{d}{dx} \left\{ \frac{Gb}{t} \left[u_1 - u_2 - \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \frac{dw}{dx} \right] \right\} = q \quad (2.8)$$

$$\frac{dN_1}{dx} = \frac{Gb}{t} \left[u_1 - u_2 - \frac{dw}{dx} \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \right] \quad (2.9)$$

$$\frac{dN_2}{dx} = -\frac{Gb}{t} \left[u_1 - u_2 - \frac{dw}{dx} \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \right] \quad (2.10)$$

burada w yanal yerdeğiştirme, u_1 ve u_2 üst ve alt camlardaki eksenel yerdeğiştirmeler, E camın elastik modülü, G aratabaka PVB'nin kesme modülü ve I iki cam tabakanın eylemsizlik momentlerinin toplamıdır. Üst ve alt cam tabakalardaki eksenel kuvvetler N_1 ve N_2 :

$$N_1 = EA_1 \frac{du_1}{dx} \quad (2.11)$$

$$N_2 = EA_2 \frac{du_2}{dx} \quad (2.12)$$

Sınır şartları:

$$@ x = 0 \text{ (sol mesnet)} \quad w = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{d^2 w}{dx^2} = 0$$

$$N_1 = 0 \quad \text{ve} \quad N_2 = 0$$

$$@ x = L \text{ (orta nokta)} \quad \frac{dw}{dx} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{d^3 w}{dx^3} = -\frac{P}{2EI}$$

$$\frac{dN_1}{dx} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{dN_2}{dx} = 0 \quad (2.13)$$

Denklemler 2.8, 2.9 ve 2.10 analitik olarak çözülecektir.

2.3.2 Doğrusal olmayan durum (sabit mesnetli giriş)

Doğrusal olmayan durum için gerinme-yerdeğiştirme ilişkisi büyük yerdeğiştirmeler için aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon'_x = \frac{du_i}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \quad (2.14)$$

Toplam potansiyel enerjinin w , u_1 ve u_2 yerdeğiştirmelerine göre değişimi alınıp aşağıdaki gibi sıfıra eşitlenir.

$$\delta\Pi[w]=0$$

$$\delta\Pi[u_1]=0$$

$$\delta\Pi[u_2]=0$$

ve böylece aşağıdaki türevsel denklemler elde edilir:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^4 w}{dx^4} - \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \frac{d}{dx} \left\{ \frac{Gb}{t} \left[u_1 - u_2 - \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \frac{dw}{dx} \right] \right\} &= q + (N_1 + N_2) \frac{d^2 w}{dx^2} \\ \frac{dN_1}{dx} &= \frac{Gb}{t} \left[u_1 - u_2 - \frac{dw}{dx} \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \right] \\ \frac{dN_2}{dx} &= -\frac{Gb}{t} \left[u_1 - u_2 - \frac{dw}{dx} \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

burada N_1 ve N_2 :

$$N_1 = EA_1 \left[\frac{du_1}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right] \quad (2.16)$$

$$N_2 = EA_2 \left[\frac{du_2}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right] \quad (2.17)$$

Sınır şartları:

$$@ x = 0 \text{ (sol mesnet)} \quad w = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{dw}{dx} = 0$$

$$u_1 = 0 \quad \text{ve} \quad u_2 = 0$$

$$@ x = L \text{ (orta nokta)} \quad \frac{dw}{dx} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{d^3w}{dx^3} = -\frac{P}{2EI}$$

$$u_1 = 0 \quad \text{ve} \quad u_2 = 0 \quad (2.18)$$

Denklemler 2.15 doğrusal değildir ve analitik olarak çözmek oldukça zordur. Bu nedenle sayısal çözüm yöntemi kullanılacaktır.

BÖLÜM 3

KURAMSAL ÇÖZÜMLER VE SONUÇLAR

3.1 Basit mesnetli kiriş için analitik çözüm

Türevsel denklemler 2.8, 2.9 ve 2.10 aşağıdaki biçimde yazılır:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + h \frac{d}{dx} (Gb\gamma) = q \quad (3.1)$$

$$\frac{dN_1}{dx} = Gb\gamma \quad (3.2)$$

$$\frac{dN_2}{dx} = -Gb\gamma \quad (3.3)$$

burada $h = t + \frac{h_1 + h_2}{2}$ ve $\gamma = \gamma_{xz} = \phi_x + \theta_x = \frac{u_1 - u_2 - \frac{dw}{dx} \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right)}{t}$

Sınır şartları daha önce belirtildiği gibi,

$$@ x = 0 \text{ (sol mesnet)} \quad w = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{d^2 w}{dx^2} = 0$$

$$N_1 = 0 \quad \text{ve} \quad N_2 = 0$$

$$\textcircled{a} \ x = L \text{ (orta nokta)} \quad \frac{dw}{dx} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{d^3 w}{dx^3} = -\frac{P}{2EI}$$

$$\frac{dN_1}{dx} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{dN_2}{dx} = 0$$

Toplam kesitsel kuvvet sabittir:

$$\frac{dN_1}{dx} + \frac{dN_2}{dx} = 0 \quad \text{böylece} \quad N_1 + N_2 = \text{sabit}$$

$$N_1 + N_2 = \text{sabit} = N_1(0) + N_2(0) = 0$$

$$N_1 = -N_2$$

Denklem (3.2)'yi denklem (3.1)'e yerleştirirsek aşağıdaki denklemleri elde ederiz,

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + h \frac{d}{dx} \left(\frac{dN_1}{dx} \right) = q \quad \text{veya}$$

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + h \frac{d^2 N_1}{dx^2} = q \quad (3.4)$$

Aşağıdaki denklemi elde etmek için denklem (3.2)'nin $\left(\frac{dN_1}{dx} = \frac{Gb}{t} \left[u_1 - u_2 - h \frac{dw}{dx} \right] \right)$

türevi alınır.

$$\frac{d^2 N_1}{dx^2} = \frac{Gb}{t} \left[\frac{du_1}{dx} - \frac{du_2}{dx} - h \frac{d^2 w}{dx^2} \right] \quad (3.5)$$

Denklemler (2.11) $(N_1 = EA_1 \frac{du_1}{dx})$ ve (2.12)'yi $(N_2 = EA_2 \frac{du_2}{dx})$ kullanarak aşağı-

daki denklem elde edilir:

$$\frac{du_1}{dx} - \frac{du_2}{dx} = \frac{N_1}{EA_1} - \frac{N_2}{EA_2} = \frac{N_1}{EA_1} + \frac{N_1}{EA_2} = \frac{N_1}{E} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \quad (3.6)$$

Denklemler (3.6) ve (3.5) kullanılarak denklem 3.7 elde edilir.

$$\frac{d^2 N_1}{dx^2} = \frac{Gb}{t} \left[\frac{A_1 + A_2}{EA_1 A_2} N_1 - h \frac{d^2 w}{dx^2} \right] \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'yi tekrar düzenleyerek ve iki kere türevini alarak (3.8) ve (3.9) elde edilir:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{1}{h} \frac{A_1 + A_2}{EA_1 A_2} N_1 - \frac{1}{h} \frac{t}{Gb} \frac{d^2 N_1}{dx^2} \quad (3.8)$$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{1}{h} \frac{A_1 + A_2}{EA_1 A_2} \frac{d^2 N_1}{dx^2} - \frac{1}{h} \frac{t}{Gb} \frac{d^4 N_1}{dx^4} \quad (3.9)$$

Denklemler (3.9) ve (3.4) kullanılarak aşağıdaki 4. derece türevsel denkleme erişilir,

$$\frac{d^4 N_1}{dx^4} - \left[\frac{Gb}{Et} \left(\frac{A_1 + A_2}{A_1 A_2} + \frac{h^2}{I} \right) \right] \frac{d^2 N_1}{dx^2} = - \frac{Gb}{Et} \frac{h}{I} q$$

ve kısaca aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{d^4 N_1}{dx^4} - \lambda^2 \frac{d^2 N_1}{dx^2} = -\beta q \quad (3.10)$$

burada

$$\lambda^2 = \frac{Gb}{Et} \left(\frac{A_1 + A_2}{A_1 A_2} + \frac{h^2}{I} \right) \quad \beta = \frac{Gb}{Et} \frac{h}{I}$$

Sınır şartları denklem (3.10)'a uygun olarak yeniden yazılır:

$$@ x = 0 \text{ (sol mesnet)} \quad N_1 = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{d^2 N_1}{dx^2} = 0$$

$$@ x = L \text{ (kiriş orta noktası)} \quad \frac{dN_1}{dx} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{d^3 N_1}{dx^3} = \beta \frac{P}{2} \quad (3.11)$$

Bu sınır değer probleminin çözümü aşağıdaki gibi verilir:

$$N_1 = \frac{\beta}{\lambda^4} q - \frac{\beta}{\lambda^2} \left(qL + \frac{P}{2} \right) x + \frac{\beta}{\lambda^2} \frac{q}{2} x^2 - \frac{\beta}{\lambda^4} q \frac{\cosh \lambda(x-L)}{\cosh \lambda L} + \frac{\beta}{\lambda^3} \frac{P}{2} \frac{\sinh \lambda x}{\cosh \lambda L} \quad (3.12)$$

Burada $N_2 = -N_1$ dir ve eğilme momenti aşağıdaki gibi elde edilir,

$$M = EI \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{EI}{h} \frac{A_1 + A_2}{EA_1 A_2} N_1 - \frac{EI}{h} \frac{t}{Gb} \frac{d^2 N_1}{dx^2}$$

$$M = \frac{A_1 + A_2}{A_1 A_2} \frac{I}{h} N_1 - \frac{Et}{Gb} \frac{I}{h} \frac{d^2 N_1}{dx^2}$$

Basitleştirmek için $\frac{1}{\alpha} = \frac{A_1 + A_2}{A_1 A_2} \frac{I}{h}$ ve $\frac{Et}{Gb} \frac{I}{h} = \frac{1}{\beta}$ tanımlamaları yapılır ve

aşağıdaki denkleme ulaşılır:

$$M = \frac{1}{\alpha} N_1 - \frac{1}{\beta} \frac{d^2 N_1}{dx^2} = \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'ün iki defa tümlevi alınır ve sınır şartları kullanılarak yanal yerdeğiştirme aşağıda verildiği gibi tümlev biçiminde elde edilir:

$$w(x) = \frac{1}{EI} \left[-\frac{1}{\alpha} \int_0^x \int_t^L N_1(s) ds dt - \frac{1}{\beta} N_1 \right] \quad (3.14)$$

Camların yüzeylerindeki gerilmeler ise aşağıdaki şekilde açıklanır:

$$\sigma_1^{\text{üst}} = \frac{M}{I} \frac{h_1}{2} + \frac{N_1}{A_1} \quad (3.15)$$

$$\sigma_1^{\text{alt}} = -\frac{M}{I} \frac{h_1}{2} + \frac{N_1}{A_1} \quad (3.16)$$

$$\sigma_2^{\text{üst}} = \frac{M}{I} \frac{h_2}{2} + \frac{N_2}{A_2} \quad (3.17)$$

$$\sigma_2^{\text{alt}} = -\frac{M h_2}{I} + \frac{N_2}{A_2} \quad (3.18)$$

3.2 Sabit mesnetli kirişin doğrusal olmayan davranışının ANSYS ile modellenmesi

Sabit mesnetli kiriş için türetilen denklemler (2.15) doğrusal değildir. Bu nedenle basit mesnetli kirişin davranışını çözebilmek için sayısal yöntem kullanılması gerekir. Denklem takımı (2.15) sonlu farklar yöntemiyle çözülür ya da sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Çok bilinen sonlu elemanlar yöntemini uygulamak için hazır sonlu elemanlar programı ANSYS kullanılmıştır. 4 düğümlü düzlemsel gerilme elemanı doğru sonuçlar elde etmek için yeterli olmuştur. Çözüm için 0.5, 0.75, 1 ve 1.5 metre uzunlukta, 50 mm genişlikte ve 2.12+0.76+2.12 (üst camın kalınlığı+aratabaka kalınlığı+alt camın kalınlığı) kalınlıkta lamina cam kirişler seçilmiştir. Karşılaştırma amaçlı olarak tabakalı ve yekpare cam kirişler için de çözüm yapılmıştır. Statik durumda doğrusal olmayan çözümler için ANSYS programının büyük yerdeğiştirme seçeneği kullanılmıştır.

3.3 Sonuçlar ve tartışma

3.3.1 Basit mesnetli kiriş için analitik çözüm sonuçları

3.3.1.1 Geçiş sıcaklığı için kuramsal ve deneysel sonuçlar

Edel (1997) lamina cam kirişler kullanarak 1997 yılında 3-noktalı eğilme deneyleri yaptı. Deneylerde kullandığı örnekler 0.6096 m uzunluğunda, 0.1524 m genişliğindeydi. Camların kalınlığı 3.2004 mm aratabakanın kalınlığı 1.524 mm,

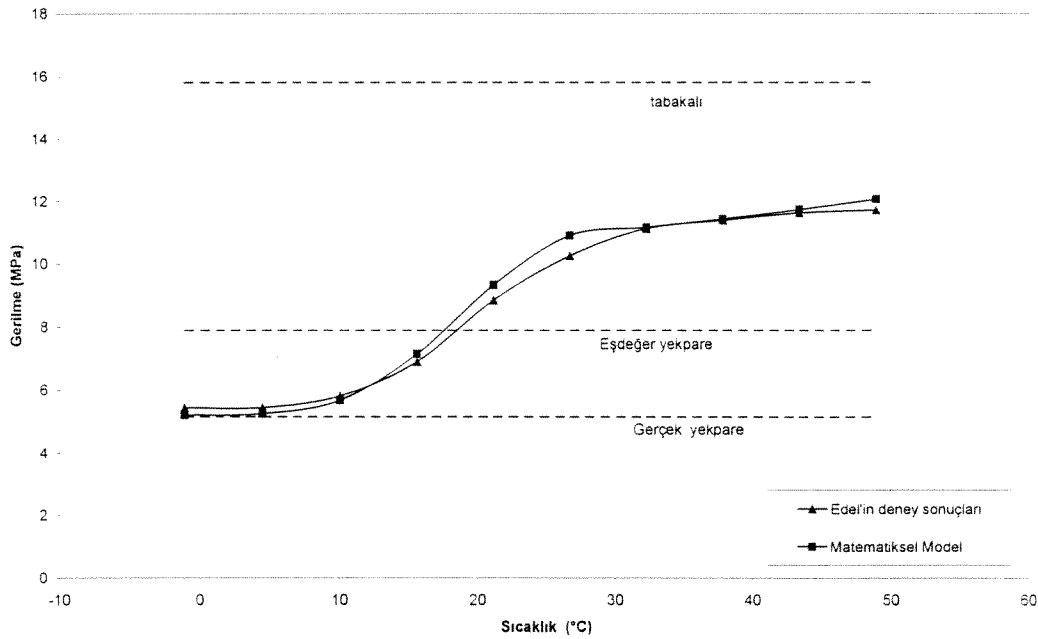
camın elastik modülü 64.5 GPa ve kirişin ortasından uygulanan noktasal yük ise 92.56 N idi. Gerilme ölçümleri krişin orta noktasının 0.1016 mm solundan alındı.

Bu çalışmada geliştirilen modelin yeterliliğini anlamak için modelden elde edilen sonuçlar Edel'in deney sonuçlarıyla Tabo 3.1 ve Şekil 3.1'de karşılaştırıldı.

Tablo 3.1. Model sonuçlarıyla Edel'in deney sonuçlarının karşılaştırılması

T (°C)	G (MPa)	Edel'in Deney Sonuçları (MPa)	Matematiksel Model (MPa)	Hata %
-1.11	45.00	5.45	5.21	-4.33
4.44	25.00	5.45	5.26	-3.52
10.00	8.00	5.82	5.69	-2.28
15.56	2.50	6.90	7.15	3.60
21.11	1.00	8.85	9.32	5.32
26.67	0.57	10.25	10.89	6.27
32.22	0.52	11.11	11.15	0.32
37.78	0.47	11.38	11.42	0.40
43.33	0.42	11.62	11.72	0.90
48.89	0.37	11.70	12.05	2.97

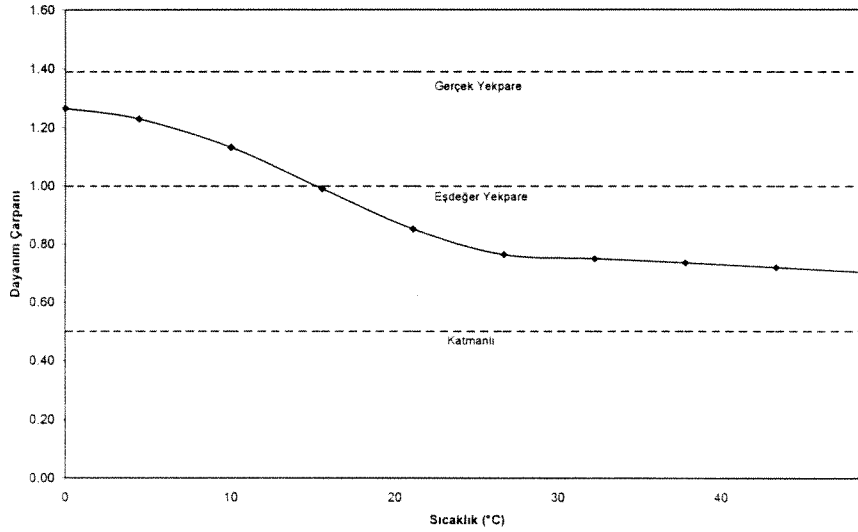
Üstteki tablodan ve alttaki grafikten görüldüğü gibi basit mesnetli kiriş için geliştirilen matematiksel model ve analitik çözüm oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Böylece matematiksel model doğrulanmış olmaktadır.



Şekil 3.1. Deneyel (Edel) ve kuramsal sıcaklık geçiş eğrisi.

3.3.1.2 Yumuşak ve sert PVB için geçiş aralığı

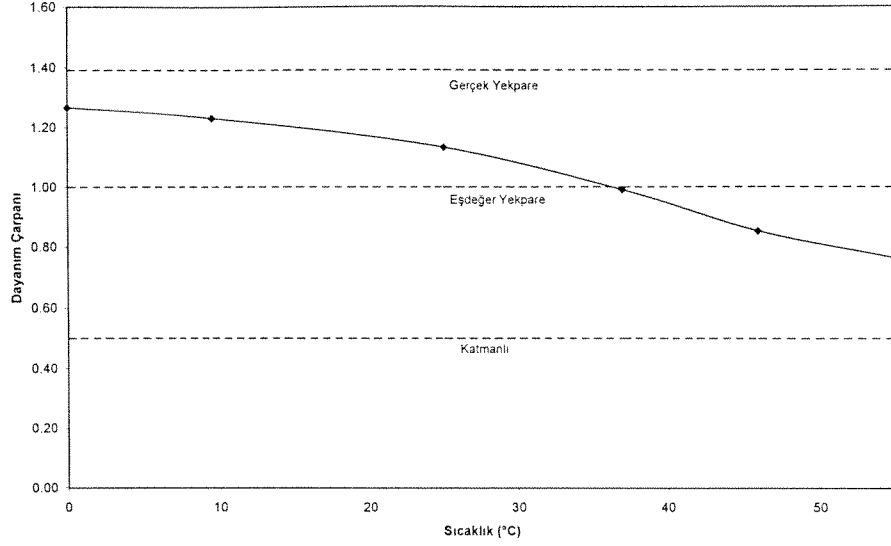
Yumuşak ve sert aratabakaya sahip kirişler için dayanım çarpanının sıcaklığa göre değişimi şekil 3.2 ve 3.3’de verilmiştir. Bu grafiklerin çiziminde ve diğer bölümlerde kullanılan veriler şöyledir: kiriş uzunluğu 0.5 m, genişliği 5 cm, kalınlığı 2.12+0.76+2.12 mm ve ortada uygulanan nokta yük 50 N’dır. Camın elastik modülü 64.5 GPa ve PVB’nin kesme modülü Tablo 3.2’de çeşitli sıcaklıklarda yumuşak ve sert PVB için verilmiştir.



Şekil 3.2. Yumuşak PVB kullanıldığında dayanım çarpanının sıcaklık ile değişimi.

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi yumuşak PVB kullanıldığında dayanım çarpanı 1.27 ile 0.70 arasında değişmektedir. Yumuşak PVB kullanıldığında lamina cam için sıcaklık geçişi 10 ile 25° C arasındadır.

Sert PVB (Şekil 3.3) kullanıldığında ise farklılık gözlenmektedir. Örneğin 37°C’de dayanım çarpanı (DÇ) hala 1.0’dır. 46° C’de 0.85, 55° C’de ise 0.76’ya düşmektedir.



Şekil 3.3. Sert PVB kullanıldığında dayanım çarpanının sıcaklık ile değişimi.

Bunun anlamı sıcaklık geçişinin 46° C'den sonra başlamasıdır.

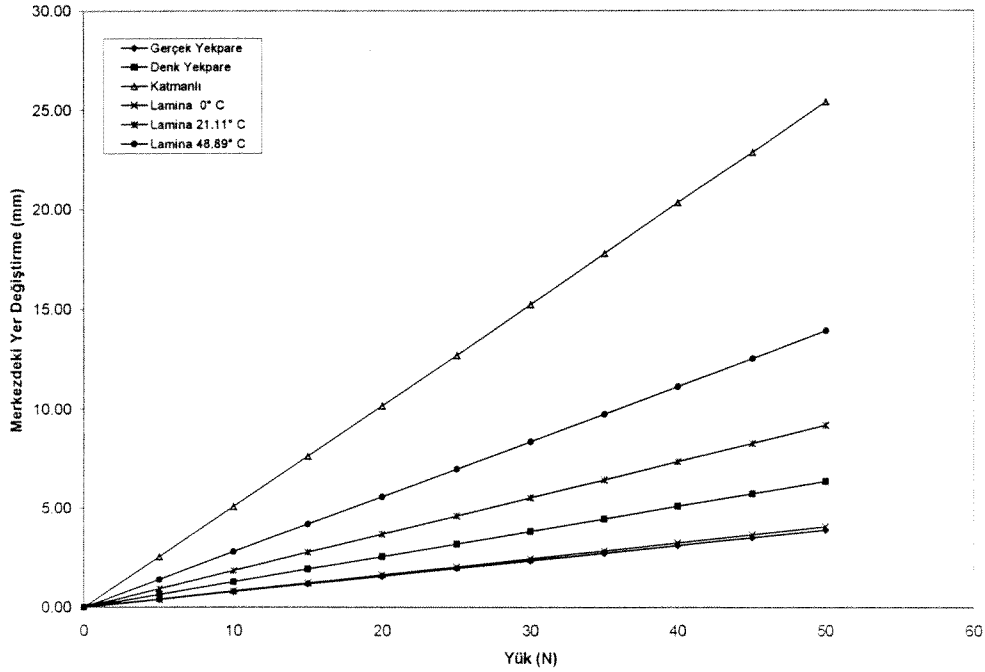
Yumuşak ve sert PVB için kesme modülü Tablo 3.2'de çeşitli sıcaklıklar için verilmiştir (Hooper 1973). Yumuşak ve sert PVB ayrımı için plastisayzır içeriği önemli olduğundan lamina krişlerin DÇ'nin belirlenmesinde de PVB'nin plastisayzır içeriği önemlidir.

Tablo 3.2. Sıcaklığa göre yumuşak ve sert PVB'nin kesme modülü.

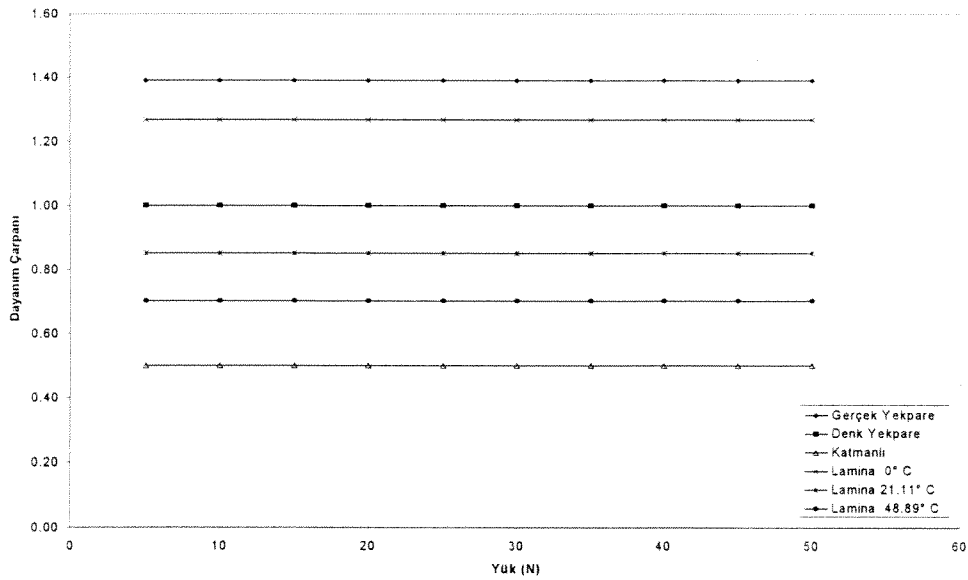
G (MPa)	Yumuşak T (°C)	Sert T (°C)
45.00	0.00	0.50
25.00	4.44	9.50
8.000	10.00	25.00
2.500	15.56	37.00
1.000	21.11	46.00
0.568	26.67	55.00

3.3.1.3 Basit mesnetli kiriş için yerdeğiştirme ve dayanım çarpanı

Şekil 3.4'te görüldüğü üzere yerdeğiştirme-yük ilişkisi doğrusaldır. Şekil 3.5'te verilen DÇ-yük ilişkisi sabittir ve geçiş bölgesi yoktur.



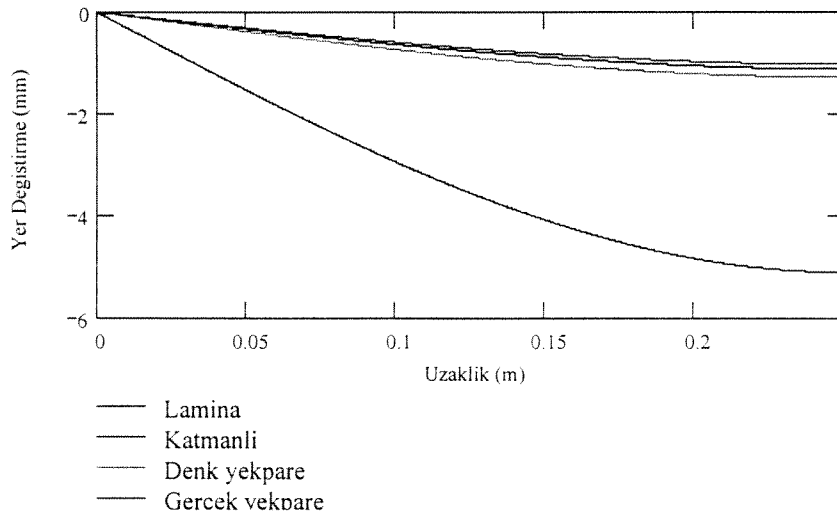
Şekil 3.4. Basit mesnetli kiriş için enbüyük yerdeğiştirme-yük grafiği.



Şekil 3.5. Basit mesnetli kiriş için DÇ'nin yük ile değişimi.

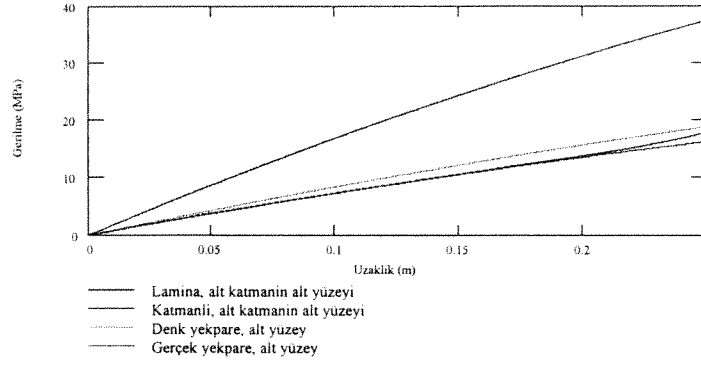
3.3.1.4 Kiriş uzunluğu boyunca yerdeğiştirme ve gerilme işlevleri

Şekiller 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 ve 3.11 lamina camın sıcaklık ile nasıl davrandığı görmek için tabakalı, eşdeğer(denk) yekpare ve gerçek yekpare cam davranışı ile birlikte -1.11°C , 21.11°C ve 48.89°C için çizilmiştir. Bu grafiklerin elde edilmesi için daha önce verilen noktasal yüke ek olarak 200 N/m 'lik düzgün yayılı yük uygulanmıştır.



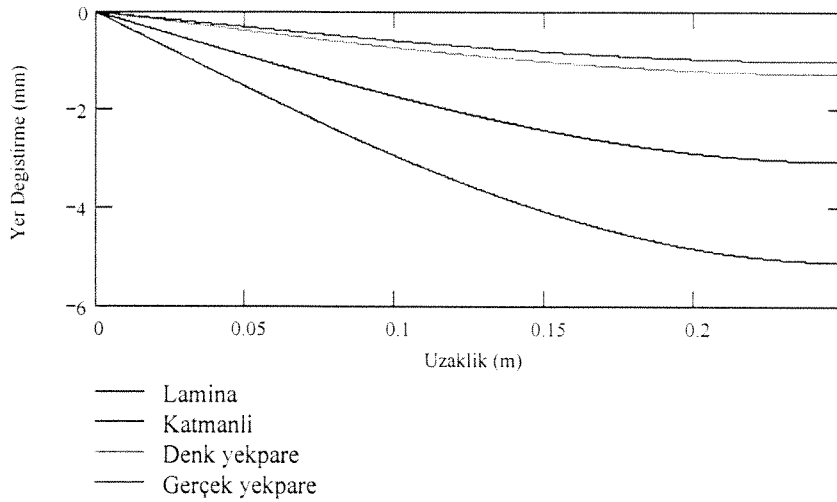
Şekil 3.6. Kirişin yarısı boyunca -1.11°C sıcaklıkta yerdeğiştirme grafiği.

Şekil 3.6'de yerdeğiştirme-yük ve 3.7'da aksenal gerilme-yük grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde lamina camın davranışı gerçek yekpare camındaki gibidir. Bunun nedeni sıcaklık çok düşük olduğu için aratabakanın kesme modülü oldukça yüksektir. Tabakalı camın davranışı ise beklendiği gibi diğer cam kirişlerden oldukça farklıdır: büyük yerdeğiştirmeler, yüksek gerilmeler. Dikkat edilmesi gereken diğer nokta ise lamina camdaki yerdeğiştirmelerin ve gerilmelerin eşdeğer yekpare camın yerdeğiştirmelerinden ve gerilmelerinden küçük olmasıdır. Böylece lamina cam kirişlerin davranışı için alt sınır eşdeğer yekpare cam kirişlerin davranışı değil gerçek yekpare cam kirişlerin davranışıdır.

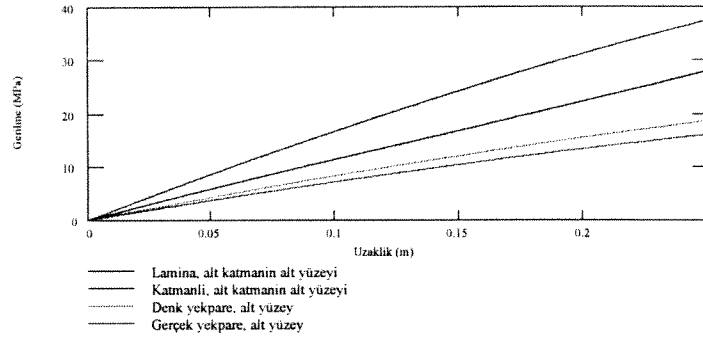


Şekil 3.7. Krişin yarısı boyunca -1.11°C sıcaklıkta gerilim grafiği.

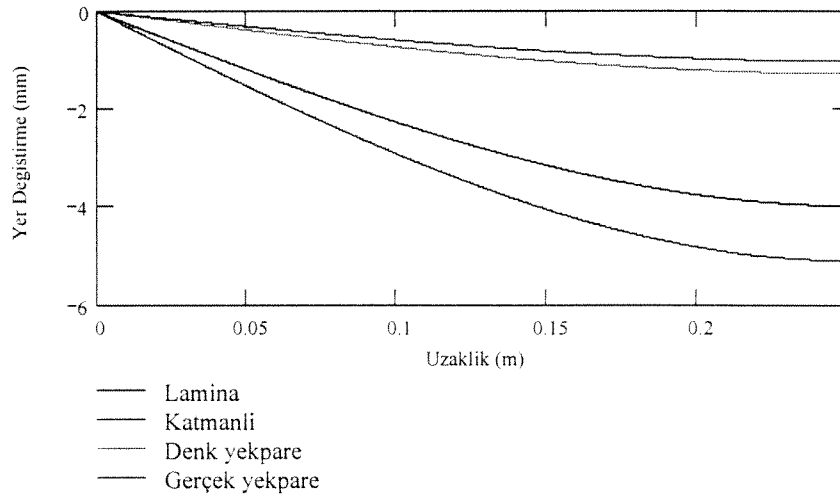
Şekiller 3.8 ve 3.9 21.11°C sıcaklıkta elde edilen verilere göre çizilmiştir. Bu grafiklerde lamina camın davranışı gerçek yekpare cam ve tabakalı cam giriş davranışlarının ortasına düşmektedir. Sıcaklık 48.89°C olduğunda davranışı anlamak için Şekiller 3.10 ve 3.11 çizilmiştir. Bu sıcaklıkta aratabakanın kesme modülü oldukça düşüktür ve lamina camın davranışı tabakalı camın davranışına yaklaşmaktadır.



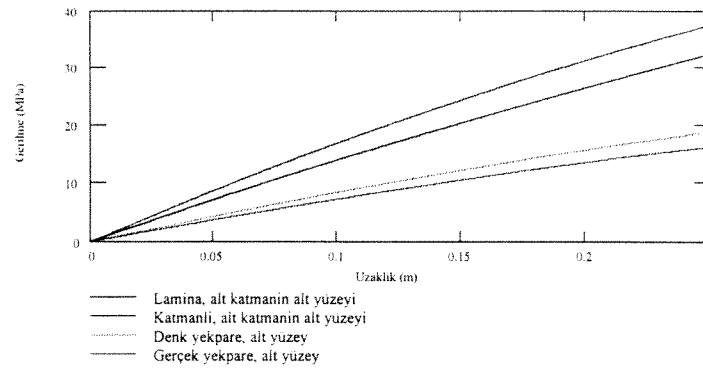
Şekil 3.8. Krişin yarısı boyunca 21.11°C sıcaklıkta yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 3.9. Krişin yarısı boyunca 21.11° C sıcaklıkta gerilme grafiği.



Şekil 3.10. Krişin yarısı boyunca 48.89° C sıcaklıkta yerdeğiştirme grafiği.



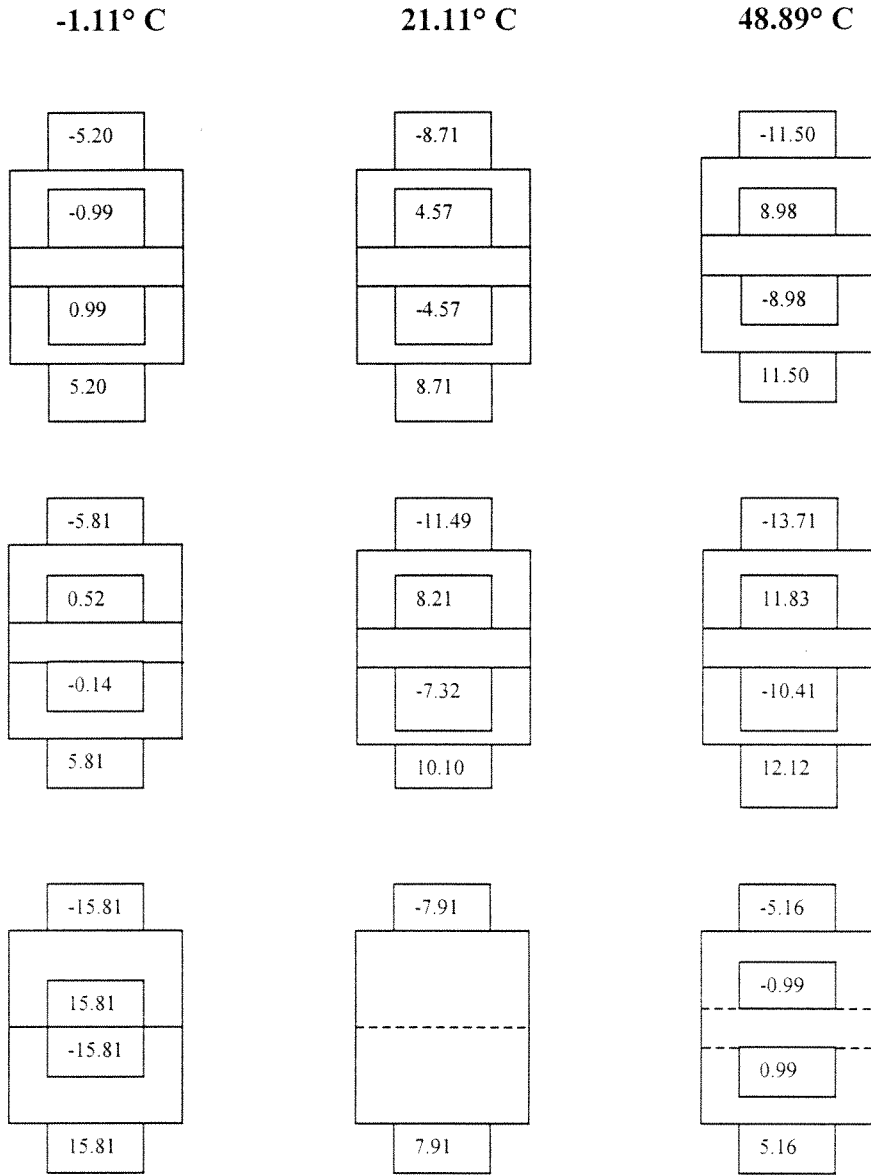
Şekil 3.11. Krişin yarısı boyunca 48.89° C sıcaklıkta gerilme grafiği.

3.3.1.5 Kesitte gerilme dağılımı

Kiriş kesitindeki gerilme dağılımı Şekil 3.12'de verilmiştir. Gerilmeler -1.11°C , 21.11°C ve 48.89°C sıcaklıklar içindir. İlk sırada bu çalışmada geliştirilen modelden elde edilen gerilmeler, ikinci sırada Edel'in (1997) çalışmasından elde edilen gerilmeler verilmiştir. Kullanılan veriler de Edel'in (1997) çalışmasında kullanılan verilerdir. Yine aynı veriler kullanılarak son sırada tabakalı, eşdeğer yekpare ve gerçek yekpare cam kirişlerin kesitlerinde oluşan gerilmeler verilmiştir. (geometri ve malzeme özellikleri: kiriş uzunluğu: 0.6096 m; kiriş genişliği: 0.1524 m; tek cam kalınlığı: 3.2004 mm; PVB kalınlığı: 1.524 mm; cam elastik modülü: 64.5 Gpa; kirişin ortasında uygulanan noktasal yük:92.56 N; PVB'nin kesme modülü ise sıcaklığa göre Tablo 3.1'de verilmiştir).

Modelden elde edilen sonuçlarda bakışıklık izlenmektedir. Bunun nedeni aratabakanın yükleme yönünde sıkışmadığı, yerdeğiştirmediği varsayımıdır. Sıcaklık -1.11°C iken tarafsız eksen aratabakada yer almaktadır. Sıcaklık arttıkça tarafsız eksenler camın ortasına doğru ilerlemektedir. Tabakalı kirişte bilindiği gibi tarafsız eksenler cam kalınlığının tam ortasına düşer. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü sıcaklık arttıkça PVB'nin kesme modülü düşmekte ve lamina cam kirişin davranışı tabakalı kiriş davranışına yaklaşmaktadır. Dikkat edilirse, lamina cam kirişte sıcaklık yükseldikçe gerilmeler artmaktadır.

Son sıradaki şekillerde en yüksek gerilmeleri tabakalı cam kirişin kesitinde en düşük gerilmeleri ise gerçek yekpare cam kirişin kesitinde görüyoruz.



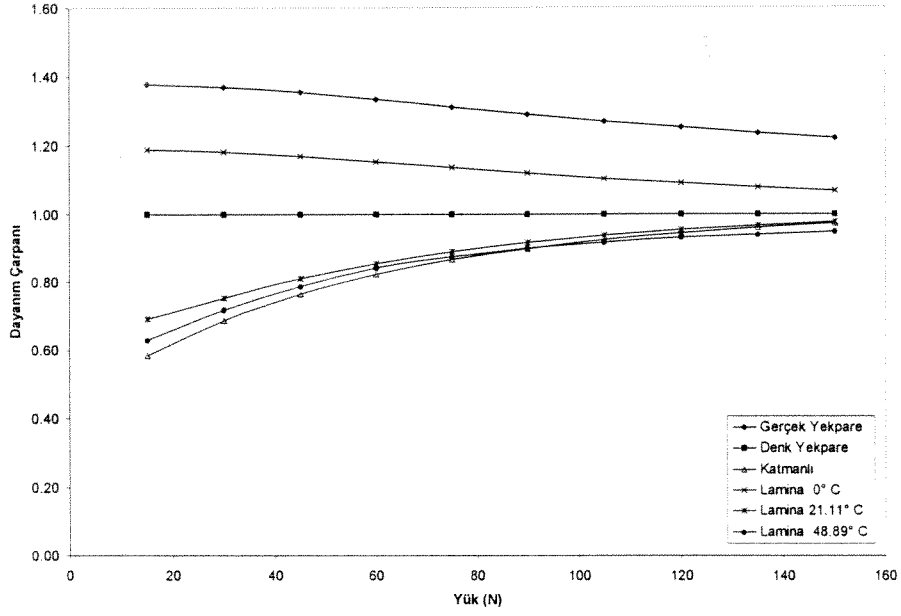
Şekil 3.12. Cam kiriş kesitinde gerilme dağılımı

3.3.2 Sabit mesnetli kirişler

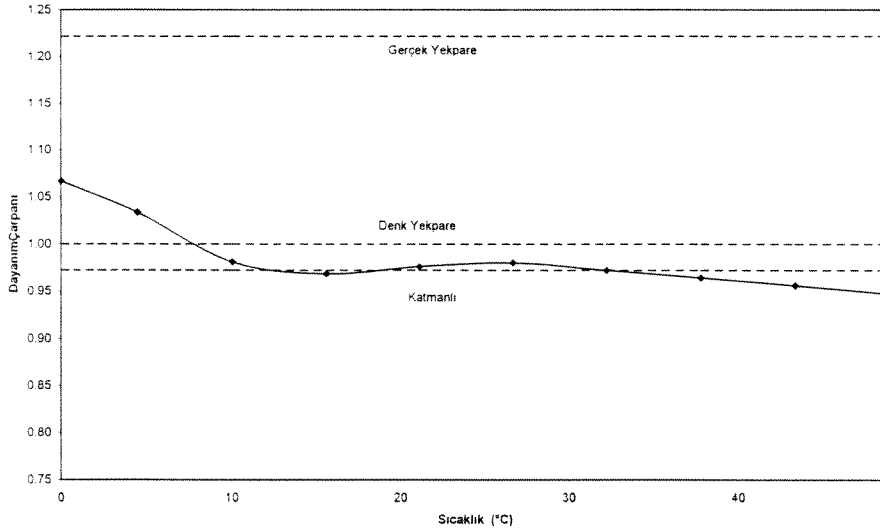
Sabit mesnetli kirişlerde, basit mesnetli kirişlerde oluşmayan, sınır şartlarından kaynaklanan halat kuvvetleri benzeri eksenel kuvvetler oluşmaktadır. Bu kuvvetler sabit mesnetli kirişlerde doğrusal olmayan davranışa yol açmaktadır. Bu nedenle sabit mesnetli kirişlerin çözümlenmesinde büyük yerdeğiştirme çözümlenmesi yapmak gerekir. Aşağıdaki alt başlıklarda sabit mesnetli kirişlerin doğrusal olmayan davranışı göz önüne alınarak yapılan çalışmalar sunulmuştur. Kullanılan veriler kısım 3.2'de verilen verilerdir: 0.5, 0.75, 1 ve 1.5 metre uzunlukta, 50 mm genişlikte ve 2.12+0.76+2.12 (üst camın kalınlığı+aratabaka kalınlığı+alt camın kalınlığı) kalınlıkta lamina cam kirişler seçilmiştir. Karşılaştırma amaçlı olarak tabakalı ve yekpare cam kirişler için de çözüm yapılmıştır. Statik durumda doğrusal olmayan çözümlenme için ANSYS programının büyük yerdeğiştirme seçeneği kullanılmıştır. Camın elastik modülü 64.5 GPa, PVB'nin kesme modülü ise Tablo 3.1'den alınmıştır.

3.3.2.1 Geometri ve sıcaklık ile DÇ'nin değişimi

Açıklık/kiriş kalınlığı =100 için dayanım çarpanı yüke göre Şekil 3.13'te verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi yüksek yüklerde tüm eğriler $DÇ=1$ çizgisine yaklaşmaktadır. Yük 20 N iken lamina cam için DÇ aralığı 0.6-1.20 iken, yük 150 olduğunda yaklaşık 0.95-1.07 olmaktadır. Tabakalı kiriş için DÇ yük 150 N iken 0.97 oluğu görülmektedir. Tabakalı kirişin dayanım çarpanı 49°C derecede lamina kirişinkinden daha yüksektir. Şekil 4.21'de yük 150 N iken DÇ-sıcaklık grafiği verilmiştir. Bu grafikten görüleceği gibi DÇ yaklaşık olarak 0.95 ile 1.05 aralığındadır.



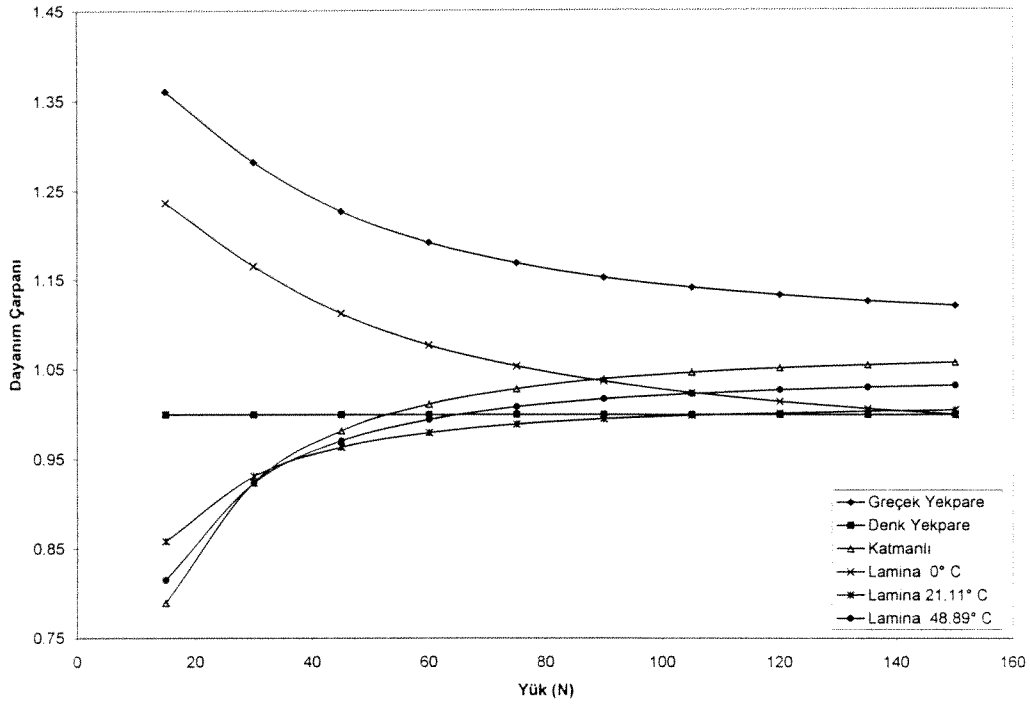
Şekil 3.13. DC'nin yük ile değişimi, açıklık/kalınlık = 100.



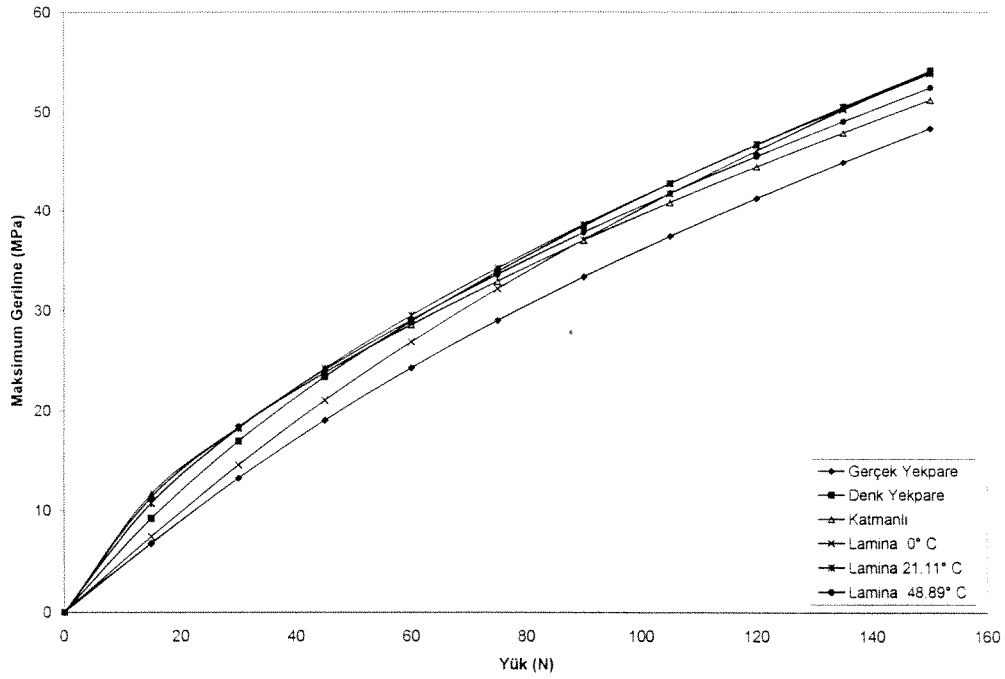
Şekil 3.14. DC'nin 150 N'da sıcaklık ile değişimi, açıklık/kalınlık = 100.

Şekiller 3.15, 3.16 ve 3.17 açıklık/kalınlık=150 değeri için çizilmiştir. Şekil 3.15 DC'nin çeşitli kirişler için yük ile değişimini vermektedir. Açıklık/kalınlık=100 için çizilen grafiklerle benzerlik göstermektedir. Fakat DC aralığı daha küçüktür. Şekil 3.16 enbüyük aksenal gerilmenin yük ile değişimini göstermek için çizilmiştir.

Gerçek yekpare cam kiriş alt sınır olarak belirgindir. Fakat üst sınır tabakalı cam kiriş değildir. Tabakalı cam kiriş bazı yüklerde üstte kalmakta bazı yüklerde ise lamina kiriş için çizilen gerilme eğrilerinin altına düşmektedir.



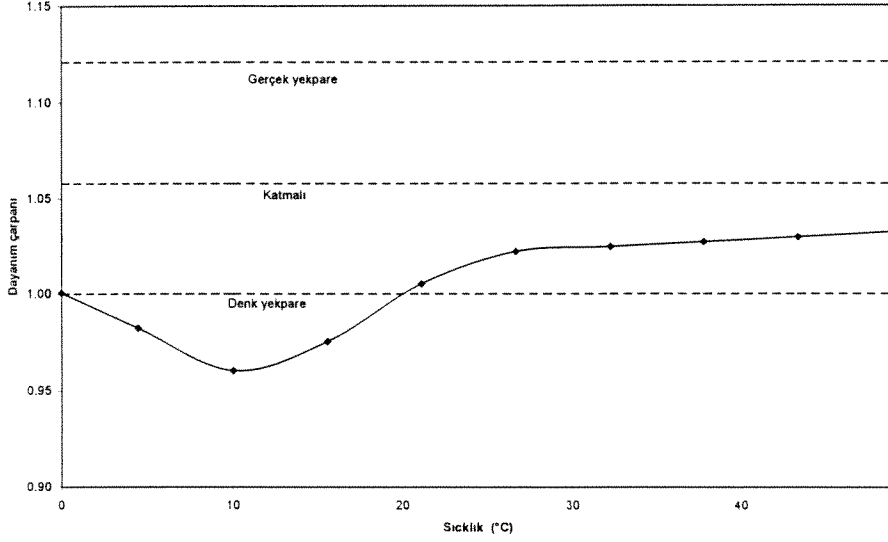
Şekil 3.15. DÇ'nin yük ile değişimi, açıklık/kalınlık = 150.



Şekil 3.16. Enbüyük çekme gerilmesinin yük ile değişimi, açıklık/kalınlık = 150.

Şekil 3.17 150 N'luk yük altında DÇ'nin sıcaklığa göre değişimi için çizilmiştir. Bu şekilde ilginç olan tabakalı cam kiriş sınırının eşdeğer yekpare cam kiriş sınırının üstünde olmasıdır. Bunun anlamı tabakalı cam kirişte, 0° C ile 49° C

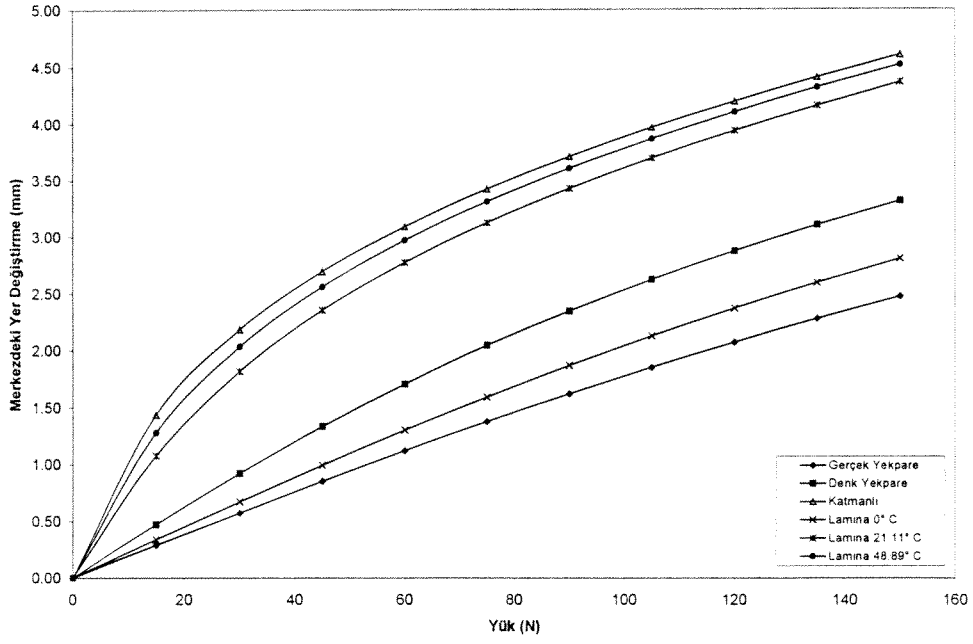
arasında, enbüyük gerilmeler eşdeğer yekpare kirişteki enbüyük gerilmelerin altında kalmasıdır.



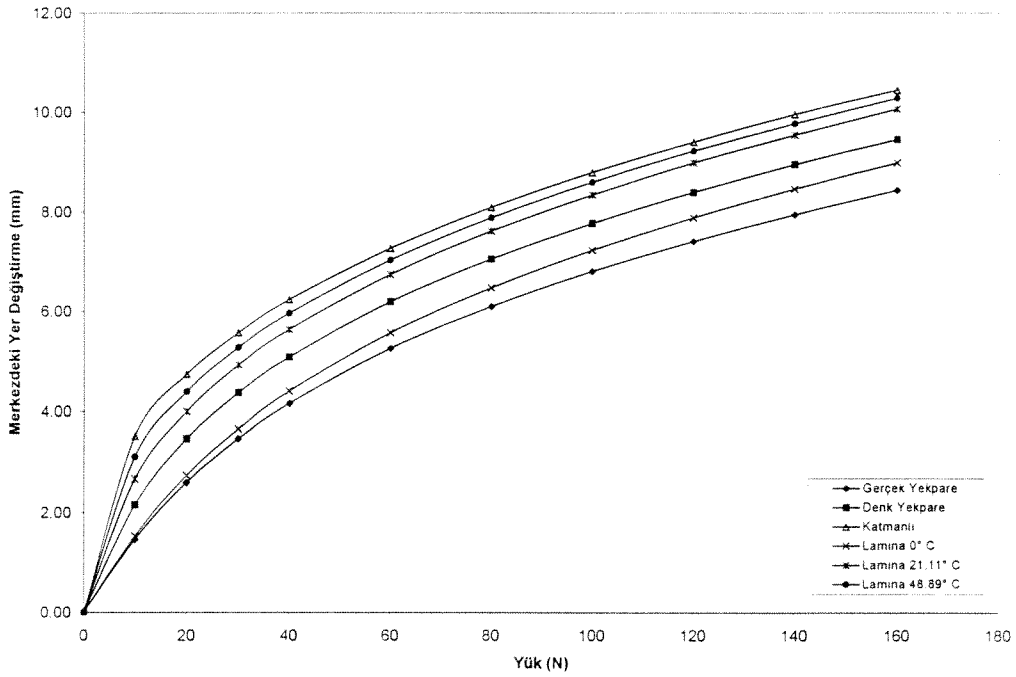
Şekil 3.17. DÇ'nin 150 N'da sıcaklık ile değişimi, açıklık/kalınlık = 150.

3.3.2.2 Kiriş merkezindeki yerdeğiştirme-yük eğrileri

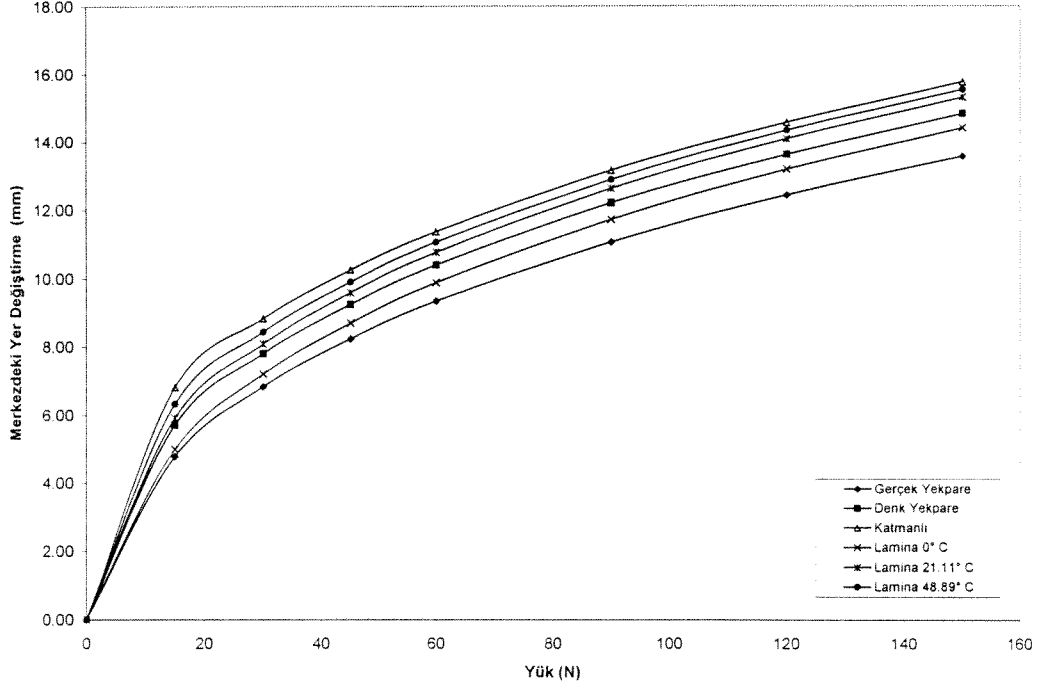
Şekiller 3.18, 3.19 ve 3.20 kiriş açıklığı/kiriş kalınlığı=100, 200 ve 300 oranları için kiriş merkezinde yerdeğiştirme-yük grafikleridir. Bu grafiklerdeki eğriler gerilme grafiklerinden farklı olarak aynı sırayı korumaktadır: (alttan üstte) gerçek yekpare, 0° C derecede lamina, eşdeğer yekpare, 21.11°C derecede lamina, 48.89°C derecede lamina ve tabakalı cam kiriş eğrileri. Açıklık/kalınlık oranı arttıkça eğriler birbirine yaklaşmaktadır, beklendiği gibi doğrusal olmama durumu daha belirginleşmektedir.



Şekil 3.18. Kiriş merkezindeki yerdeğiştirme-yük, açıklık/kalınlık =100.



Şekil 3.19. Kiriş merkezindeki yerdeğiştirme-yük, açıklık/kalınlık = 200.



Şekil 3.180. Kiriş merkezindeki yerdeğişirme-yük, açıklık/kalınlık = 300.

BÖLÜM 4

DENEYLER

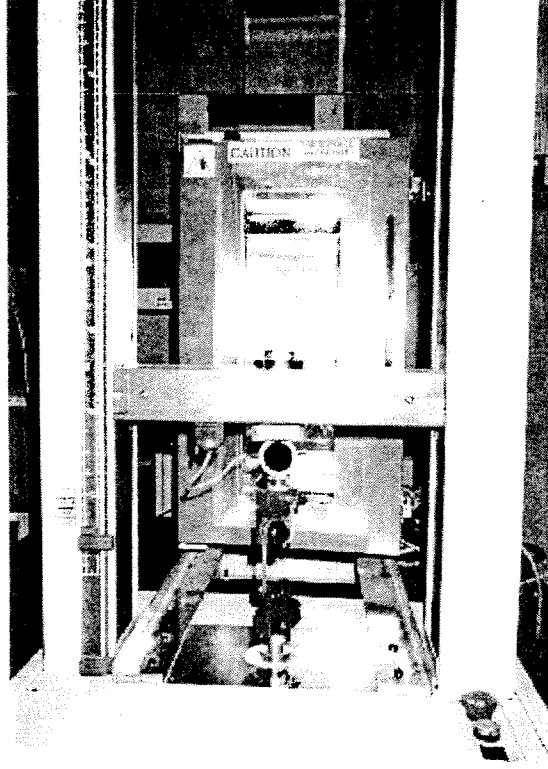
4.1 PVB deneyleri

4.1.1 Çekme deneyleri

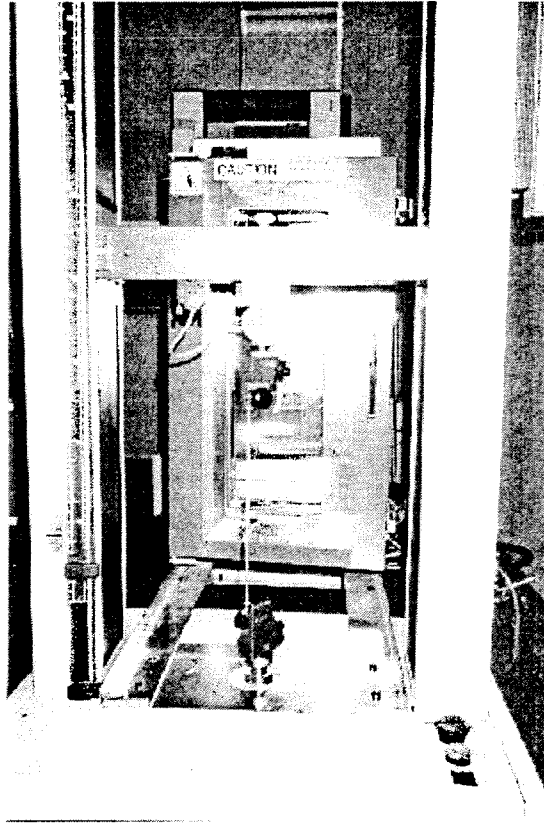
Çekme deneyleri Dupont, Saflex ve Sekusui üretimi PVB'lerle yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak PVB'nin kesme modülü elde edilmiştir. Deneyler oda sıcaklığı olan 22°C derecede, %32 ve %39 bağıl nem oranlarında yapıldı.

4.1.1.1 Numuneler

Numuneler gerdirilmiş ve gerdirilmemiş olarak iki tiptir. Ayrıca her tip renkli ve renksiz numune içermektedir. PVB'leri gerdirme işlemi yüksek sıcaklık altında yapılır. Renkli PVB'ler renkli lamina cam üretmek için kullanılmaktadır. Saflex, gerdirilmiş, gerdirilmemiş ve renkli olmak üzere üç grup içerir. Dupont numuneleri gerdirilmemiş, renkli gerdirilmemiş, gerdirilmiş ve renkli gerdirilmiş olarak dört gruba ayrılır. Sekusui ise sadece gerdirilmemiş ve gerdirilmiş olarak iki gruba ayrılır.



Şekil 4.1. PVB çekme deneyi düzenegi.



Şekil 4.2. PVB çekme deneyi.

Her grupta beş numene vardır. Her PVB numenesi 5mm genişliğinde ve 150mm uzunluğundadır. Numenelerin kalınlığı ise 0.65mm ile 0.78mm arasındadır.

4.1.1.2 Deney gereçleri

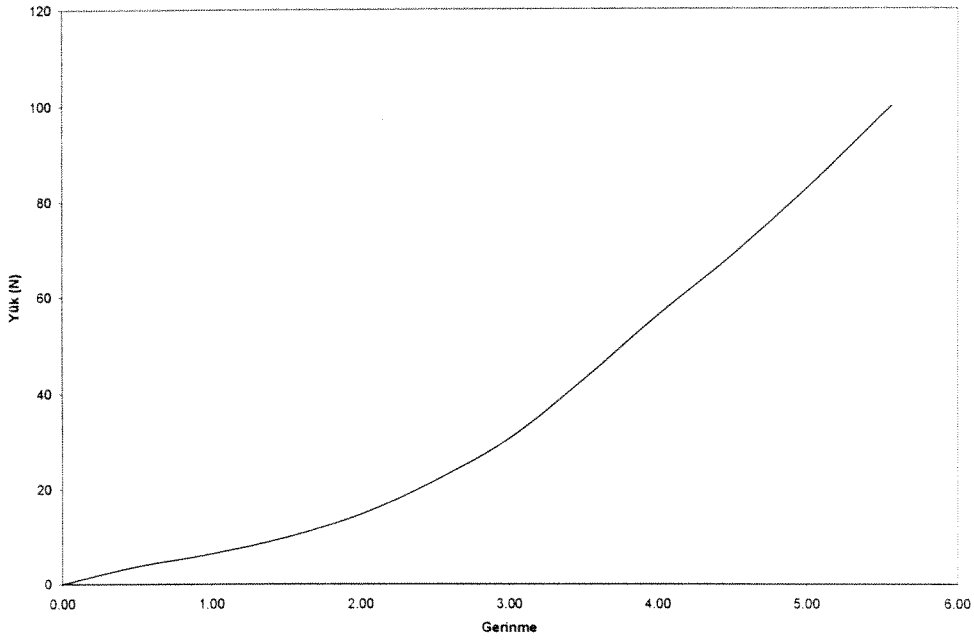
Lloyd Inst. Ltd. LS500 malzeme deney aracı ve DAPMAT v 3.21 yazılımı numelerin deneyinde kullanılmıştır. Numelerin uçları sarılıp vidayla sabitlenmiş ve gage uzunluğu 80mm olarak ayarlanmıştır.

4.1.1.3 Deneyin yapılışı

Örnekler, gerinmeler çoğu numunenin koptuğu 7'ye gelinceye kadar 25mm/dakika hızla çekildi.

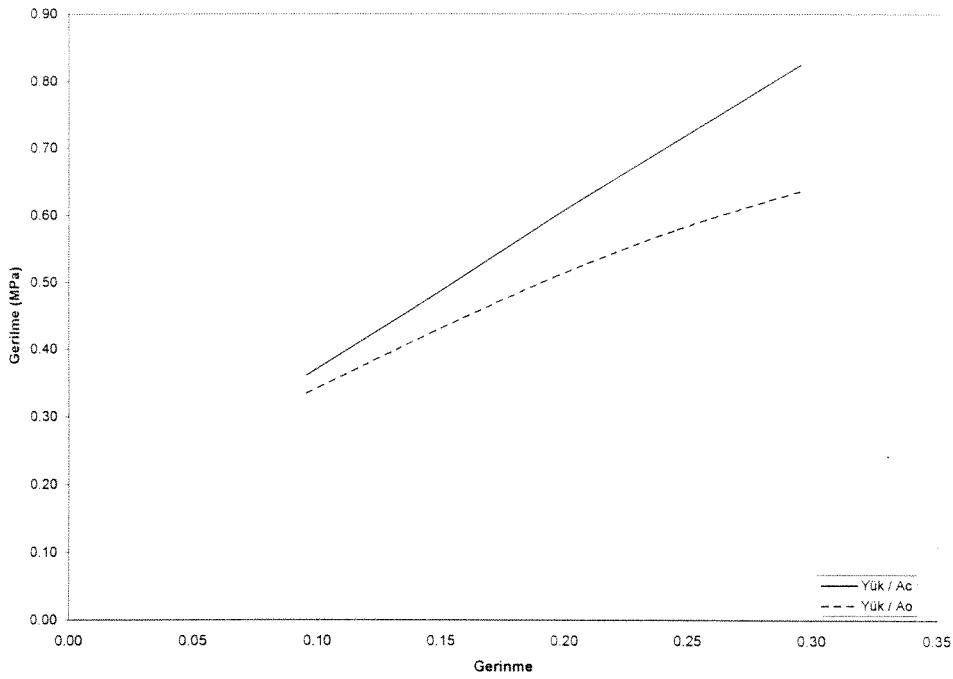
4.1.1.4 Sonuçlar

Deney sırasında, çekme altındaki PVB şeritlerinin kopmadan önce hayli yüksek gerinim değerlerine ulaştığı gözlemlendi. Kopmayan örneklerde, ölçümler deformasyonun %99'unun 4 saat içinde, tamamının ise 24 saat içinde kaybolduğu saptandı ki bu durum plastik deformasyon olmadığına işaret etmektedir. Grafikte de gözlenebileceği üzere örnekler, gevrek bir malzeme gibi aniden koptular. Diğer bir ilginç olgu ise örneklerin genişlik ve kalınlığının, markaya göre 3 ile 5 arasında değişen bir gerinim değerine dek son derece hızlı bir şekilde azaldıktan sonra, ki bu noktada yaklaşık yarı boyutlarına inmiş bulunuyorlardı, artık kopmaya kadar daha fazla bir azalma sergilememeleriydi. Şekil 4.3'teki gibi, yük-gerinim eğrisi çift-doğrusaldı: alçak eğimli doğrusal bir bölüm, 2 ile 4 gerinme değerleri arasında yer alan bir geçiş bölümü, ve neredeyse 40 kat fazla diklikte bir eğimle ikinci bir doğrusal bölüm.



Şekil 4.3. Çekme altındaki PVB için tipik yük-gerinim eğrisi.

Kesit alanı ilk bölümde çok hızlı değiştiği için, gerilim hesabında kullanılan alan, başlangıçtaki alan değil gerinimin bir fonksiyonuydu.



Şekil 4.4. Düzeltilmiş kesit alanı A_c ve ilk kesit alanı A_0 ile hesaplanan gerilmeler.

Bu bölgedeki Poisson oranı, Edel (1997)'daki gibi 0.40 olarak alındı; bu değer, sonlu elemanlar modellerinin sonuçları tarafından da doğrulanmış bir değerdi. Hem genişlik hem de kalınlık değiştiğinden dolayı,

$$w(\varepsilon_x) = w_0(1 - \nu\varepsilon_x)$$

$$t(\varepsilon_x) = t_0(1 - \nu\varepsilon_x)$$

$$A(\varepsilon_x) = w(\varepsilon_x) \times t(\varepsilon_x) = w_0 t_0 (1 - \nu\varepsilon_x)^2$$

$$A(\varepsilon_x) = A_c = A_0 (1 - \nu\varepsilon_x)^2$$

0.40 değeri gerçekte yüksek gerinimlerde sifıra ulaşmak üzere azalmaktadır; ancak uygulanan kuvveti bu değişken alanla bölmek, kuvvet-gerinim eğrisini başlangıçtan itibaren belli bir bölgede düzleştirmekte ve kirişlerin yer değiştirmelerinde gözlenen düşük gerinim değerleri için doğrusal bir gerilim-gerinim eğrisi ortaya çıkartmaktadır (Şekil 4.4). Buradan hesaplanan Young modülü daha sonra Poisson oranını yine 0.40 olarak kesme modülüne dönüştürülmüştür. Sonuçlar, aşağıda tabloalanmaktadır:

Table 4.1. Çekme deneylerinden elde edilen kesme modülleri. Sonuçlar kPa cinsindedir.

Test	sxns22	sxs22	sxcs22	dps22	dpcns22	dps22	dpcs22	skns22	sks22
1	784	897	701	638	726	560	580	446	449
2	815	805	705	536	606	563	664	457	420
3	700	891	624	564	646	541	692	466	446
4	689	806	630	504	594	550	664	464	421
5	758	891	784	558	671	494	653	448	451
Ortalama	749	858	665	541	629	554	671	456	437
St. Sapma	42	43	38	24	31	9	14	8	14
Oran (%)	5.6	5.0	5.7	4.3	4.9	1.6	2.0	1.8	3.2

Sonuçların kesinliği tatmin edicidir; standard sapmalar ortalamaların %5'inden azdır. Üstü çizili sayılar, eğilimin dışında oldukları için hesaplamaya katılmamışlardır. Renkli örneklerin modülü renksiz örneklerin modülüne göre Saflex için daha alçak; Dupont için ise daha yüksektir. Beri yandan, Saflex için gerilmiş örneklerin modülü gerilmemiş örneklerin modülüne göre daha yüksekse de, Dupont ve Sekusui için bu bakımdan önemli bir fark gözlenmemiştir. Saflex örnekleri, en

yüksek modüle sahiptir; 200 kPa geriden Dupont ve 300 kPa geriden Sekusui örnekleri gelmektedir.

4.1.2 Kesme deneyleri

Daha yüksek oda sıcaklıklarındaki davranış ve modülü belirlemek için kesme deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

4.1.2.1 Örnekler

Örnekler, 5+5 mm kalınlığında ve 50 mm kenar uzunluğunda kare örneklerdi. Örnekler, daha önceki deneylerde olduğu gibi Saflex, Dupont ve Sekusui firmalarından geliyordu. Saflex and Dupont örnekleri, renkli ve renksiz olarak iki sınıftı; buna karşılık, Sekusui örnekleri yalnız renksiz örneklerdi. Her grup için beş örnek kullanıldıysa da, bazı gruplar kimi camların düzgün kesilmemiş olmalarından dolayı daha az örnekten oluşuyorlardı. PVB kalınlıklarıyla ortamdaki sıcaklık ve nem, aşağıda gösterilmektedir:

Tablo 4.2. PVB numunelerinin kalınlığı ve deneyler için sıcaklık/nem şartları.

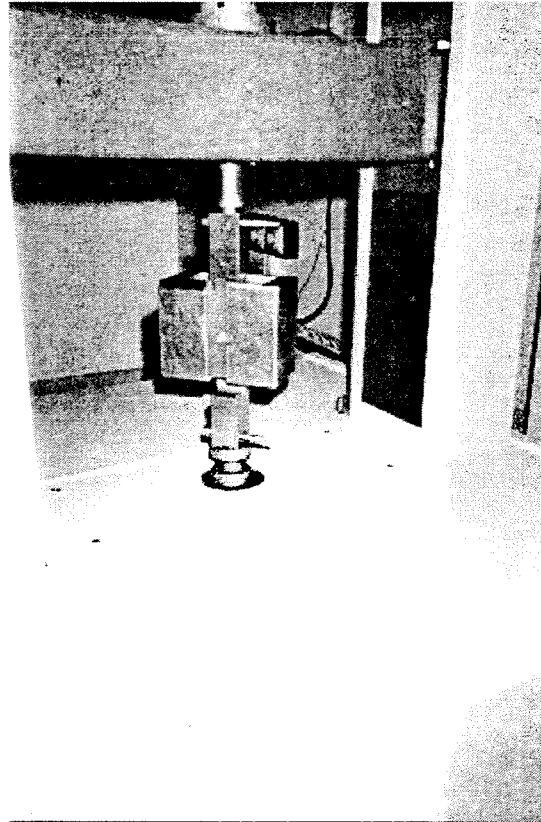
Şirket	Saflex		Dupont		Sekusui
	Renksiz	Renkli	Renksiz	Renkli	Renksiz
PVB Kalınlığı (mm)	0.46 ±0.02	0.49 ±0.01	0.41 ±0.01	0.40	0.44 ±0.02
Sıcaklık (°C)	29	29	28	28	26
Nem (%)	29	29	32	29	36

4.1.2.2 Deney gereçleri

Deneyler için Lloyd Inst. Ltd. LR50K malzeme deney gereci ile DAPMAT v 3.21 yazılımı kullanılmıştır.

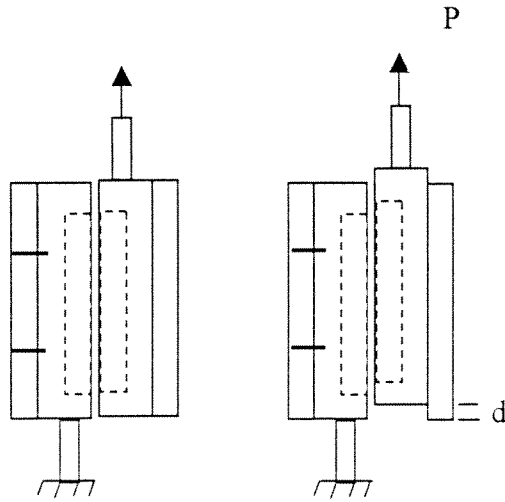


Şekil 4.5. PVB Kesme Deneyi kurulumu.



Şekil 4.6. Kesme kutuları.

Örneklere kesme kuvveti uygulamak için kullanılan gereç, iki cam tabakasını tutan iki kutudan oluşmaktaydı. Bir kutu üstteki basınç hücresine, diğeri ise makinenin tabanına bağlanmaktaydı. Alttaki kutuya, iki kutuyu da saran iki parça daha vidalanarak üst kutunun kesin olarak düşey bir düzlemde hareket etmesi güvence altına alındı. (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Kesme deneyi gereci.

4.1.2.3 Deney yapılışı

Örneklere, 0.048 mm/dk hızla aksenal gerinme uygulandı; bu gerinim, deney aygıtı tarafından ara katman üzerinde kesme gerinmesine çevrilmekteydi.

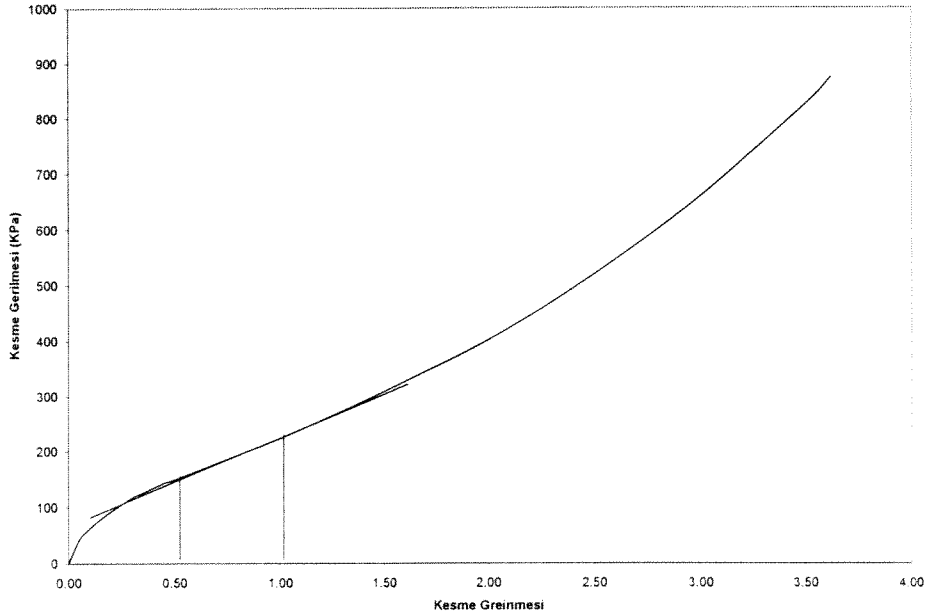
Kesme gerilmeleri ve gerinmeleri, aşağıdaki formüllerle hesaplandı:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad \gamma = \frac{d}{t}$$

4.1.2.4 Sonuçlar

Tipik gerilim-gerinim eğrisi dört bölgeden oluşmaktadır: 0.25 gerinim değerine kadar süren, her örnekte farklı eğime sahip olduğu için güvenilemeyecek bir

bölge; 0.5'ten 1.5'a kadar süren bir doğrusal bölge, 1.5'tan 2.0'a kadar süren bir geçiş bölgesi ve ilkinden daha yüksek eğime sahip ikinci bir doğrusal bölge. (Şekil 4.8). Kesme modülleri, eğri üzerinde 0.5 ile 1.0 gerinim değerlerine karşılık gelen iki nokta arasında çizilen çizginin eğiminden elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Kesme deneyleri için tipik kesme gerilim-gerinim eğrisi.

Tablo 4.3. Kesme deneylerinden elde edilen kesme modülü değerleri. Değerler kPa cinsindedir.

Test	shsx29	shcsx29	shdp28	shcdp28	shsk26
1	278	233	184	207	189
2	264	225	200	210	167
3	260	249	200	158	
4	229		169	197	197
5	240		227	194	182
Ortalama	260	236	195	202	189
St. Sapma	14	10	7	6	6
Oran (%)	5.2	4.2	3.8	3.2	3.3

Sonuçlar Tablo 4.3'te gösterilmektedir. Standart sapmalar ortlamaların % 5'inden azdır. Üzeri çizili rakamlar eğilimin dışında oldukları için değerlendirmeye katılmamışlardır. Çekme deneylerinde olduğu gibi, en yüksek modüle Saflex örnekleri sahiptir; onları, Dupont ve Sekusui izlemektedir. Renkli ve renksiz örnekler arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir.

4.2 Kiriş Deneyleri

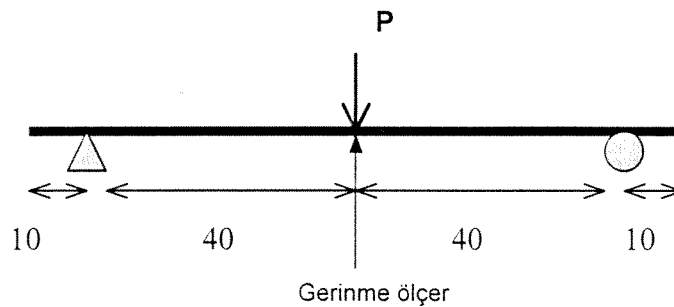
4.2.1 Örnekler

Serbest mesnetli kiriş deneylerinde, Trakya Şişe Cam Fabrikası'ndan gönderilen dört örnek kullanılmıştır.

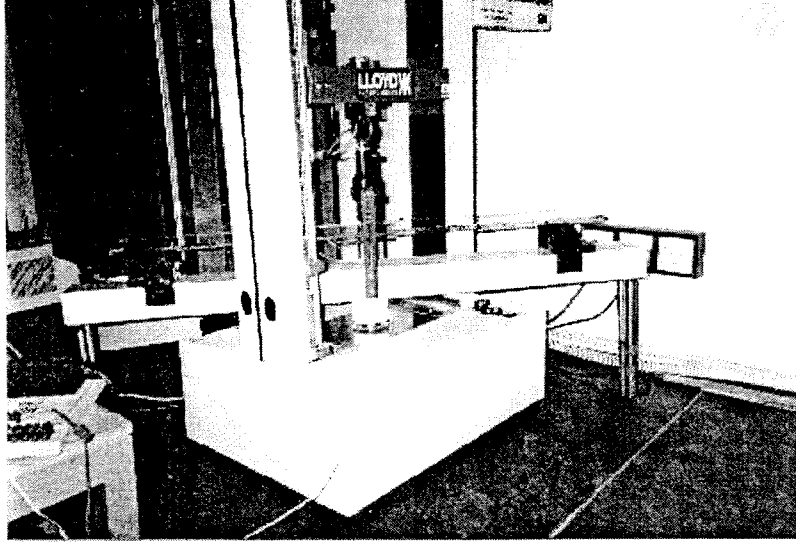
Üretici tarafından lamina camda kullanılan PVB'nin Saflex, Dupont veya Sekusui olduğu ifade edilmiş; çekme ve kesme deneylerinin sonuçları ile kiriş deneylerinden elde edilen gerilme ve yer değiştirme değerlerinden, söz konusu PVB'nin en yüksek kesme modülüne sahip Saflex marka olduğu sonucuna varılmıştır. Kirişlerin boyutları: 1.0 m uzunluk, 0.80 m açıklık, 10 cm kalınlık, 5+5 mm cam kalınlığı ve 0.38 mm ara katman kalınlığı.

4.2.2 Deney gereçleri

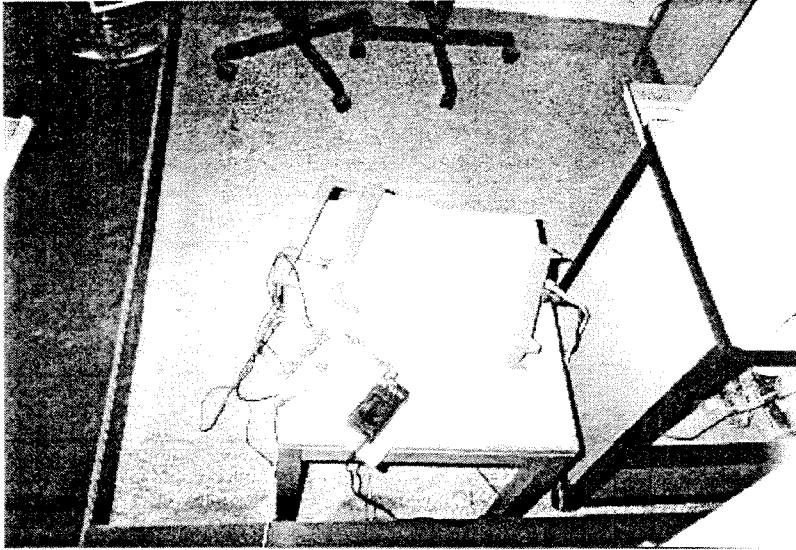
Üç noktalı eğilme deneyi, Lloyd Inst. Ltd. LS500 malzeme deney gereci ve DAPMAT v 3.21 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Deney için kullanılan üç noktalı eğilme gereci, Lloyd firması tarafından sağlanan model üzerine, daha fazla açıklığa imkan verecek şekilde imal edilmiştir. Gerinmeler, çeyrek Whetstone köprüsü ve 120 ohm gerilme göstergeleriyle ölçülmüştür.



Şekil 4.9. Basit mesnetli kiriş için 3-noktalı eğilme düzeneği.



Şekil 4.10. Lamina cam eğilme deneyi düzenegi.



Şekil 4.11. Whetstone Köprüsü ile HP çoklometresi.

Gerinme göstergeleri, maksimum çekme gerilmesini ölçmek üzere, kirişin orta noktasında, alt yüzeyin genişliğin ortasına denk düşen yerine yapıştırılmıştır (Şekil 4.11). Voltaj farkı, HP 34401A multimetresi ile onun kontrol yazılımı kullanılarak ölçülmüştür.

4.2.3 Deneyin yapılışı

Örnekler oda sıcaklığında (22° C), %30-35 bağıl nemde 6 mm/dk hızında toplam deney süresi 60 saniyeyi geçmeyecek şekilde yüklenmiş ve Whetstone köprüsünden gelen voltaj değerleri deneylerin başında ve sonunda okunmuştur. Bu voltaj farkları daha sonra aşağıdaki formülle gerinme değerlerine dönüştürülmüştür:

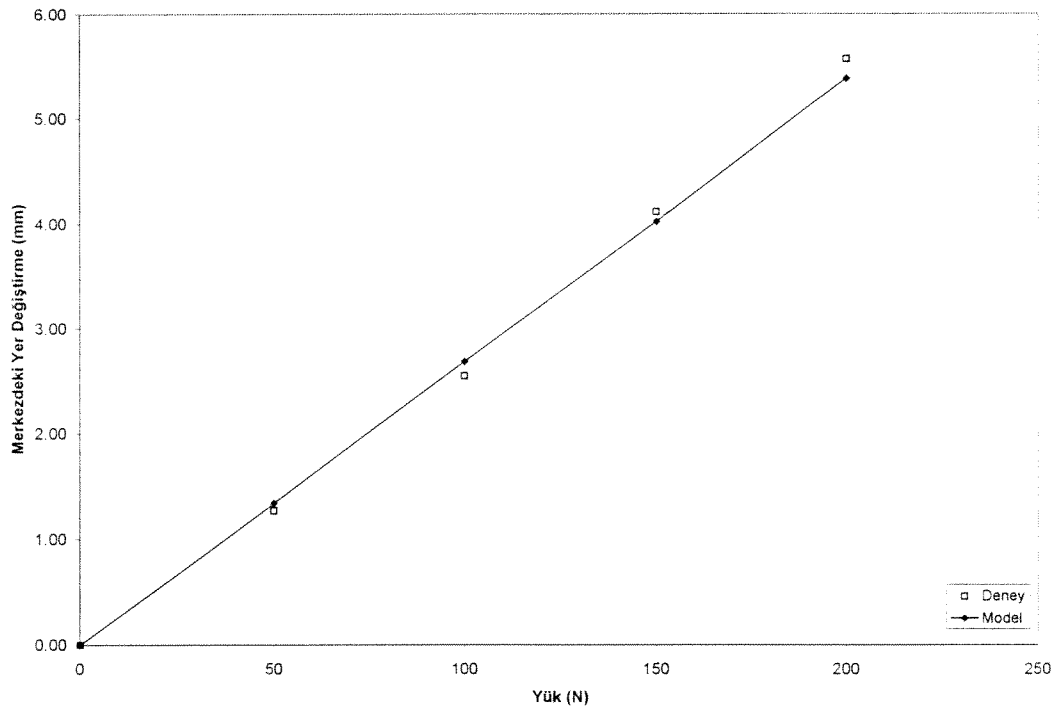
$$\Delta V = \frac{1}{4} \rho_g \varepsilon V$$

Burada ΔV voltaj farkı, ρ_g gösterge çarpanı (bu deneyde kullanılanlar için 2.13), ε gerinme ve V devreye verilen gerilimdir (burada 15.25 V). Bu sistem ara yüklemelerde gerinme ölçümüne izin vermediği için örnekler 50 N, 100 N, 150 N ve 200 N yüklerine kadar ayrı ayrı yüklemişlerdir.

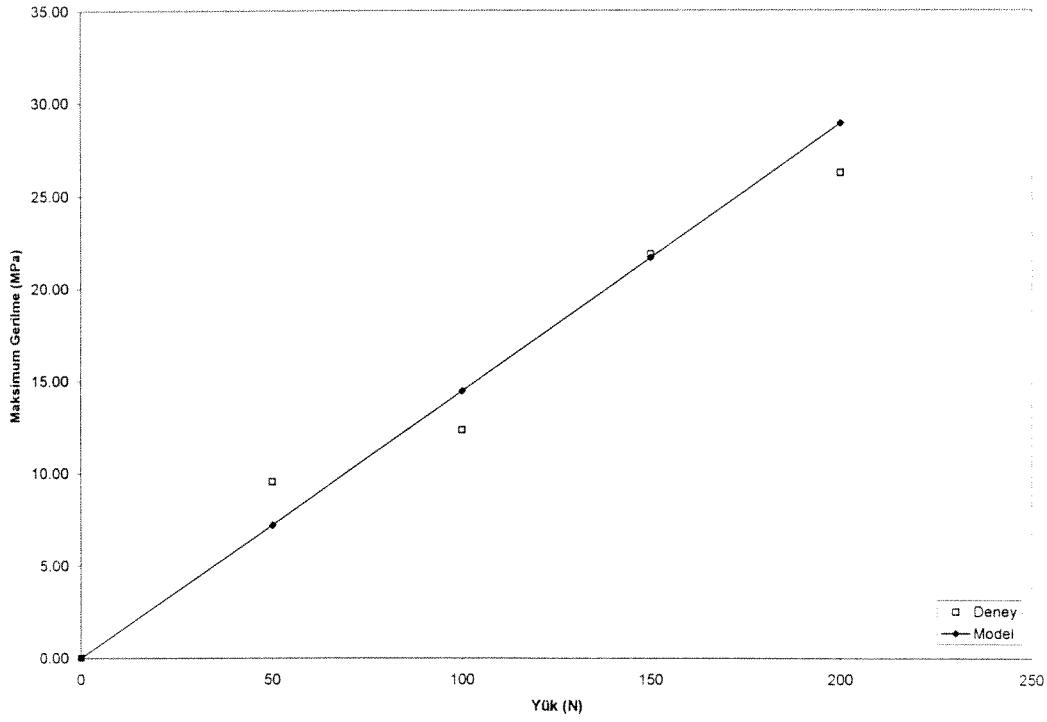
4.2.4 Sonuçlar

DeneySEL sonuçlar, Şekil 4.12 ve 4.13 ile Tablo 4.5'te matematiksel modelin sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Deney ve model arasındaki yer değiştirme farklarının %5'ten yüksek olmadığı gözlenmiştir. Bu yer değiştirme değerlerinden, camların arasındaki ara katmanın, daha önceki deneylerde en yüksek kesme modülü değerini veren Saflex olduğu sonucuna varılmıştır. Saflex PVB için 22° C'deki kesme modülü değeri, gerilmemiş örnekler için 749 kPa; gerilmiş örnekler için 858 kPa olarak bulunmuştu. Ancak, yukarıda da söz edildiği gibi, 0.38 mm gibi çok ince ara

katmanlar için etkin kesme modülü değerinde Hooper (1973) tarafından da rapor edilen %50 dolayında bir artış gözlenmektedir. Bölüm 4.3.1.6'da, azalan kalınlıktan kaynaklanan kesme gerinmesi artışının ancak mütevazi bir düzeyde olduğu gösterilmişti. Hooper'in sözleriyle, "bu durum kısmen plastik-cam arayüzünde ancak ara katman görece ince olduğunda ortaya çıkan ve bir 'sınır-katmanı' olgusu niteliği sergileyen ek bir sarma veya engelleme etkisine de bağlı olabilir". Bu durumda, gerilmiş ara katmanın kesme modülünün %50 fazlası, yani 1287 kPa değerinin modelden tatmin edici sonuçlar alınmasını sağladığı görülmüştür.



şekil 4.12. Model ve deneyden elde edilen merkezi yerdeğiştirme değerleri.



Şekil 4.13. Deney ve modelden elde edilen enbüyük çekme gerilmesi değerleri.

Yer değiştirme grafiğinde göze çapan bir nokta da, son iki yer değiştirme değerine (150 ve 200 N) karşılık gelen eğimlerin, ilk ikisine göre daha yüksek olmasıdır. Bu büyük ihtimalle sıcaklığın ilk iki deney ile son iki deney arasında biraz yükselmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 4.4. Deneysel ve matematiksel sonuçların karşılaştırması.

Yük	Merkezi Yer Değiştirme (mm)			Maksimum Gerilme ($\mu\epsilon$)			Maksimum Gerilme (MPa)		
	D deney	Model	Hata (%)	D deney	Model	Hata	D deney	Model	Hata (%)
0	0.00	0.00	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00	0.0
50	1.27	1.34	5.5	148	112	-24.3	9.55	7.23	-24.3
100	2.55	2.69	5.5	191	224	17.3	12.34	14.45	17.1
150	4.12	4.03	-2.2	339	336	-0.8	21.89	21.68	-1.0
200	5.57	5.38	-3.4	407	448	10.1	26.27	28.90	10.0

Maksimum çekme gerilmelerine gelince, 50 N yüklemeye karşılık gelen gerilme değerinin, diğer üç değer aksine, modelin sonucundan *yüksek* olduğu, hem de hatasının %23 dolaylarında bulunduğu gözlenmektedir. Buradan, ya ölçümlerde ya

da gerinme göstergesinin yerleştirilmesinde bir yanlışlık olduğu sonucuna varılabilir. Geri kalan gerilme değerleri, tutarlı bir biçimde modelin tahminlerinden küçük ya da ona eşittirler ve gerinme göstergesi teknolojisinin sınırları içinde hata değerlerine sahiptirler.

Tablo 4.5'te deney sırasında ölçülen gerinme değerleri ile onları camın Young modülü 64.5 GPa ile çarpma yoluyla elde edilen gerilmeler gösterilmektedir.

Tablo 4.5. Gerinme ve gerilme değerleri.

Yük (N)	Gerinme ($\mu\epsilon$)	Gerilme (MPa)
50	148	9.55
100	191	12.34
150	339	21.89
200	407	26.27

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmadan lamina camların görelî dayanımının belirlenmesinde iki önemli etki ortaya çıkmaktadır. Bunlardan biri aratabaka PVB'nin plastisayzır içeriği diğerî ise doğrusal olmayan etkilerdir.

Plastisayzır içeriği ve buna bağlı olarak oluşun geçiş sıcaklığı lamina camın dayanımında önemli etki yapmaktadır. Eğer geçiş aralığı oda sıcaklığında (25° C civarı) sonlanırsa (bu çalışmada kullanılan PVB'ler gibi) dayanım çarpanı –yüksek mevsim sıcaklıklarında erişilebilmesi olasılık dahilinde- olan 50° C dereceye kadarki sıcaklıklarda 0.6'ya kadar düşebilir. Eğer geçiş aralığı -Behr vd. (1993) deneylerinde kullandığı PVB'ler gibi- 50° C derece civarı başlarsa dayanım çarpanı 0.75 ve (0.85 gibi) üzeri olabilir. Endüstride üretilen “yumuşak” PVB'lerin geçiş aralığında farklılıklar olduğu için lamina cam üretimi için kullanılacak PVB'nin geçiş aralığı bilinmesi gerekir.

Doğrusal olmayan davranışın etkisi sabit mesnetli kirişler kullanılarak araştırılmıştır. Tabakalı ve lamina camlar doğrusal olmayan davranış bölgesine aynı yük altında eşdeğer yekpare cama göre daha önce girdiği için zar etkisi nedeniyle

dayanımları artmaktadır. Bu nedenle dayanım çarpanı, belli yük ve geometri altında (Vallabhan vd.,1987) 1.0'ın üzerine dahi çıkmaktadır.

Diğer önemli nokta ise lamina cam kirişlerde zar gerilmeleri etkili olduğunda dayanım çarpanı üzerinde sıcaklığın etkisinin azalmasıdır. Yüksek doğrusal olmayan seviyelerde oldukça geniş sıcaklık aralığında dayanım çarpanı yumuşak PVB olsa dahi 1.0 civarına yaklaşmaktadır.

Güvenli ve iktisatlı bir lamina cam tasarımı için endüstriden sağlanan farklı PVB'lerle üretilmiş farklı geçiş sıcaklığına sahip lamina cam plaklar üzerine deneyler yapılmalıdır. Genel olarak, düşük sıcaklıklarda geçiş sıcaklığına sahip PVB sözkonusu olduğunda kesme modülündeki düşüşü telafi etmek için doğrusal olmayan davranışın sıcaklık etkisini ne kadar azalttığı incelenmelidir. Doğrusal olmayan davranış seviyesinin artması ile lamina camın göreceli olara güçlenmesi ve sıcaklık etkisinin azalması dayanım çarpanının 0.75 veya üzeri alınmasının uygun olacağı bu bu çalışmanın sonucu olarak söylenebilir.

Geliştirilen matematiksel modelin analitik olarak çözümlenmesi lamina camlara bakışı somutlaştırmakta, lamina cam davranışının kavranmasını sağlamaktadır. Lamina cam kirişin uzunluğu ve kalınlığı kirişin davranışında ve cam parçalar ile PVB'nin birlikte çalışmasında, kesme gerilmesi aktarılmasında etkili olmaktadır. Uygulanan yüklerin taşınmasında eğilme ve PVB'deki kesme gerilmelerinin ortak çalışması ve ters ilişkisi matematiksel olarak gösterilmiştir. Lamina cam davranışının sınırlarının tabakalı cam davranışı ve gerçek yekpare cam davranışı olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

Behr, R.A., Minor, J.E., Linden, M.P., Vallabhan, C.V.G. (1985). "Laminated Glass units under uniform lateral pressure", *Journal of Structural Engineering*, 111(5), 1037-1050.

Behr, R.A., Linden, M.P., ve Minor, J.E. (1986). "Load duration ve interlayer thickness effects on laminated glass", *Journal of Structural Engineering*, 112(6), 1441-53.

Behr, R.A., Karson, M.J., ve Minor, J.E. (1991). "Reliability analysis of window glass failure pressure data", *Structural Safety*, 11, 43-58.

Behr, R.A., Minor, J.E., Norville, H.S. (1993). "Structural behavior of architectural laminated glass", *Journal of Structural Engineering*, 119(1), 202-222.

Bennison, S.J., Jagota, A., Smith, C.A. (1999). "Fracture of glass/poly(vinyl butyral) laminates in biaxial flexure", *J. Am. Ceram. Soc.*, 82(7), 1761-1770.

Edel, M.T. (1997). "The effect of temperature on the bending of laminated glass beams", M.S. Thesis, Texas A&M University, College Station, TX.

Hildebrve, F.B. (1965). *Methods of Applied Mechanics*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Hooper, J.A. (1973). "On the bending of architectural laminated glass", *Int. J. Mech. Sci.*, 15, 309-323.

Kanabolo, D.C. ve Norville, H.S. (1985). "The strength of new window glass plates using surface characteristics", NTIS Accession No. PB86-140100, Glass Res. Ve Testing Lab., Texas Tech.

Langhaar, H.L. (1962). *Energy Methods in Applied Mechanics*, John Wiley ve Jones, Inc., New York.

Linden, M.P., Minor, J.E., Behr, R.A., ve Vallabhan, C.V.G. (1983). "Evaluation of laterally loaded laminated glass by theory ve experiment". Report, Glass Res. Ve Testing Lab., Texas Tech.

Linden, M.P., Minor, J.E., ve Vallabhan, C.V.G. (1984). "Evaluation of laterally loaded laminated glass units by theory ve experiment". Supplemental Report No. 1, Glass Res. Ve Testing Lab., Texas Tech.

Minor, J.E., ve Reznik, P.L. (1990). Failure strengths of laminated glass", *Journal of Structural Engineering*, 116(4), 1030-1039.

Norville, H.S., King, K.W., Swofford J.L. (1998). "Behavior ve strength of laminated glass", *Journal of Engineering Mechanics*, 124(1), 46-53.

Reddy, J.N. (1984). *Energy ve Variational Methods in Applied Mechanics*, John Wiley ve Jones, Inc., New York.

Tuzcu, İ.E. (1998). "Thickness ve strength factor analyses of simply supported laminated glass units", M.S. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.

Vallabhan, C.V., Minor, J.E., Nagalla S.R. (1987). "Stresses in layered glass units ve monolithic glass plates", Journal of Structural Engineering, 113(1), 36-43.

Vallabhan, C.V., Ramasamudra, M. (1991). "Properties of PVB (Saflex) interlayer used in laminated glass". Glass Res. Ve Testing Lab., Texas Tech.

Vallabhan, C.V., Das, Y.C, Magdi, M., Asik, M., Bailey, J.R. (1993). "Analysis of laminated glass units", Journal of Structural Engineering, 119(5), 1572-1585.

Van Duser, A., Jagota, A., Bennison, S.J. (1999). "Analysis of glass/polyvinyl butyral laminates subjected to uniform pressure" Journal of Engineering Mechanics, 125(4), 435-442.