Sıcaklığın Lamine Cam Plakların Davranışı Üzerine Etkisi

Ebru Dural [1]*, M. Zülfü Aşık[2]

[1] Adnan Menderes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aydın/ Türkiye, +90 256 2137503
ebrudural@gmail.com
[2] Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, Ankara/Türkiye, +90 312 2102378
azulfu@metu.edu.tr
*İletişimden sorumlu yazar / Corresponding author

Geliş/Recieved: 20 Aralık (December) 2016
Kabul/Accepted: 12 Nisan (April) 2017
DOI: 10.18466/cbayarfbe.319918

Özet

Bu çalışmada sıcaklığın lamine cam plak yapıların davranışı üzerine etkisi incelenmektedir. Lamine cam yapılar birbirlerine polivinil butiral ara tabaka (PVB) ile birbirine bağlanmış iki cam levhadan oluşurlar. Lamine cam plaklar ince yapıları ve büyük yer değiştirmeler yapmaları nedeni ile rüzgar yükleri etkisi altında hatta kendi ağırlıkları etkisi altında bile doğrusal olmayan davranış gösterirler. Ayrıca cam ve PVB malzemenin elastisite modülleri arasındaki büyük fark olması da doğrusal olmayan davranışa sebep olmaktadır. Lamine cam birimler yaygın olarak havacılık, otomobil ve mimari endüstrilerinde kullanılmaktadırlar. Bünyelerinde bulunan ara tabaka PVB' nin mükemmel yapıştırıcı özelliği sayesinde parçalanıp dağılmazlar ve uygun şekilde dizayn edildikleri takdirde cam tabakalardan birisi kırılsa bile diğer tabakalar uygulanan yükleri taşımaya devam edebilirler. Bu özellikleri nedeni ile kasırga, deprem gibi doğal felaketlerde, bombalı saldırılar gibi insanlar tarafından gerçekleştirilen felaketlerde ya da toplumsal olaylarda etrafta bulunan binalardaki camların parçalanması nedeniyle ortaya çıkabilecek hasarlarda yaralanma ve hatta ölümleri bile engellemekte önemli rol oynarlar. Polivinil butiral ara tabakanın kayma elastik modülünün sıcaklıkla büyük değişim göstermesi nedeni ile sıcaklık lamine cam birimlerin davranışını etkileyen faktörlerden biri haline gelmiştir. Polivinil butiral tabakanın kayma elastik modülü sıcaklık arttıkça azalırken, sıcaklık azaldıkça artar. Bu çalışmada değişim ilkeleri ve potansiyel enerjinin en azlaması yöntemi kullanılarak geliştirilen model kullanılarak sıcaklığın lamine cam plak yapıların davranışı üzerine etkisi incelenecektir elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanacaktır.

Anahtar Kelimeler — Doğrusal olmayan davranış, Lamine cam, Plak, PVB, Sıcaklık.

The Effect Of Temperature on the Behavior of Laminated Glass Plate

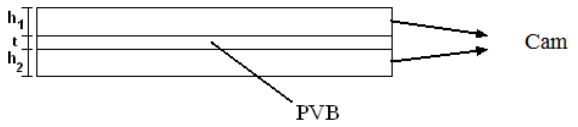
Abstract

In this study, the effect of temperature on the behavior of laminated glass plate is analyzed. Laminated glass contains two glass sheets bonded together by an interlayer (PVB). Behavior of laminated glass plates under wind loads or even under their own weight is highly nonlinear since they are thin and can easily undergo large displacements. Therefore, they need to be analyzed by using large deflection theory to represent nonlinear behavior. Furthermore, the large difference between the modulus of elasticity of glass and PVB material causes nonlinear behavior. Laminated glass units are widely used in aerospace, automotive and architecture industries. Due to the perfect adhesive of PVB interlayer between the glass sheets they do not separate even when broken and even if one of the glass sheets is broken the other layer may continue to carry applied loads if laminated unit is designed appropriately. These features play an important role in providing protection from natural disasters such as hurricanes, earthquake and from man-made disasters such as bomb attack and social events by preventing injuries and even deaths, which can occur due to the breakage of windows in buildings. Behavior of laminated glass is affected by tempera-

ture since the shear modulus of polyvinyl butyral interlayer exhibits great changes with respect to temperature. While the shear modulus of PVB increases with falling temperature, it decreases with rising temperature. In this study the effect of temperature on the behavior of laminated glass plate will be analyzed using minimum potential energy theorem and variational principles, the results will be verified by comparing with the results of developed finite element model.
Keywords —Laminated glass, Non linear behavior, Plate, PVB, Temperature

1 Giriş

Teknolojinin gelişmesi ile hemen her alanda kullanıma giren lamine camlar yüksek güvenlik ve emniyet standartları nedeni ile gittikçe artan bir şekilde mimari, havacılık, otomobil ve uçak endüstrisinde kullanılmaktadır. Şekil 1'den görülebileceği gibi lamine camlar birbirine polivinil butiral (PVB) ara tabaka ile bağlanmış iki cam birimden oluşurlar. Cam tabakaları birbirine bağlayan elastomerik PVB ara tabaka sadece tabakaları bir arada tutmakla kalmaz aynı zamanda ısı, ses yalıtımı sağlamaya, güneş ısısı kazancına ve ultraviyole ışınları soğurmaya yardımcı olur. Kırılma olsa bile PVB ara tabaka cam parçaları bir arada tutup parçalanıp, dağılmasını engelleyerek yaralanma ve hatta ölümlerin önüne geçilmesini sağlar. Lamine camlar bu özellikleri nedeni ile aynı zamanda deprem ve kasırgalardan korunmada da önemli rol oynar ve yüksek binaların ön cephelerinde, otobüs yan camlarında, otobüs duraklarında, deprem bölgelerindeki binalarda yaygın kullanıma girerler.



Şekil 1. Lamine cam birim

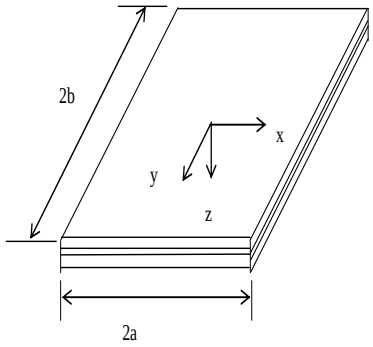
Bunun en önemli nedeni şüphesiz emniyetli oluşlarıdır. Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı bilim adamları yaklaşık 40 yıldır lamine cam yapıların davranışı üzerine çalışmalar yapmaktadırlar. Matematiksel karmaşıkları nedeni ile yapılan çalışmaların birçoğunda lamine camların doğrusal olmayan davranışlarından ziyade doğrusal davranışları incelenmiştir. Oysa lamine camlar kendilerini oluşturan malzemelerin elastisite modülleri arasındaki büyük fark olması ve ince yapıları nedeni ile mekanik olarak karmaşık davranış gösterirler. Bu nedenlerle lamine camların davranışlarının çözümlenmesinde büyük yer değiştirmeler kuramı kullanılmalıdır. Doğrusal olmayan davranış nedeni ile eğilmeden önce düzlem olan kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalırlar varsayımı lamine camlar için geçerliliğini yitirir. Bu nedenle literatürde mevcut olan teoriler yerine yeni ve gerçeğe daha yakın sonuçlar verecek yeni bir modele ihtiyaç duyulmuştur. Lamine cam birimlerin doğrusal olmayan davranışı 1993 yılında Vallabhan ve diğerleri [5] tarafından geliştirilmiş ve 2003 yılında Aşık [6] lamine cam plakların doğrusal olmayan davranışı daha az hesaplama alanı ve zamanına ihtiyaç şekilde çözümlemiştir. Bu çalışmada ise Hooper [1] tarafından elde edilen sıcaklık- kayma modülü grafikleri sonuçları kullanılarak sıcaklığın lamine cam plak yapıların davranışı üzerine etkisi incelenmiştir ve geliştirilen modelden elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Polivinil butiral ara tabakanın kayma modülünün sıcaklıkla gösterdiği büyük değişim nedeni ile sıcaklık lamine cam birimlerin davranışlarını etkileyen önemli faktörlerden biri haline gelmiştir. Sıcaklık azaldıkça artan kayma modülü sıcaklık arttıkça azalır. Polivinil butiral ara tabakanın elastik özelliklerinin büyük değişim gösterdiği sıcaklık geçiş sıcaklığı ,T_g olarak tanımlanır. Polivinil butiral malzeme için geçiş sıcaklığı 49° C -70 ° C arasındadır. PVB malzeme geçiş sıcaklığının altında sert, katı camsı davranış gösterirken geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda lastiksi davranış gösterirler. Geçiş sıcaklığının 49 -70 ° C arasında olması nedeni ile PVB malzeme oda sıcaklığı (25° C) de kırılgan ve serttir. Lamine camın darbe dayanımının artması ve kırılmaların önüne geçilebilmesi amacıyla polivinil butiral ara tabakaya yumuşatıcılar eklenir. Geçiş sıcaklıkları -150° C ile -50° C arasında olan yumuşatıcılar ara tabaka polivinil butiralin geçiş sıcaklığının azalmasına ve geçiş aralığının büyümesine neden olurlar. Yukarıda anlatılan nedenlerden dolayı geçiş sıcaklığı lamine camın davranışını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Lamine camın davranışını etkileyen bir diğer faktör ise doğrusal olmayan davranış göstermesidir.

1914 yılından beri otomotiv endüstrisinde kullanılmakta olan lamine camlar güvenlik ve emniyet özellikleri nedeni ile günümüzde gittikçe artan bir şekilde mimari ve yapı endüstrisinde kullanılmaya başlamıştır. 1973 yılında Hooper [1] lamine cam kirişlerin davranışını inceleyerek lamine camlar ile ilgili ilk çalışmayı gerçekleştirmiştir. Lamine camların karmaşık mekanik davranış göstermesi nedeni ile yapılan çalışmaların bir çoğu deneyseldir[1-4]. Son yıllarda bir çok araştırmacı nümerik yöntemler kullanarak lamine camın davranışı modellemişlerdir [5-7]. Vallabhan vd. [5] minimum potansiyel enerji teoremi ve varyasyonel metodlar kullanarak matematiksel model geliştirmişlerdir. Asik [6], Vallabhan vd.'nin geliştirdiği modeli daha az hesap zamanı ve depolama alanına ihtiyaç duyacak şekilde geliştirilmiştir. Lamine cam kirişlerin mekanik davranışlarını incelemek üzere bir çok çalışma yapılmıştır [8-13]. Foraboschi [14-16] tabakalı plakların mekanik davranışını açıklayan model geliştirmiştir. Foraboschi [14] üç tabakalı sandviç plakların davranışları ile az hesaplama zamanına ihtiyaç duyan bir model geliştirmiştir.

Edel [17] lamine camların geçiş sıcaklıkları ile ilgili 3 nokta eğilme deneyleri yaptı ve elde ettikleri sonuçları geliştirdiği sonlu elemanlar model sonuçları ile karşılaştırdı. Deney ve geliştirilen model sonuçlarından lamine camın davranışının geçiş sıcaklığının altında yekpare camın davranışına yakın iken geçiş sıcaklığının üstünde tabakalı camın davranışına yakın olduğu gözlemlenmiştir.

2 Matematiksel Model

Yapı elemanı olarak kullanılmakta olan cam birimler tabakalı, lamine, yekpare ve eşlenik yekpare olarak kullanılabilirler. Lamine camlar birbirlerine ara tabaka ile bağlanmış olan cam tabakalardan oluşurken, tabakalı camlar aralarında sürtünme olmayan ve gerilme dağılımı kendi tarafsız eksenine göre simetrik olan iki cam tabaka oluşurlar. Eşlenik yekpare camlar kalınlığı cam tabakaların toplam kalınlığına eşit olan tek cam tabakadan oluşurken, gerçek yekpare camlar ise kalınlığı cam tabakalar ve ara tabakanın kalınlığı toplamına eşit olan tek bir cam tabakadan oluşurlar. Şekil 2' de verilen lamine cam plak yapının eğilme davranışı üzerine matematiksel model Von Karman plak teorisi kabulleri, değişim ilkeleri ve potansiyel enerjinin en azlaması yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir.



Şekil 2. Lamine cam plak yapı

Lamine cam plak yapının davranışını modellemek için birimin potansiyel enerjisi cam tabakaların eksenel gerinme ve eğilme enerjileri ile ara tabakanın kesme gerinim enerjisi ve kuvvet potansiyel enerjisinin toplamı olarak yazılmıştır. Model geliştirilirken ara tabakanın sadece kesme gerinme enerjisi gözünde bulundurulmuş eğilme dayanımı göz ardı edilmiştir.

$$\Pi = U_m^1 + U_b^1 + U_m^2 + U_b^2 + U_I + \Omega$$

Daha önce lamine camlar için Vallabhan ve diğerleri [5] tarafından türetilen ve plak yapıların doğrusal olmayan davranışını açıklayan beş doğrusal olmayan türevsel denklem aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
&\left[(D_1 + D_2)\nabla^4 - \frac{G_I}{t}\left(\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} + t\right)^2 \nabla^2\right] w = q \\
&+ \frac{Eh_1}{1-n^2}\left[(e_{1x} + ne_{1y})w_{,xx} + (e_{1y} + ne_{1x})w_{,yy} + 2(1-n)e_{1xy}w_{,xy}\right] \\
&+ \frac{Eh_2}{1-n^2}\left[(e_{2x} + ne_{2y})w_{,xx} + (e_{2y} + ne_{2x})w_{,yy} + 2(1-n)e_{2xy}w_{,xy}\right] \\
&- \frac{G_I}{t}\left(\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} + t\right)\left(\frac{\partial u_1}{\partial x} - \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{\partial v_2}{\partial y}\right)
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
&\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1-n}{2}\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{G_I(1-n)}{2Gh_1t}\right] u_1 = \\
&- \frac{G_I(1-n)}{2Gh_1t}u_2 - \frac{G_I(1-n)}{2Gh_1t}\left(\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} + t\right)\frac{\partial w}{\partial x} \\
&- \frac{\partial w}{\partial x}\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1-n}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right] + \frac{1+n}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\frac{\partial w}{\partial y} \\
&- \frac{1+n}{2}\frac{\partial^2 v_1}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\left[\frac{1-n}{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}-\frac{G_I(1-n)}{2Gh_1t}\right]v_1 = \frac{G_I(1-n)}{2Gh_1t}v_2-\frac{G_I(1-n)}{2Gh_1t}\left(\frac{h_1}{2}+\frac{h_2}{2}+t\right)\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial y}\left[\frac{1-n}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right]\frac{1+n}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\frac{\partial w}{\partial x}- \frac{1+n}{2}\frac{\partial^2 u_1}{\partial x\partial y} \quad (3)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{1-n}{2}\frac{\partial^2}{\partial y^2}-\frac{G_I(1-n)}{2Gh_2t}\right]u_2 = -\frac{G_I(1-n)}{2Gh_2t}u_1+\frac{G_I(1-n)}{2Gh_2t}\left(\frac{h_1}{2}+\frac{h_2}{2}+t\right)\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x}\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1-n}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right]\frac{1+n}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\frac{\partial w}{\partial y}- \frac{1+n}{2}\frac{\partial^2 v_2}{\partial x\partial y} \quad (4)$$

$$\left[\frac{1-n}{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}-\frac{G_I(1-n)}{2Gh_2t}\right]v_2 = -\frac{G_I(1-n)}{2Gh_2t}v_1+\frac{G_I(1-n)}{2Gh_2t}\left(\frac{h_1}{2}+\frac{h_2}{2}+t\right)\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial y}\left[\frac{1-n}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right]\frac{1+n}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\frac{\partial w}{\partial x}- \frac{1+n}{2}\frac{\partial^2 u_2}{\partial x\partial y} \quad (5)$$

Bu denklemlerde w yanal yer değiştirme; u1 ve v1, üst plak içi yer değiştirmeleri; u_2 ve v_2, alt plak içi yer değiştirmeleri; h_1 ve h_2, sırasıyla üst ve alt plak kalınlıklarını; t, ara tabakanın kalınlığını; G_I, ara tabakanın kayma gerilmesi modülünü; G, cam plakların kayma gerilmesi modülünü; E, cam plakların elastik modülünü; ν, cam plakların Poison oranını; q, yanal basıncı temsil etmektedir. Ayrıca, denklemlerdeki diğer terimler aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$e_{1x}=\frac{\partial u_1}{\partial x}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2;\ e_{1y}=\frac{\partial v_1}{\partial y}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2;$$

$$e_{2x}=\frac{\partial u_2}{\partial x}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2;\ e_{2y}=\frac{\partial v_2}{\partial y}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2;$$

$$e_{1xy}=\frac{\partial v_1}{\partial x}+\frac{\partial u_1}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y};\ e_{2xy}=\frac{\partial v_2}{\partial x}+\frac{\partial u_2}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y};$$

$$D_1=\frac{Eh_1^3}{12(1-\nu^2)};\ D_2=\frac{Eh_2^3}{12(1-\nu^2)}.$$

Simetri nedeniyle plağın sadece çeyreği için ($0\le x\le a$ ve $0\le y\le b$)çözüm yapmak yeterlidir. 2a ve 2b, plağın boyutlarıdır (Bkz. Şekil 1). Bu durumda sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilir.

x = 0′ da, $u_1= u_2=0$; $e_{1xy}= e_{2xy} =0$; $w_x=0$

x = a′da, $e_{1x} + ne_{1y} = e_{2x} + ne_{2y} = 0$; $e_{1xy}= e_{2xy} =0$; $w= w_{xx} =0$

y = 0′ da, $v_1=v_2=0$; $e_{1xy}= e_{2xy}=0$;$w_y=0$

y = b′ de, $e_{1x} + ne_{1y} = e_{2x} + ne_{2y} = 0$; $e_{1xy}= e_{2xy}=0$; $w=w_{yy}=0$;

Elde edilen hakim denklemlerin çözümü için sayısal yöntemler kullanılmıştır. Hakim denklemler sonlu farklar yöntemi kullanılarak matris denklemlere dönüştürülmüş ve nümerik yöntemler kullanılarak çözülmüştür. Doğrusal olmayan denklemlerin çözülmesinde yakınsamayı sağlayabilmek için Succesive Over Relaxation (SOR) yöntemi kullanılmıştır. Aşık [6] tarafından geliştirilen çözüm yöntemi kullanılarak yer değiştirmeler hesaplanırken sadece yer değiştirmelerin katsayıları saklanmış ve bu büyük miktarda saklama alanı tasarrufu sağlamıştır. Hakim denklemeler matris formunda yazılırken doğrusal olmayan terimler denklemin sağ tarafında toplanmış olup sadece yer değiştirmelerin katsayılarını içeren köşegen matris şeklinde yazılmış olup yanal yer değiştirme için elde edilen matris denklemi aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$[A]\{w\}=\underline{R} \quad (6)$$

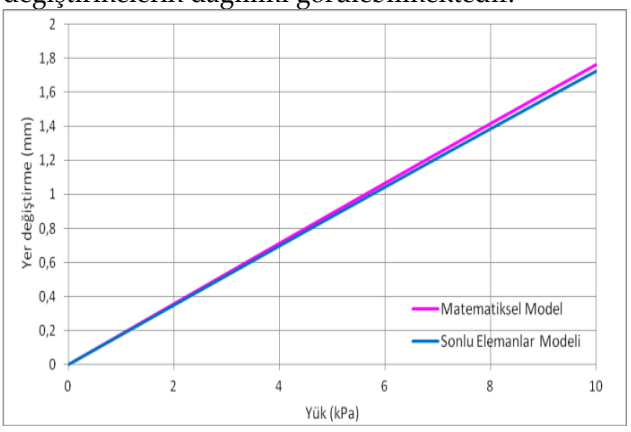
A matrisi köşegen matris olup sadece beş köşegene ait olan katsayılar vektör olarak depolanmış uygulanan dış yük ile ilgili terimler ve doğrusal olmayan terimler denklemin sağ tarafında vektör olarak depolanmıştır. Denklemler yinelemeli çözüm yöntemleri kullanılarak çözülmüş olup sınır koşullarına uygun olarak gerekli yerlerde modifiye edilmişlerdir. Yakınsamayı sağlayabilmek için uygulanan yük azar azar artırılarak uygulanmıştır.

Uygulanan yinelemeli çözüm yöntemi aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

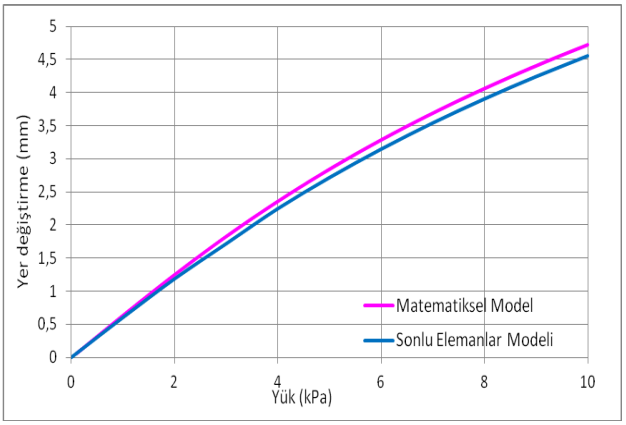
1) Yanal ve eksenel yer değiştirmeler için başlangıç değerleri varsayılmıştır.
2) Varsayılan başlangıç değerleri kullanılarak denklem 6'nın sağ tarafının değeri hesaplanmıştır
3) Denklem 6 çözülerek yanal yer değiştirme değeri elde edilmiştir.
4) Yakınsamayı sağlamak ve hızlandırmak için yanal yer değiştirme α parametresi kullanılarak iç oranlamaya tabi tutulmuş ve yeniden hesaplanmıştır.
$w(i)=\alpha\ w(i)+(1-\alpha\ )wo(i)$,
5) Hata kontrolu yapılıp yinelemeye gerek olup olmadığına karar veilmiştir.
6) Hesaplanan değer kullanılarak eksenel yer değiştirmeler için elde edilen denklemin sağ tarafı hesaplanır
7) Eksenel yer değiştirmeler hesaplanır.
8) Eksenel yer değiştirmeler değeri $\beta = 1.4$ ile dış oranlamaya tabi tutulup yeniden hesaplanır.

3 Sayısal Sonuçlar

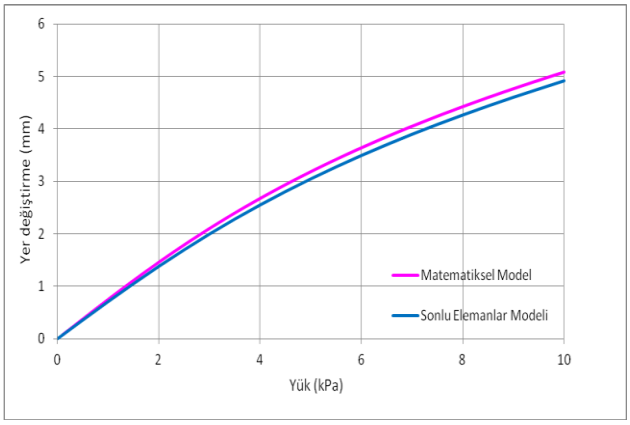
Bu çalışmada, Şekil 2'de görülen lamine cam biriminin doğrusal olmayan sayısal çözümlemesi yapılmıştır. Her bir plağın boyutları 1×1 m ve kalınlığı $h_1 = h_2 = h = 0.005$ m olarak alınmıştır. Cam için elastik modülü E=72 GPa, Poisson oranı ise 0.22'dir. Ara tabakanın (PVB) kalınlığı 0.00152 m' dir. Lamine cam birimi sabit mesnetli olarak modellenmiştir. Sayısal çözümleme için cam birim x ve y yönlerinde 30 bölme olarak düşünülmüştür. 10 kPa olan düzgün yayılı basınç yakınsama için 0.1 kPa'lık artırımlarla uygulanmıştır ve sonuçların ıraksaması engellenmiştir.
Sözü geçen matematiksel model, Vallabhan ve diğerleri [5] tarafından Teksas Teknik Üniversitesi'nin Cam Araştırma ve Deney Laboratuarı'nda yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarla modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması suretiyle doğrulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada sıcaklığın lamine camın davranışı üzerine etkisini incelemek için geliştirilen model sonuçları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu model sonlu elemanlar paket programı ABAQUS versiyon 6.13 kullanılarak geliştirilmiştir.Yük lamine cam birimin üst yüzeyine basınç olarak uygulanmıştır. Plak sekiz noktalı doğrusal tuğla elemanlar kullanılarak ağ şeklinde elemanlara bölünmüştür (mesh) çünkü bu elemanlar büyük yer değiştirmeler söz konusu olduğunda daha çabuk yakınsama sağlar ve daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlarlar. Lamine cam birimin tabakaları arasında tam bağı sağlayabilmek amacı ile yüzeyler birbirine bağ (tie) opsiyonu kullanılarak bağlanmıştır. Sabit mesnet koşullarını modelleyebilmek için yatay ve düşey yöndeki serbestlik dereceleri sıfırlanmıştır. Anlamlı sonuçlar elde edebilmek için büyük yer değiştirmeler kuramı kullanmak gerektiği için çözümde doğrusal olmayan geometri opsiyonu kullanılmıştır. Geliştirilen model sonuçları ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 3, 4 ve5 'de karşılaştırılmıştır. Şekillerden görüldüğü üzere -1.1°C, 21.1°C ve 48.9°C sıcaklıklarda elde edilen sonuçlar arasındaki fark sırasıyla en çok %2.3, %3.5 ve %3.3 olarak bulunmuştur. Şekil 6'dan yanal yer değiştirmelerin dağılımı görülebilmektedir.



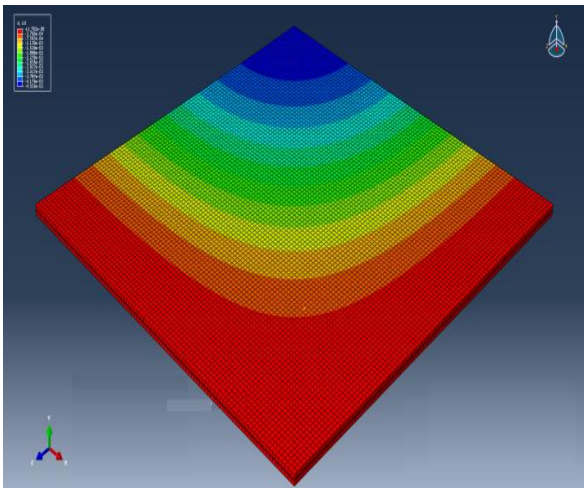
Şekil 3. T=-1.1°C için yer değiştirme yük değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. T=21.1°C için yer değiştirme yük değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 5. T= 48.9°C için Yer değiştirme yük değerlerinin karşılaştırılması



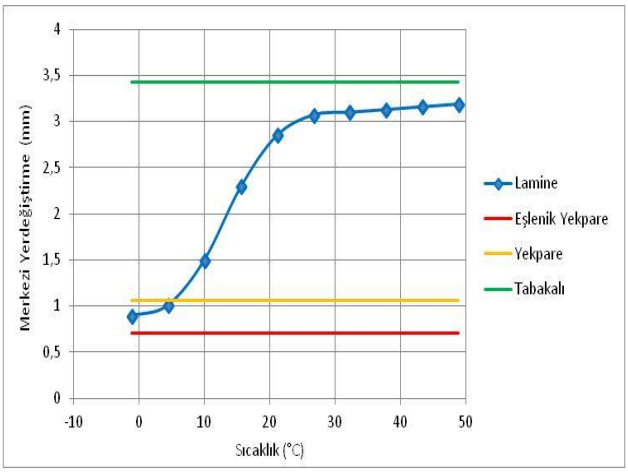
Şekil 6. T= 21.1°C 'de lamine cam plağın yanal yer değiştirme dağılımı

Bu çalışmada sıcaklığın lamine cam plak yapının davranışına etkisi incelenmektedir. Sıcaklığın lamine cam plak yapıların davranışına etkisini incelemek amacıyla Hooper [1] tarafından elde edilen sıcaklık-kayma modülü grafikleri sonuçları kullanılmıştır (Tablo 1).

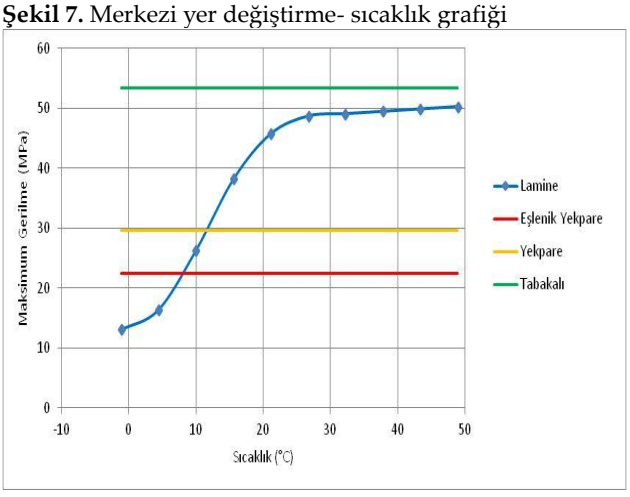
Şekil 7'den görülebileceği gibi yaklaşık 5˚C'nin üstündeki sıcaklık değerleri için lamine camın davranışı yekpare ve tabakalı camın davranışı ile sınırlandırılmıştır. Gerilme değerleri için bu sıcaklık yaklaşık 8˚C'dir. Grafiklerden sıcaklık arttıkça lamine camın davranışı tabakalı camın davranışına yaklaştığı görülebilir. Lamine camın geniş bir geçiş bölgesi vardır ve orta noktasındaki gerilme değeri yaklaşık 35MPa'dır. Bu değere karşılık gelen sıcaklık değeri ise yaklaşık 15 ˚C' dir.

Tablo 1. Sıcaklık Kayma Modülü ilişkisi

T (˚ C)	G (MPa)
-1,1	40
4,4	25
10	8
15,6	2,5
21,1	1
26,7	0,57
32,2	0,52
37,8	0,47
43,3	0,42
48,9	0,37



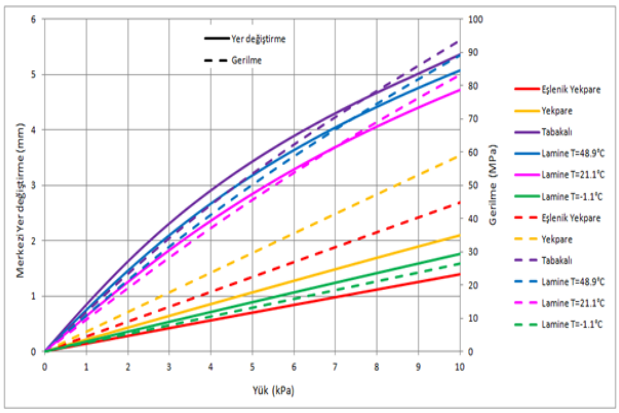
Şekil 7. Merkezi yer değiştirme- sıcaklık grafiği



Şekil 8. Maksimum gerilme- sıcaklık grafiği

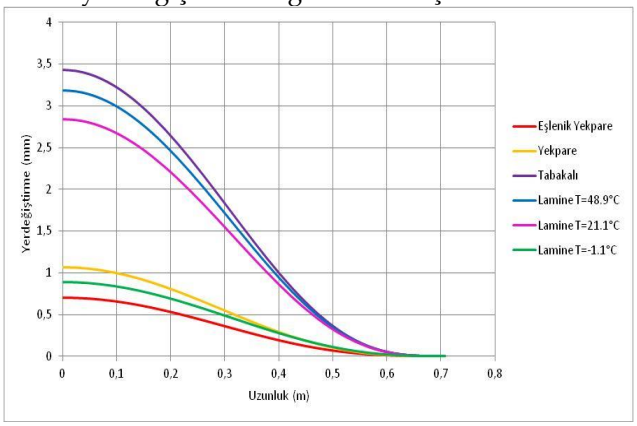
Şekil 9 'da tabakalı yekpare ve değişik sıcaklıklardaki lamine camların farklı yükler altındaki davranışı gösterilmiştir. 48.9˚C ve 21.1˚C deki lamine camın davranışı yekpare ve tabakalı camın davranışı ile

sınırlanmışken 0˚C'nin altındaki sıcaklıklarda lamine camın davranışı eşlenik yekpare camın davranışı altındadır ve eşlenik yekpare ve yekpare camların davranışları ile sınırlandırılmıştır. Şekilden görülebileceği gibi -1.1˚C deki lamine camın davranışı eşlenik yekpare camın davranışına oldukça yakındır. Lamine camın dayanımı sıcaklık arttıkça artmakta ve davranışı ise tabakalı camın davranışına yaklaşmaktadır. Şekil 9' dan görüldüğü gibi tabakalı, 48.9˚C ve 21.1˚C deki lamine camlar uygulanan basınç altında doğrusal olmayan davranış gösterirken, yekpare, eşlenik yekpare ve -1.1˚C deki lamine camlar doğrusal davranış gösterirler.



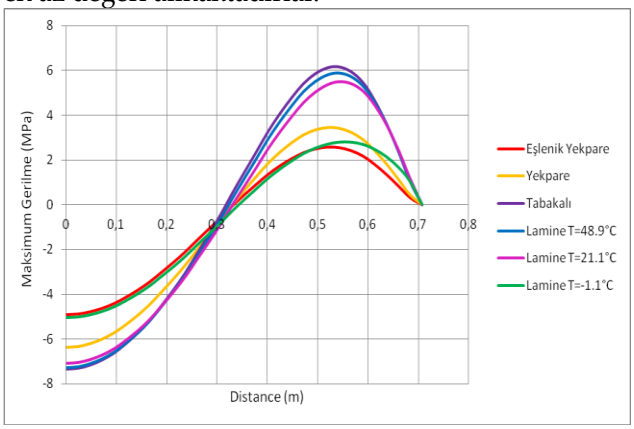
Şekil 9. Merkezi yer değiştirme ve gerilme grafiği

Plağın köşegeni boyunca oluşan yer değiştirme değerleri şekil 10' da gösterilmiştir. Uygulanan yük 5 kPa'dır. 0˚C'nin üstündeki sıcaklıklarda lamine camın davranışı yekpare ve tabakalı camın davranışı ile sınırlanmış olmasına rağmen, 0˚C'nin altındaki sıcaklıklarda lamine camın yer değiştirmesi yekpare camın yer değiştirme değerinden küçüktür.



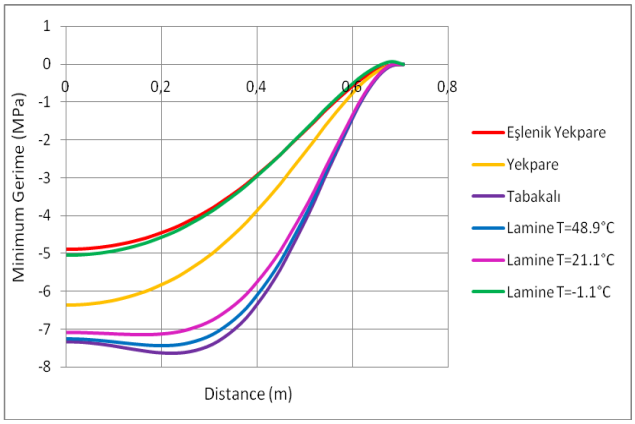
Şekil 10. Lamine cam plakta köşegen boyunca oluşan yer değiştirmeler

Maksimum yer değiştirme plağın merkezinde oluşurken sınır koşullarına uygun olacak şekilde sıfırdır. Tabakalı ve 0˚C'nin üstündeki lamine camın yer değiştirme eğrilerinde doğrusal olmayan davranışın sonucu olarak çift eğrilik gözlemlenebilir. 5 kPa basınç altında lamine cam plağın köşegeni boyunca oluşan maksimum ve minimum gerilme değerleri Şekil 11 ve 12' den görülebilir.. Şekil 11' den görülebileceği gibi lamine camda oluşan maksimum gerilmeler çekme ve basınç davranışı göstermektedirler. Plakta oluşan en büyük gerilme merkezde basınç olarak gelişmektedir. Köşegen üzerinde ve plağın köşesinde olmak üzere gerilme değerleri iki kez sıfırlanmaktadır. Maksimum gerilmeler tabakalı camlar için en büyük değerini alırken eşlenik yekpare ve -1.1˚C'deki lamine cam farklı bölgelerde değişerek maksimum gerilmenin en az değeri almaktadırlar.

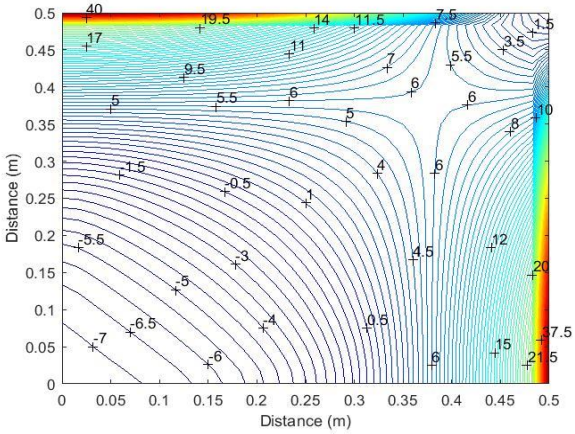


Şekil 11. Lamine cam plakta köşegen boyunca oluşan maksimum gerilmeler

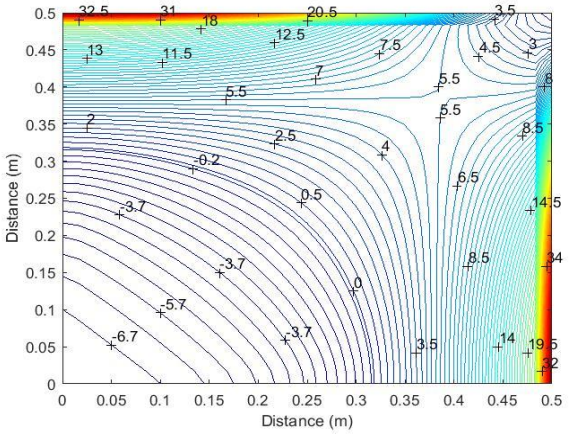
Şekil 12' den görülebileceği gibi minimum gerilmeler -1.1˚C'deki lamine camın köşeye çok yakın bir kısmı dışında çekme davranışı gösterirler ve en büyük değerlerini merkezde alırlar. Lamine cam plakların basınç altındaki davranışını detaylı olarak incelemek amacıyla gerilme dağılımları çizilmiştir. Simetri nedeni ile plağın çeyreği incelenmiştir. Uygulanan yük 5 kPa' dır. Eşlenik yekpare, yekpare, tabakalı ve değişik sıcaklıklardaki lamine camın davranışları incelenmiştir. Uygulanan 5 kPa basınç altında değişik sıcaklıklar da lamine cam, eşlenik yekpare, yekpare ve tabakalı cam plakların çeyreği üzerinde basıncın uygulandığı yüzey üzerinde oluşan maksimum gerilme dağılımları şekil 13-18 'de verilmiştir.



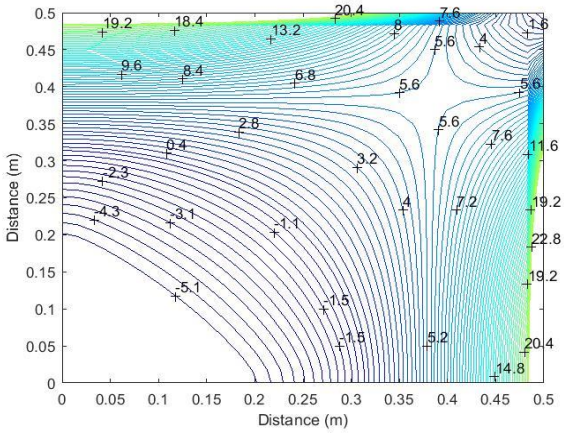
Şekil 12. Lamine cam plakta köşegen boyunca oluşan minimum gerilmeler



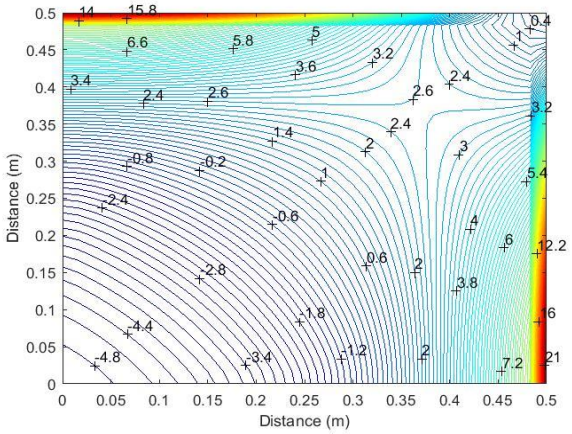
Şekil 13. T=48.9°C'de maksimum gerilme dağılımı



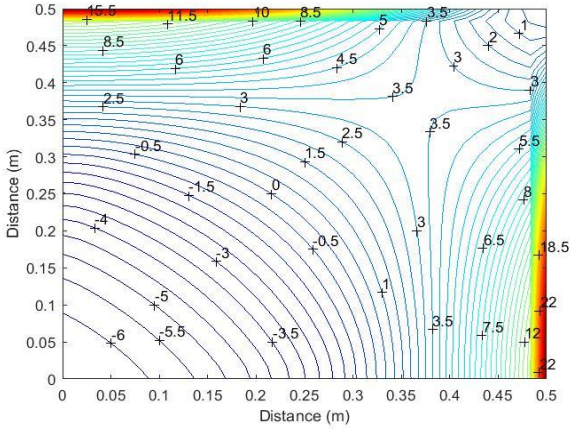
Şekil 14. T=21.1°C'de maksimum gerilme dağılımı



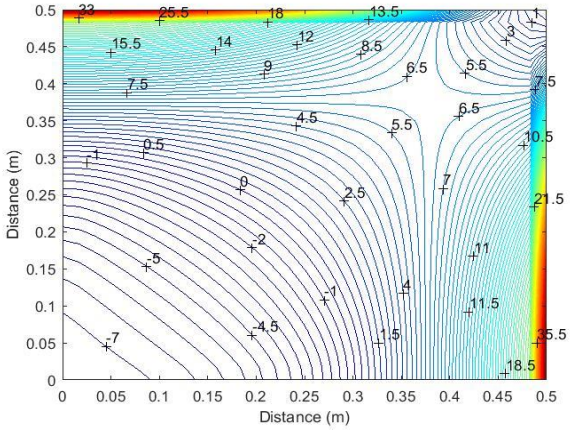
Şekil 15. T=-1.1°C'de maksimum gerilme dağılımı



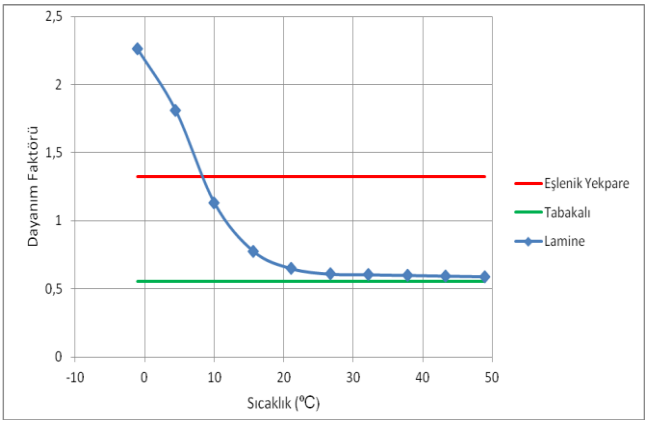
Şekil 16. Eşlenik yekpare cam için maksimum gerilme dağılımı



Şekil 17. Yekpare cam için maksimum gerilme dağılımı



Şekil 18. Tabakalı cam için maksimum gerilme dağılımı



Şekil 19. Dayanım faktörü sıcaklık grafiği

Şekilden görüldüğü üzere maksimum gerilmeler hem çekme hem de basınç değerleri alabilmektedirler. En büyük değerlerini plağın kenarlarında basınç olarak alan maksimum gerilme değerleri en küçük değerlerini plağın merkezinde çekme gerilmesi olarak alırlar. Ayrıca şekilden gözlemlenebileceği gibi plak üzerinde gerilme değerlerinin sıfır olduğu bir bölge mevcuttur. Bu sıfır gerilme bölgesi tabakalı camlar için merkeze en yakın hale gelirken -1.1°C' deki lamine cam için merkeze en uzak konumda bulunurlar.

Lamine cam birimlerin davranışı üzerinde bilgi sahibi olmak ve yekpare camın davranışı ile kıyaslayabilmek üzere dayanım faktörü analizi yapılır. Dayanım faktörü yekpare camın maksimum asal gerilme değerinin lamine camın maksimum asal gerilme değerine oranı olarak tanımlanabilir. Eğer PVB ara tabaka yeterince güçlü ise ve cam tabakalar arasındaki kaymanın yüzde yüzünü transfer ediyorsa dayanım faktörü 1 değerini alır. Dayanım faktörü sıcaklık arasındaki ilişkiyi Şekil 19' da verilen grafikten gözlenebilir. Dayanım faktörü sıcaklık azaldıkça artmakta iken artan sıcaklık ile azalmaktadır.

4 Sonuç

Bu çalışmada sıcaklığın lamine cam plakların davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Uygulanan yükler altında oldukça karmaşık mekanik davranış gösteren lamine camların doğru çözümlenebilmesi için büyük yer değiştirmeler kuramı kullanılmalı ve doğrusal olmayan bir model geliştirilmelidir.

Bu çalışmada değişik sıcaklıklara maruz kalan lamine cam plaklar için geliştirilen model sonuçları sonlu elemanlar paket programı ABAQUS kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca lamine cam davranışı ile ilgili daha fazla fikir sahibi olabilmek için yekpare ve lamine birimlerin gerilme oranları kullanılarak cam tasarım çizelgelerinde kullanılabilecek dayanım faktörü analizi yapılmıştır.

Çalışmadan anlaşılacağı üzere sıcaklık lamine cam birimlerin davranışı üzerine etki eden faktörlerden biridir. Ayrıca plastikleştirici içeriği ve lamine camın üretiminde kullanılan PVB tabakanın geçiş sıcaklığı lamine camın davranışı etkileyen faktörlerdendir. Sıcaklık azaldıkça artan ara tabakanın kayma modülü, sıcaklık arttıkça azalır. Sıcaklık arttıkça lamine camın davranışı tabakalı camın davranışına yaklaşmakta iken sıcaklık azaldıkça yekpare camın davranışına yaklaşır.

Semboller (Nomenclature)

h_1, h_2	Üst ve alt tabakaların kalınlıkları
t	Ara tabakanın kalınlığı
a, b	Çeyrek plağın x ve yönündekiuzunlukları
$u1, u2$	Tabakaların x yönündeki yer değiştirmeleri
$v1, v2$	Tabakaların y yönünde yer değiştirmeleri
A_1, A_2	Üst ve alt tabakaların alanları
D_1, D_2	Üst ve alt tabakaların eğilme rijitlikleri
w	Yanal yer değiştirme

E	Camın elastisite modülü
G	Camın kayma elastisite modülü
G_I	Ara tabakanın kayma elastisite modülü
q	Düzgün yayılı yük
Π	Sistemin toplam potansiyel enerjisi
U^{i}_{m}	Üst ve alt tabakaların eksenel gerinme enerjisi
U^{i}_{b}	Üst ve alt tabakaların eğilme enerjisi
U_I	Ara tabakanın kayma gerilme enerjisi
Ω	Yük potansiyel enerjisi
ν	Poisson oranı
α	Yanal yer değiştirme için yakınsamayı sağlayan rahatlatma parametresi
β	Eksenel yer değiştirme için yakınsamayı sağlayan rahatlatma parametresi

5 Referanslar

[1] Hooper, J.A. On the bending of architectural laminated glass. International Journal of Mechanical Sciences. 1973; 15, 309-323.

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

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

[4] Behr R.A.; Linden M.P.; Minor J.E. Load duration and interlayer thickness effects on laminated glass. Journal of Structural Engineering. 1986; 112(6), 1441-1453.

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

[6] Asik M.Z. Laminated glass plate: revealing of nonlinear behaviorComputers and Structures. 2003; 81, 2659-2671.

[7] Foraboschi P. Analytical model for laminated-glass plate. Composites Part B: Engineering. 43 (5), 2094-2106.

[8] Aşık M.Z.; Tezcan S. A mathematical model for the behavior of laminated glass beams. Computers and Structures. 2005; 83,1742-1753.

[9] Foraboschi P. Behavior and Failure Strength of Laminated Glass Beams. Journal of Engineering Mechanics. 2007; 133 (12), 1290-1301.

[10] Galuppi L.; Royer-Carfagni G. Laminated beams with viscoelastic interlayer. International Journal of Solids and Structures. 2012; 49, 2637-2645.

[11] Zemanová A.; Zeman J.; Šejnoha M. Simple Numerical Model of Laminated Glass Beams. Acta Polytechnica. 2008; 48(6), 22-26.

[12] Krawczyk P.; Frey F.; Zielin´ski A.P. Large deflections of laminated beams with interlayer slips Part 1: model development. Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software. 2007; 24 (1), 17-32.

[13] Asik M.Z., Dural E.; Yetmez M.; Uzhan T. A mathematical model for the behavior of laminated uniformly curved glass beams. Composites Part B:Eng. 2014; 58, 593-604.

[14] Foraboschi P. Three-layered sandwich plate: Exact mathematical model. Composites Part B: Engineering. 2013; 45, 1601-1612.

[15] Foraboschi P. Layered plate with discontinuous connection: Exact mathematical model. Composites Part B: Engineering. 2013; 47, 365-378.

[16] Foraboschi P. Three layered plate: Elasticity solution. Composites Part B: Engineering. 2014; 60, 764-776.

[17] Edel M.T. The effect of temperature on the bending of laminated glas units. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Texas A&M Universitesi, Texas, 1997.