

# CAMIN TEMPERLENMESİNDE ISITMA VE SOĞUTMA SÜREÇLERİNİN KARIŞIK SINIR ŞARTLARINDA SAYISAL MODELLENMESİ

**Selim TÜRKBAŞ ve Ö. Ercan ATAER**

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06570, Maltepe, Ankara,  
[turkbas@gazi.edu.tr](mailto:turkbas@gazi.edu.tr), [oataer@gazi.edu.tr](mailto:oataer@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 15.09.2006; Kabul/Accepted: 25.12.2006)

## ÖZET

Camın yüksek sıcaklıklara dayanımı ve mukavemetinin artırılması temperleme işlemi ile sağlanır. Temperleme sürecinde cam fırın içerisinde yumuşama noktası sıcaklığına kadar ısıtılır. Daha sonra soğutulur ve soğutma sırasında sıcaklık farkları nedeniyle camda kalıcı gerilmeler oluşur. Bu çalışmada tek akı yöntemi kullanılarak soda-kireç silikat cam plakanın ısıtma kaynak terimi hesaplanmış ve enerji denklemi sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı hazırlanmış ve cam plakası içerisindeki sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Çözüm, aynı kalınlıktaki cam için farklı diskretizasyon aralıklarında tekrarlanmış, farklı kalınlıklardaki camlara uygulanmış ısınma eğrileri elde edilmiştir. Sonuçlar literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Cam, temperleme, sayısal analiz, ısıtma ve soğutma.

## NUMERICAL MODELLING OF HEATING AND COOLING PROCESSES IN GLASS TEMPERING WITH MIXED BOUNDARY CONDITIONS

### ABSTRACT

A numerical method is presented for the simulation of the quenching of soda-lime silicate glass plate. The process consists of heating the glass to a temperature above 600 °C and cooling rapidly by air. Using one flux method the radiation source term of the glass is calculated. For one dimensional, unsteady heat conduction and radiation through the glass, the energy equation is solved using finite difference method. A program is written in FORTRAN and the temperature distribution in the glass plate is calculated. Results are given as diagrams and compared with the results given in the literature.

**Keywords:** Glass, quenching, numerical analysis, heating and cooling.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Temperleme işleminin amacı, camın mekanik mukavemetini artırmaktır. Temperlemede artık gerilmelerin dağılımı ve niteliği önemlidir. Temperlemede cam sıcaklığı, yumuşama noktası sıcaklığına kadar yükseltilir. Daha sonra hızla soğutulur. Soğumanın başlarında camın yüzey katmanları iç katmanlara göre daha hızlı soğur ve katmanlar arasında yüksek sıcaklık farkları oluşur, bu katmanların birbirinden farklı büzüşmelerine neden olur. Bunun sonucu olarak önce soğuyan ve daha fazla büzüşen katmanda çekme, daha yavaş soğuyan katmanda bası gerilmeleri oluşur.

Cam kristalize bir yapıya sahip değildir, homojen olduğunda ve bir gerilmeye maruz bırakılmadığında optik açıdan izotropiktir. Camın yüzeyine düşen ışın demetinin bir kısmı camdan yansır, kalanı camın içinde hareketine devam eder. Ortam yoğunluğundaki artış nedeniyle ışık kırılır. Camın geçirgenliği içerisindeki katkı maddelerine bağlıdır. Geçirgenlik, cam içinde alınan yolun ve soğurma katsayısının fonksiyonudur ve

$$\tau = e^{-\kappa L / \cos \theta} \quad (1)$$

bağıntısı ile ifade edilir.  $L$  camın kalınlığı ve  $\theta$  cama giren ışın demetinin normal ile yaptığı açıdır. Yüzey kusurlarının gerilme yoğunlaştırıcı etkileri kırılmanın nedenidir ve çekme gerilmeleri altında kritiktir. Bu nedenle camın yüzeyine ön bası gerilmesi vermek ve mukavemetini artırmak için sık kullanılan yaklaşımdır. Cama uygulanan yükün, camı kırabilecek çekme gerilmelerini oluşturmadan önce yüzeydeki ön bası gerilmelerini aşması gerekir. Camın mukavemeti yüzeye verilen ön bası gerilmesi kadar artar.

Temperleme işleminde, soğuma sırasında camda meydana gelen gerilmelerin analizi için Adams ve Williamson tarafından geliştirilen modelde, camdaki kalıcı gerilmelerin dağılımı

$$\sigma(x) = \frac{E\alpha}{1-\nu} [\bar{T}(x) - T(x)] \quad (2)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Soğutma işlemi esnasında, kalınlığı az olan camlarda, sıcaklık farkları az olur. Bu durum atık gerilmelerin azalmasına yol açar. Bu etki düşük genleşme katsayılı camlarda etkindir [1].

Ping ve Lallemand [2] değişik sınır şartlarında ve ısıtma koşullarında camda meydana gelen sıcaklık dağılımını Hottel yöntemi ile hesaplamıştır. Enerji denklemi kapalı yöntemle, boyutsuz olarak ifade edilmiş ve hesaplanan ısıtma kaynak terimi de eklenerek çözülmüştür. Analiz farklı Biot sayıları için yapılmıştır.

Helene ve Daudeville [3], bir soda-kireç cam içerisinde temperleme işlemi sırasında oluşan gerilmeleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 3 boyutlu olarak hesaplamıştır. Çalışmada, camda meydana gelen yapısal değişiklikler de dikkate alınmış ve deneysel olarak belirlenen gerilim dağılımı ile hesaplamalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Gardon [4], soda-kireç camı için ısıtma işlemleri (tavlama, temperleme) sırasında camda meydana gelen sıcaklık dağılımını hesaplamıştır. Camda meydana gelen soğurmayı, ışınmayı ve iç ışınımın tekrar soğurmasını incelemiştir. Hesaplanan terimlerden ısıtma kaynak terimi elde edilmiş ve bu terim enerji denkleminde kullanılarak sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır.

Field ve Viskanta [5] çalışmalarında soda-kireç camındaki tavlama işleminde soğutma sırasında meydana gelen sıcaklık dağılımını, teorik ve deneysel olarak hesaplamıştır. Teorik hesaplamalarda önce geçirgenlikler katı açılara göre integre edilerek belirlenmiş ve bu değer kullanılarak ısıtma kaynak terimi hesaplanmıştır. Elde edilen veriler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Viskanta ve Lee [6], çalışmalarında, soğutma sürecini incelemiştir. Silindirik geometrideki cam için ısıtma transfer denklemi iki boyutta silindirik koordinatlarda ifade edilmiş ve denklem düşük soğuma hızları için çözülmüştür. Hesaplamalar üç farklı cam için yapılmıştır. Bu camların yarı saydam bantlarda gösterdiği davranış incelenmiştir ve sonuç olarak 2,5-4,5 $\mu$ m dalga boyu aralığında en büyük ısıtma kaynak terimi değeri düz camda elde edilmiştir.

Siegel [7], yarı saydam malzemeler hakkında bugüne kadar yapılan uygulamaların özeti niteliğindeki çalışmada, cam plakalarının ısıtma kaynak teriminin hesaplanması incelemiştir. Çalışmada değişik sınır şartlarında ve cam içerisinde ısı üretimi olduğu durumlarda sıcaklık dağılımını hesaplamıştır.

Temperleme işleminde camda istenilen bazı özellikler vardır: Camın optik olarak düz olması, eğrilik veya dalgalanma olmaması, istenilen mukavemete sahip olması, optik özelliklerini kaybetmemesi ve tam temperlenmiş bir camın kırıldığında çok küçük, keskin köşelere sahip olmayan parçalara ayrılabilmesidir. Isıtma ve soğutma işleminin uygulanacağı camın, fırında kalış süresi, istenilen sıcaklığa ulaşması (soğutma) için gereken zaman öncelikle teorik olarak hesaplanmalıdır.

## 2. TEMEL DENKLEMLER (BASIC EQUATIONS)

Camın enerji denklemi, lineer olmayan bir diferansiyel denklemdir. Analizde tek akı yöntemi kullanılmıştır. Hesaplanan sıcaklık dağılımı kullanılarak, ısıtma esnasında camda oluşan gerilmeler hesaplanmıştır.

Enerji denkleminin çözümünde farklı yöntemler kullanılır. Tek akı yönteminde cam yüzeyine gelen ışımanın yüzeye dik geldiği düşünülür. Camın yüzeyinde meydana gelen yansımalar, ortalama değerler olarak ele alınır. Cam için genel enerji denklemi

$$\rho \frac{De}{Dt} + e \left( \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot V \right) = -\nabla \cdot q'' + q''' - P \nabla \cdot V + \mu \Phi \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Bu bağıntıdaki  $e$  enerjidir ve kinetik ve potansiyel enerjilerdeki değişim ihmal edilirse Denklem (3)

$$\rho C_v \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{q}_t'' \quad (4)$$

şeklinde yazılır. Camın katı olması nedeniyle Denklem (3)'ün sağ tarafındaki son iki terim ihmal edilmiştir. Yoğunluğun zamanla değişmediği kabul edilmiş ve hız sıfır olduğu için eşitliğin sol tarafındaki ikinci terim de sıfır alınmıştır. Cam içerisinde kimyasal veya nükleer tepkime yoktur. Dolayısıyla

cam içerisinde ısı üretimi yoktur ve eşitliğin sağındaki ikinci terim de sıfırdır. Cam içerisindeki ısı transferi iletim ve ışınım ile olacaktır. Denklem (4)

$$\rho C_V \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) - \nabla \cdot q''_{\text{radyasyon}} \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Soğurma, ışıma enerjisi ve ışının aldığı yol ile orantılıdır.

$$(dI_\lambda)_{\text{abs}} = -\kappa_\lambda I_\lambda ds \quad (6)$$

bu bağıntıdaki  $\kappa_\lambda$  doğrusal soğurma sabiti ve  $I_\lambda$  ışıma yoğunluğudur. Işıma yoğunluğu, birim katı açıda ve ışınlarla normal olan birim alandaki ışıma enerjisidir. Denklem (6)'deki "-" işareti yoğunluktaki azalmayı göstermektedir. s yönündeki yayınım

$$(dI_\lambda)_{\text{em}} = \kappa_\lambda I_{b\lambda} ds \quad (7)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Işıma transfer denklemi

$$I_\lambda(s+ds, s, t+dt) - I_\lambda(s, s, t) = \kappa_\lambda I_{b\lambda}(s, t) ds - \kappa_\lambda I_\lambda(s, s, t) ds - \sigma_{s\lambda} I_\lambda(s, s, t) ds + \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(s_i) \Phi_\lambda(s_i, s) d\Omega_i ds$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (8) ile verilen eşitliğin sol tarafındaki ilk terim,

$$I_\lambda(s+ds, s, t+dt) = I_\lambda(s, s, t) + dt \frac{\partial I_\lambda}{\partial t} + ds \frac{\partial I_\lambda}{\partial s} \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (9), Denklem (8)'de kullanılır ve yeniden düzenlenirse,

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\lambda}{\partial t} + \frac{\partial I_\lambda}{\partial s} = \kappa_\lambda I_{b\lambda} - \kappa_\lambda I_\lambda - \sigma_{s\lambda} I_\lambda + \frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\bar{s}_i) \Phi_\lambda(\bar{s}_i, \bar{s}) d\Omega_i \quad (10)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdaki  $c = ds/dt$  dir. Denklem (10)'da ki ilk terim "c"nin değerinin çok büyük olması nedeni ile ihmal edilebilir ve ışıma yoğunluğunun zamana bağlı değişimi ortadan kalkar. Saçılma sabiti ile soğurma katsayısının toplamı "β" olsun.

$$\beta_\lambda = \kappa_\lambda + \sigma_{s\lambda} \quad (11)$$

Denklem (11), Denklem (10)'da kullanılarak

$$\frac{\partial I_\lambda}{\partial s} = s \cdot \nabla I_\lambda = \kappa_\lambda I_{b\lambda} - \beta_\lambda I_\lambda + \frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(s_i) \Phi_\lambda(s_i, s) d\Omega_i \quad (12)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (12) katı açıya göre integre edilir ve yeniden düzenlenirse ışıma transfer denklemi için

$$\nabla \cdot \int_{4\pi} s I_\lambda d\Omega = \int_{4\pi} \kappa_\lambda I_{b\lambda} d\Omega - \int_{4\pi} \beta_\lambda I_\lambda d\Omega + \int_{4\pi} \frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(s_i) \Phi_\lambda(s_i, s) d\Omega_i \quad (13)$$

bağıntısı elde edilir. Saçılma ihmal edilirse  $\sigma_{s\lambda} = 0$  olacaktır ve bu durumda  $\beta_\lambda = \kappa_\lambda$  olur. Denklem (13)

$$\nabla \cdot \int_{4\pi} s I_\lambda d\Omega = 4\pi \kappa_\lambda I_{b\lambda} - \kappa_\lambda \int_{4\pi} I_\lambda d\Omega \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir. Işıma ısı akısı, "s" yönündeki ışıma yoğunluğunun tüm katı açılar için integre edilmesi ile bulunur:

$$q_{\lambda, \text{rad}} = \int_{4\pi} I_\lambda s d\Omega \quad (15)$$

Cam yüzeyine düşen ışıma (irradiasyon)

$$G_\lambda = \int_{4\pi} I_\lambda d\Omega \quad (16)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (15), Denklem (14)'de kullanılarak

$$\nabla \cdot q_{\lambda, \text{rad}} = 4\pi \kappa_\lambda I_{b\lambda} - \kappa_\lambda \int_{4\pi} I_\lambda d\Omega \quad (17)$$

bağıntısı elde edilir. Denklem (16), Denklem (17)'de kullanılarak ışıma ısı akısı için

$$\nabla \cdot q_{\lambda, \text{rad}} = \kappa_\lambda (4\pi I_{b\lambda} - G_\lambda) \quad (18)$$

bağıntısı yazılabilir. Işıma ısı akısı Denklem (5)'de kullanılarak enerji denklemi,

$$\rho C_V \frac{DT}{Dt} = \bar{\nabla} \cdot (k \bar{\nabla} T) - \int_0^\infty \kappa_\lambda (4\pi I_{b\lambda} - G_\lambda) d\lambda \quad (19)$$

şeklinde yazılabilir.

### 3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ (SOLUTION METHOD)

Denklem (19) ile verilen enerji denklemi lineer olmayan bir denklemdir. Eşitliğin sağındaki ilk terim ısı iletimi terimidir ve ikinci terim ışıma terimidir. Bu ifade bir integro-diferansiyel denklemdir. Işımanın

iletim ile birlikte hesaplanması gerektiğinden Denklem (19)'un çözümü çok dar koşullar dışında mümkün değildir.

Isınma camın iki yüzeyinde de aynıdır ve ısınmanın simetrik olduğu kabul edilebilir. Analizde camın yarı kalınlığı dikkate alınmıştır. Sayısal çözümün yapılacağı tek boyutlu enerji denklemi karteziyen koordinatlarda

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial q_{rad}}{\partial x} \quad (20)$$

şeklinde yazılabilir. Işıma ısı akısı

$$S = -\frac{\partial q_{rad}}{\partial x} \quad (21)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Bu eşitlikteki S ışıma kaynak terimidir. Denklem (21) Denklem (20)'de kullanılarak

$$\rho C \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + S \quad (22)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklem ileri sonlu farklar yöntemi kullanılarak

$$\rho C \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} = k \frac{T_{m+1}^p - 2T_m^p + T_{m-1}^p}{(\Delta x)^2} + S \quad (23)$$

şeklinde yazılabilir. Sayısal çözümünde aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

1. Isıtma simetriktir
2. Dokunma direnci ihmal edilmiştir.
3. Camda, iç ışıma ve soğurma vardır ancak saçılma yoktur.
4. Camın boyutları, ışınların dalga boyundan büyüktür, dolayısıyla dalga etkileşimi yoktur.
5. Kırılma indeksi sabittir.
6. Fırın çeperi siyah cisim davranışı gösterir.
7. Cam optik olarak düzdür ve optik geometri, Fresnel ve Snell kanunları geçerlidir.

Başlangıçta camın tüm noktalarında sıcaklığın sabit olduğu kabul edilmiştir. Bilinen sıcaklık dağılımı kullanılarak başlangıçta camın yüzeyinde ve içerisindeki noktalarda ışıma kaynak terimi hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler enerji denkleminde kullanılarak sıcaklık bir sonraki zaman adımı için hesaplanmış ve bu sıcaklık dağılımı ile ışıma kaynak terimi hesaplanmıştır. Soğurma katsayısının, belirli dalga boyları arasında sabit olduğu düşünülmüştür.

### 3.1 Işıma Kaynak Teriminin Hesaplanması (90 Derece) (Calculation of the Radiation Source Term for the Angle of 90 Degree)

Denklem (23)'deki "S" teriminin hesaplanmasında tek akı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin özelliği, ışınların camın yüzeyine dik gelmesidir. Gerçekte ışıma camın yüzeyine 0-180 dereceleri arasında gelmekte ve gelen ışının camın normali ile yaptığı açıya bağlı olarak yüzeyin yansıtıcılığı değişmektedir. Çalışmada ortalama değer alınarak yansıtıcılık hesaplara dahil edilmiştir. Işıma kaynak terimi, soğurma ve yayınımdan oluşur. Bu yöntemde, cam katmanlarının iç yayınımların diğer katmanlar tarafından yeniden soğurulması ihmal edilir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi camın üst yüzeyine düşen ışınların bir bölümü cam içerisinde belirlenen katmana ve o katmanı geçer ve camın alt yüzeyine ulaşır, ışınların bir kısmı geri yansır bir kısmı camı terk eder. Katman ışınların etkisi ile ısınır. Kaynaktan gelen ışıma düşünülürken, katmanın üst yüzeyinin camın üst yüzeyine uzaklığı  $\xi_1$  ve katmanın alt yüzeyinin camın üst yüzeyine olan uzaklığı  $\xi_2$  alındığında camın üst yüzeyinden katmanın üst kısmına kadar olan geçirgenlik,

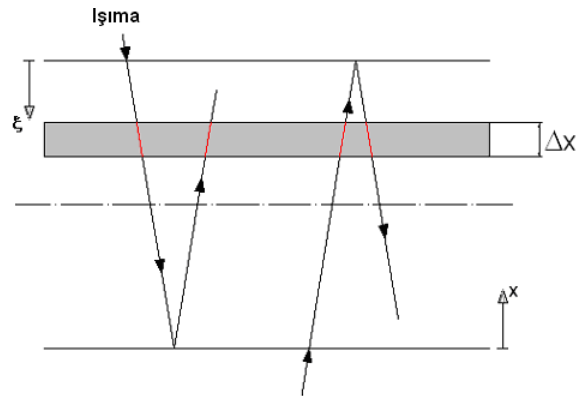
$$\tau = e^{-\kappa_1 \xi_1} \quad (24)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Camın üst yüzeyinden katmanın alt kısmına olan geçirgenlik

$$\tau = e^{-\kappa_1 \xi_2} \quad (25)$$

ve camın üst yüzeyinden gelen ve camın alt yüzeyinden geri yansıtıp katmanın alt kısmına olan geçirgenlik L kalınlığındaki cam için

$$\tau = \rho_a \cdot e^{-\kappa(2L - \xi_2)} \quad (26)$$



Şekil 1. Işıma kaynak teriminin  $\Delta x$  kalınlığındaki katman için modellenmesi ve üst ve alt kaynaktan gelen ışınımın görünümü (Modelling of radiation source term, and the appearance of radiation coming from the top and bottom)

şeklinde yazılır. Üst kaynaktan, katmana olan ışıma kaynak terimi

$$S_{üst} = \frac{\sigma}{\Delta x} \left[ \begin{array}{l} (1 - \rho_{u1})[(e^{-\kappa_1 \xi_1} \\ -e^{-\kappa_1(\xi_1 + d\xi)}) \\ + \rho_{a1}(e^{-\kappa_1(2L - \xi_2)} \\ -e^{-\kappa_1(2L - \xi_2 + d\xi)})] \\ \times (F(0, \lambda_1, T_f) T_f^4 \\ - F(0, \lambda_1, T_{katman}) T_{katman}^4) \\ + (1 - \rho_{u2})[(e^{-\kappa_2 \xi_1} \\ -e^{-\kappa_2(\xi_1 + d\xi)}) \\ + \rho_{a2}(e^{-\kappa_2(2L - \xi_2)} \\ -e^{-\kappa_2(2L - \xi_2 + d\xi)})] \\ \times (F(\lambda_1, \lambda_2, T_f) T_f^4 \\ - F(\lambda_1, \lambda_2, T_{katman}) T_{katman}^4) \end{array} \right] \quad (27)$$

şeklinde ifade edilir. Fırında alt kaynaktan gelen ışıma benzer şekilde

$$S_{alt} = \frac{\sigma}{\Delta x} \left[ \begin{array}{l} (1 - \rho_{a1})[(e^{-\kappa_1 \xi_2} \\ -e^{-\kappa_1(\xi_2 + d\xi)}) \\ + \rho_{u1}(e^{-\kappa_1(2L - \xi_1)} \\ -e^{-\kappa_1(2L - \xi_1 + d\xi)})] \\ \times (F(0, \lambda_1, T_f) T_f^4 \\ - F(0, \lambda_1, T_{katman}) T_{katman}^4) \\ + (1 - \rho_{a2})[(e^{-\kappa_2 \xi_2} \\ -e^{-\kappa_2(\xi_2 + d\xi)}) \\ + \rho_{u2}(e^{-\kappa_2(2L - \xi_1)} \\ -e^{-\kappa_2(2L - \xi_1 + d\xi)})] \\ \times (F(\lambda_1, \lambda_2, T_f) T_f^4 \\ - F(\lambda_1, \lambda_2, T_{katman}) T_{katman}^4) \end{array} \right] \quad (28)$$

şeklinde ifade edilir. Enerji denkleminde kullanılan ışıma kaynak terimi, katmana her yönden gelen ışıma kaynak terimlerinin toplamıdır. Toplam kaynak terimi

$$S = S_{üst} + S_{alt} \quad (29)$$

şeklinde ifade edilir. Bu değerler, başlangıçtaki sıcaklık dağılımı kullanılarak hesaplanır. Elde edilen sonuçlar, sonlu farklar yöntemi ile yazılmış enerji denkleminde kullanılarak  $\Delta t$  zamanı sonunda camdaki sıcaklık dağılımı hesaplanır.

Camın kalınlığı 14 mm'dir ve kalınlık 14 eşit aralığına bölünmüştür.

$$\Delta x = \frac{(L/2)}{14} \quad (30)$$

Bu parçaların her birine enerji denklemi uygulanmıştır. Şekil 2'de görüldüğü gibi sınır katmanının kalınlığı  $\Delta x/2$  olarak alınmıştır.

İç düğümler için enerji denklemi

$$\rho C \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} = T_m^p + \frac{k \Delta t}{\rho C} \frac{T_{m+1}^p - 2T_m^p + T_{m-1}^p}{(\Delta x)^2} + S \quad 1 < m < 15 \quad (31)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (31)  $T_m^{p+1}$  için çözümler ve yeniden düzenlenirse

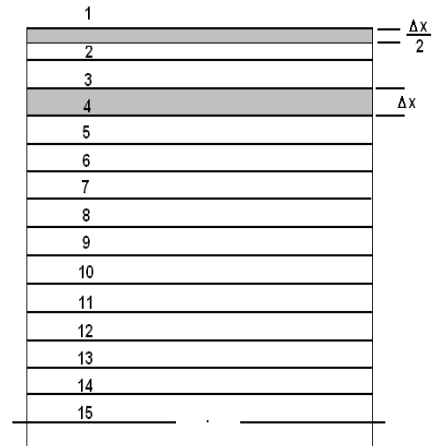
$$T_m^{p+1} = \left(1 - 2 \frac{k \Delta t}{\rho C (\Delta x)^2}\right) T_m^p + \frac{k \Delta t}{\rho C} \frac{T_{m-1}^p + T_{m+1}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{S \Delta t}{\rho C} \quad 1 < m < 15 \quad (32)$$

bağıntısı elde edilir. Stabilite kriteri

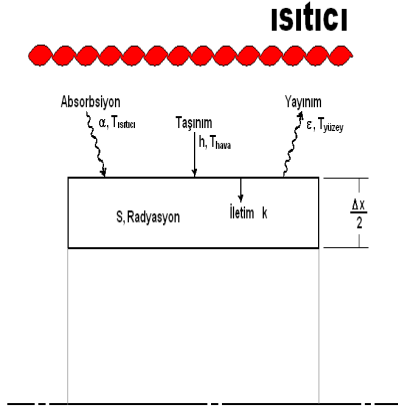
$$\left(1 - 2 \frac{k \Delta t}{\rho C (\Delta x)^2}\right) > 0 \quad (33)$$

şeklinde yazılabilir. Camın fiziksel özellikleri Viskanta'dan [6] alınmıştır.

Şekil 3'te görüldüğü gibi yüzeydeki ısı aktarımı incelendiğinde, yüzeye kaynaktan gelen, ışıma, camın yüzeyinin yaptığı yayılım, camın yüzeyinden içeri



Şekil 2. Sayısal çözümün uygulandığı camın diskretizasyonu (Discretization of glass for numerical solution)



**Şekil 3.** Cam yüzeyinde oluşan ısı transferi (Heat transfer on the surface of the glass)

olan ısı iletimi, yüzeydeki doğal taşımaya ve cam içerisine olan ışımaya dikkate alınmıştır. Büyük dalgalı boylardaki ışınlar yüzeyde absorbe edilir. Yayınlım dışarıya doğru büyük dalga boylarında yüzeyde gerçekleşir.

Cam yüzeyinin enerji denklemi

$$T_m^{p+1} = T_m^p + \frac{2\Delta t}{\rho C \Delta x} \left[ \begin{array}{l} -k \frac{T_m^p - T_{m+1}^p}{\Delta x} \\ +h(T_{hava} - T_m^p) \\ -\varepsilon F(\lambda_2, \infty, T_m^p) \sigma (T_m^p)^4 \\ +\alpha F(\lambda_2, \infty, T_f) \sigma T_f^4 \end{array} \right] + \frac{S \Delta t}{\rho C} \quad (34)$$

şeklinde yazılabilir.

Camın orta düzlemi için önceki iki düğüm kullanılarak enerji denklemi

$$T_m^{p+1} = \left(1 - 2 \frac{k \Delta t}{\rho C (\Delta x)^2}\right) T_m^p + \frac{k \Delta t}{\rho C} \frac{T_{m-1}^p + T_{m+1}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{S \Delta t}{\rho C} \quad (35)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Başlangıçta ışımanın camın yüzeyine dik geldiği düşünülmüştü. Bu durumda ışımanın normal ile yaptığı açı sıfır olur. Camın ışımaya kaynak terimini hassas olarak hesaplamak için hesaplamalara kırılma indisini ve kırılma açılarını dahil etmek gerekir. Bu da ortalama geliş açısının bilinmesini gerektirir.

Işınlar cam yüzeyine 90 derece açı ile gelirse maksimum kırılma açısı elde edilir ve maksimum kırılma açısı 41 derecedir. Yüzeyin yansıtıcılığı opak bantta 0,09'dur. Fresnel denklemi kullanılarak bu yüzey yansıtıcılığına eşit geliş açısı yaklaşık 45 derece olarak hesaplanmıştır. Toplam soğuruculuk,

$$A = (1 - \rho)(1 - \tau) \left[ 1 + \rho\tau + \rho^2\tau^2 + \dots \right] \quad (36)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Köşeli parantezin içindeki terim bir geometrik seridir ve

$$\sum_{n=0}^{\infty} \rho\tau^n = 1 + \rho\tau + \rho^2\tau^2 + \dots + \rho^n\tau^n + \dots \quad (37)$$

şeklinde açılır. Bu serinin açılımı

$$\sum_{n=0}^{\infty} \rho\tau^n = \frac{1}{1 - \rho\tau} \quad (38)$$

şeklinde dir. Toplam soğurma

$$A = \frac{(1 - \rho)}{1 - \rho\tau} \left[ \begin{array}{l} (e^{-\kappa_1 \xi_1} / \cos \theta_2) \\ -e^{-\kappa_1 \xi_2} / \cos \theta_2 \\ + (e^{-\kappa_1 (L - \xi_2)} / \cos \theta_2) \\ -e^{-\kappa_1 (L - \xi_1)} / \cos \theta_2 \end{array} \right] \quad (39)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Gelen enerjiyi ilgili dalgalı boyu bandında siyah cisim enerji spektrum oranları ile çarparak ışımaya kaynak terimi

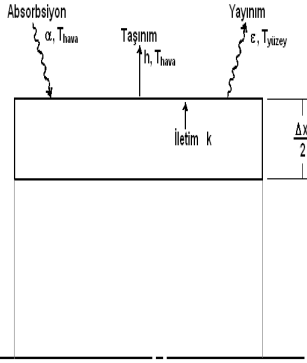
$$S = \left[ \begin{array}{l} F(0, \lambda_1, T_f) \sigma T_f^4 \\ -F(0, \lambda_1, T_{katman}) \sigma T_{katman}^4 \\ \times \frac{(1 - \rho)}{1 - \rho\tau} \left[ \begin{array}{l} (e^{-\kappa_1 \xi_1} / \cos \theta_2) \\ -e^{-\kappa_1 \xi_2} / \cos \theta_2 \\ + (e^{-\kappa_1 (L - \xi_2)} / \cos \theta_2) \\ -e^{-\kappa_1 (L - \xi_1)} / \cos \theta_2 \end{array} \right] \\ + \left[ \begin{array}{l} F(\lambda_1, \lambda_2, T_f) \sigma T_f^4 \\ -F(\lambda_1, \lambda_2, T_{katman}) \sigma T_{katman}^4 \\ \times \frac{(1 - \rho)}{1 - \rho\tau} \left[ \begin{array}{l} (e^{-\kappa_2 \xi_1} / \cos \theta_2) \\ -e^{-\kappa_2 \xi_2} / \cos \theta_2 \\ + (e^{-\kappa_2 (L - \xi_2)} / \cos \theta_2) \\ -e^{-\kappa_2 (L - \xi_1)} / \cos \theta_2 \end{array} \right] \end{array} \right] \quad (40)$$

şeklinde ifade edilir. Bu bağıntı, yüzey ve iç düğümler için sonlu farklar yöntemi ile yazılan enerji denklemi kullanılarak sıcaklık dağılımı elde edilir.

### 3.2 Isınma Sürecinde Oluşan Gerilmelerin

#### Hesaplanması (Calculation of the Stresses Occurring during the Heating)

Şekil 4'te verilen cam yüzeyine herhangi bir kuvvet uygulanmamıştır. Sıcaklık cam kalınlığında (x ekseninde) değişmektedir. Bu koşullar altında gerilmeler,



**Şekil 4.** Soğuma sürecinde yüzeyde meydana gelen ısı transferi (Heat transfer on the surface during the cooling process)

$$\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = f(x) \text{ ve } \sigma_{xx} = \sigma_{yx} = \sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0 \quad (41a,b)$$

şeklinde ifade edilir. Temel denklem

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[ f + \frac{\alpha E}{1-\nu} T \right] = 0 \quad (42)$$

bağıntısı ile verilir [1]. Denklem (42) iki defa integre edilerek

$$\sigma_{zz} = \sigma_{yy} = f = -\frac{\alpha E}{1-\nu} T + C_1 x + C_2 \quad (43)$$

bağıntısı elde edilir. Birim uzunluk için kuvvet ve moment camın yüzeylerinde sıfır olacaktır:

$$\int_{-h}^h \sigma_{zz} dx = \int_{-h}^h \sigma_{zz} x dx = 0 \quad (44a)$$

$$\int_{-h}^h \sigma_{yy} dx = \int_{-h}^h \sigma_{yy} x dx = 0$$

Denklem (43) deki  $C_1$  ve  $C_2$  sabitlerinin değerleri bu iki sınır şartı kullanılarak hesaplanır. Kuvvetin integrali alınarak

$$\int_{-h}^h -\frac{\alpha E}{1-\nu} T(x) dx + \int_{-h}^h C_1 x dx + \int_{-h}^h C_2 dx = 0 \quad (45)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntının açılımı da

$$\int_{-h}^h -\frac{\alpha E}{1-\nu} T(x) dx + (C_1 \frac{h^2}{2} - C_1 \frac{h^2}{2}) + (C_2 h - (-C_2 h)) = 0 \quad (46)$$

şeklinde yazılabilir.  $C_1$  terimli ifade sıfır olur. Diğer sabit ise

$$C_2 = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \frac{\alpha E}{1-\nu} T(x) dx \quad (47)$$

bağıntısı ile ifade edilir.  $C_1$ 'i hesaplamak için moment terimi integre edilerek,

$$\int_{-h}^h -\frac{\alpha E}{1-\nu} T(x) x dx + (C_1 \frac{h^3}{3} - C_1 \frac{(-h)^3}{3}) + (C_2 \frac{h^2}{2} - (C_2 \frac{h^2}{2})) = 0 \quad (48)$$

bağıntısı elde edilir.  $C_1$  sabitinin değeri,

$$C_1 = \frac{3}{2h^3} \int_{-h}^h \frac{\alpha E}{1-\nu} T(x) x dx \quad (49)$$

bağıntısından hesaplanır. Bu sabitlerin değerleri kullanılarak

$$\sigma_{zz} = \sigma_{yy} = f = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[ -T + \frac{1}{2h} \int_{-h}^h T(x) dx + \frac{3x}{2h^3} \int_{-h}^h T(x) x dx \right] \quad (50)$$

ifadesi elde edilir. Analizde hesaplanan sıcaklık dağılımı kullanılarak, cam kalınlığında oluşan gerilme dağılımı hesaplanmıştır.

### 3.3 Soğutma işlemi (Cooling Process)

Soğutma işleminden amaç camda kalıcı gerilme yaratmaktır. Kalıcı gerilmeler camın mukavemetini artırır. Soğuyan camın yüzey katmanları, iç katmanlara göre daha hızlı soğur ve büzüşür. Bu büzüşme hızlarındaki farktan dolayı daha hızlı büzüşen katmanda çeki, daha yavaş büzüşünde bası gerilmeleri oluşur. Daha sonra camın orta kısmı katılaşmaya başladıktan sonra gerilmelerin yönü değişir ve iç kısımlar daha geniş bir sıcaklık aralığında soğuduğundan iç kısımda çeki, yüzeyde bası gerilmeleri oluşur. Gerilmelerin büyüklüğü soğutma hızının ve camın kalınlığının fonksiyonudur. Soğutma camı zorlayan hızlı bir işlemdir. Soğutma zorlanmış taşınım ile olur. Literatürde de soğutma süreci için aynı yöntem önerilmiştir. Enerji denklemi

$$T_m^{p+1} = \left( 1 - 2 \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \right) T_m^p + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{m+1}^p + T_{m-1}^p) \quad (51)$$

şeklinde yazılabilir. Yüzey için enerji denklemi

$$T_m^{p+1} = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \left[ \left( \frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta t} - 2 - 2 \frac{h \Delta x}{k} \right) T_m^p + 2T_{m+1}^p + \frac{2\alpha \Delta x}{k} \sigma T_{hava}^4 - \frac{2\varepsilon \Delta x}{k} \sigma (T_m^p)^4 \right] \quad (52)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Analizde Denklem (51) ve Denklem (52) çözülerek sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Isıtma işleminde sıcaklık dağılımını, ısıl gerilmeleri ve soğutma sürecinde sıcaklık dağılımının hesaplanması için FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Cam kalınlıkları, 6,1 ve 14 mm olarak alınmıştır. 6,1 mm cam kalınlığının seçilmesinin nedeni literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırmaktır.

Diskretizasyon aralığı 14 mm kalınlığındaki cam için 0,0005 m olarak hesaplanmıştır. Analizde camın yoğunluğu  $\rho = 2514,8 \text{ kg/m}^3$ , özgül ısı  $C = 1000,5 \text{ J/kg.K}$ , ısı iletim katsayısı  $k = 1,514 \text{ W/m.K}$  ve ısı aktarım katsayısı sabit ve  $h = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$  alınmıştır [14]. Bu veriler kullanılarak zaman aralığı,  $\Delta t < 0,20773s$  elde edilmiştir.

Analizde  $\Delta t = 0,05 \text{ s}$  alınmıştır. Işıma özellikleri cam için opak bantta bilinmektedir: Yüzey yansıtıcılığı  $\rho = 0,09 - 0,1$ , soğurma sabiti  $\alpha = 1 - \rho = 0,9$ , Kirchoff yasasına göre yayınım opak bantta  $\varepsilon = \alpha = 0,9$  olarak alınmıştır [9]. Yarı saydam bantlarda yansıtıcılık değerleri polarize yansımadan dolayı Fresnel denklemlerinden,

$$\rho = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left( \frac{1,5-1}{1,5+1} \right)^2 = 0,04 \quad (53)$$

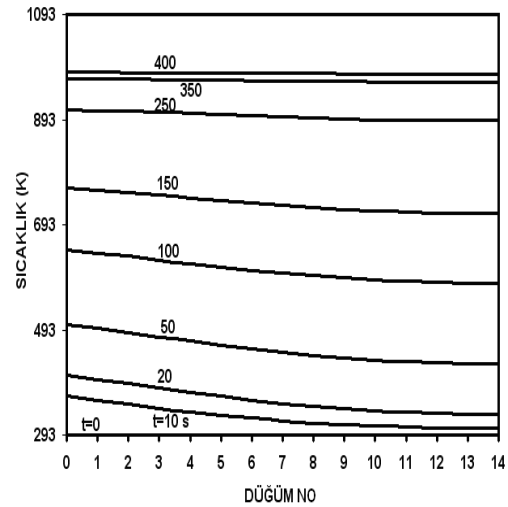
değeri hesaplanabilir. Analizde ortalama fırın sıcaklığı kullanılmıştır. Bu durumda görüş faktörlerini (view factor) hesaplamasına gerek kalmamıştır. Fırın sıcaklığı camın yumuşama noktası sıcaklığına uygun olarak  $T_f = 1000K$  alınmıştır.

##### 4.1. 14 mm Kalınlığındaki Camda Sıcaklık Dağılımı (Işımların Camın Yüzeyine Dik Geldiği Durum, 90 Derece Yöntemi) (Variation of the Temperature in the Glass of 14 mm Thickness)

Farklı zamanlarda 14 mm kalınlığındaki cam içerisinde sıcaklık dağılımının konumla değişimi

Şekil 5'te görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 14 mm kalınlığındaki cam yaklaşık 400 s'de fırın sıcaklığına ulaşmakta ve soğutma işlemi için sıcaklık dağılımı dağılımı elde edilmektedir. Camın orta düzlemi için hesaplanan ışıma kaynak teriminin zamanla değişimi de Şekil 6'da verilmiştir.

14 mm kalınlığındaki cam için yüzey ile eksen arasındaki maksimum sıcaklık farkının yüzey sıcaklığı ile değişimi Şekil 7'de görülmektedir. Grafikte maksimum sıcaklık farkı  $77,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ve gerçekleştiği zaman 40 s'dir. Aynı kalınlıktaki cam için 7, 14 ve 28 düğüm sayısı için analiz tekrarlanmıştır. Düğüm sayısının farklı olması sonuçları etkilememiştir.



Şekil 5. Farklı zamanlarda 14 mm kalınlığındaki cam içerisinde sıcaklık dağılımının (Variation of the temperature with the location in the glass of 14 mm thickness at different times)

Isıl iletim katsayısı ve özgül ısı literatürdeki çalışmaların pek çoğunda sabit alınmıştır. Bu çalışmada, fiziksel özellikler için ampirik denklemler geliştirilmiştir. Sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı ve özgül ısı,

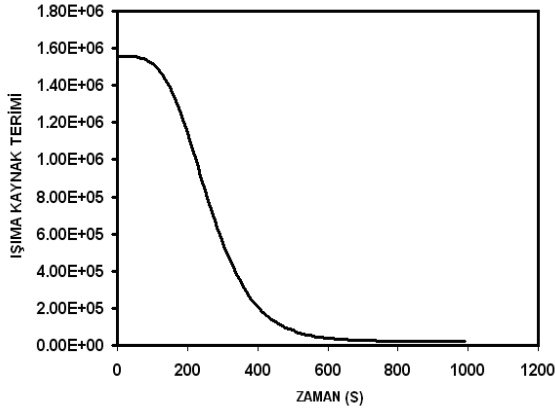
$$k = 0,975 + 8,58 \cdot 10^{-4} (T - 273) \text{ W/m.K} \quad (54)$$

$$C = 893 + 0,4T - 1,8 \cdot 10^{-7} / T^2, \text{ J/kg.a, } T < T_g = 850K \quad (55)$$

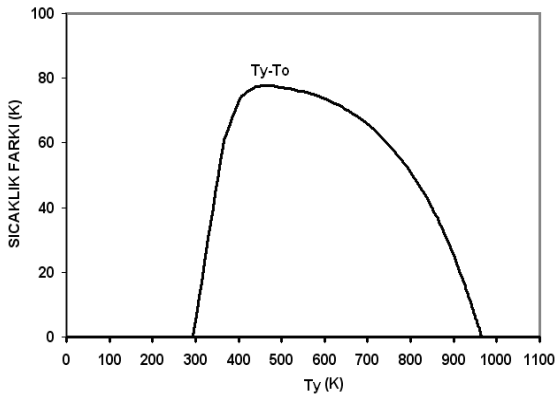
$$C = 1433 + 6,5 \cdot 10^{-3} T, \text{ J/kg.a, } T > T_g \quad (56)$$

ampirik denklemleri ile ifade edilmiştir. Değişken ısı fiziksel özellikler kullanarak hesaplanan sıcaklık dağılımı Şekil 8'de verilmiştir. Analizde ısınma süresi 50-100 saniye arasında artmıştır. Bu artışa daha çok özgül ısıdaki sıcaklıkla değişim neden olmuştur. Özgül ısıdaki %10 artış camın kalınlığına bağlı olarak sıcaklıklarda % 20'ye yakın düşümlere neden olmaktadır.





**Şekil 6.** Camın orta düzleminde hesaplanan ısıma kaynak teriminin zamanla değişimi (The variation of the radiation source term at the midplane with time)



**Şekil 7.** 14 mm kalınlığındaki camda, maksimum sıcaklık farkının (camın yüzey sıcaklığı ile orta düzleminin sıcaklığı arasındaki fark) yüzey sıcaklığı ile değişimi (The variation of the maximum temperature difference with the surface temperature of the glass of 14 mm thickness)

#### 4.2. 6,1 mm Kalınlığında Camda Sıcaklık Dağılımının Hesaplanması (90 Derece)

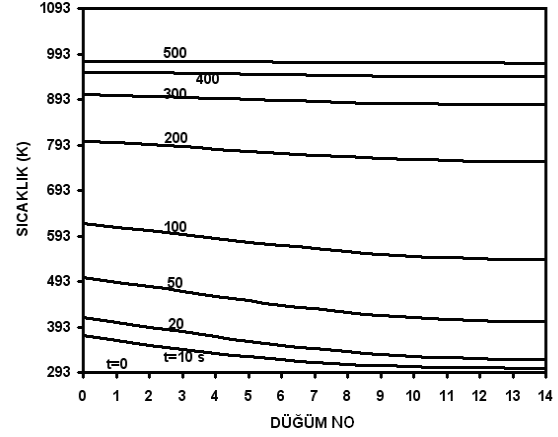
(Calculation of the Variation of the Temperature in the glass of 6.1 mm Thickness, the Angle of 90 Degree)

Elde edilen sıcaklık dağılımı camın kalınlığındaki konumlara göre Şekil 10'da verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırma için, 0, 10, 20, 30, 60, 120, 240, 480. saniyelerde alınmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde verilen çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Isı iletim katsayısı  $k=0,8376$  W/m.K alınmıştır. Özgül ısının değerinin karşılaştırılan çalışmada hangi değerde alındığı bilinmediği için bir takım değerler sırası ile denenmiştir. Denenen değerler yukarıdaki ampirik denklemin belirlediği sınırlar içindedir.

Şekil 11'in sol tarafı karşılaştırılan çalışmadan alınmış, sağ tarafı ise bu çalışmada elde edilen verilerdir. Grafikte görüldüğü gibi çalışmada ulaşılan sonuçlar Garson'un sonuçları ile uyum içerisindedir [8].

Camın orta düzlem sıcaklığının zamanla değişimi, farklı kalınlıklardaki camlar için ısınma zamanı açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma üç ayrı kalınlıktaki cam için yapılmıştır. Bunlar 6,1 mm, 14mm, 20mm camlardır.



**Şekil 8.** 14 mm kalınlığındaki cam içerisinde sıcaklıkla değişken ısıl fiziksel özellikler kullanılarak hesaplanan sıcaklık dağılımı (Variation of the temperature with location in the glass that has the thickness of 14 mm considering the variation of properties with temperature)

#### 4.3. 14 mm Camda Sıcaklık Dağılımının Hesaplanması (45 Derece Yaklaşımı)

(Calculation of the Variation of the Temperature in the glass of 14 mm Thickness, the Approach of the Angle of 45 Degree)

Bu yöntemde ışınlar camın içerisine girerken normal ile yaptıkları açının 45 derece olduğu varsayılmıştır. Buna bağlı olarak Snell denkleminde, kırılma açısı hesaplanır. Işıma kaynak terimi hesaplanır, daha sonrada diskretize edilmiş enerji denklemi yüzeydeki sistem ve iç düğümler için çözülür. Bu yöntemde giriş açısı 45 derece, buna bağlı kırılma açısı ise 28 derecedir. Yansıtıcılık ortalama 0,09'dur. Bu değer aynı zamanda opak bantta camdaki yansıtıcılıktır. Bu yöntemde de, aynı şekilde programın doğruluğu açısından, farklı düğüm analizi yapılmıştır.

Maksimum sıcaklık farkı 77 derecedir. Diğer yöntemden farkı, bu sıcaklık farkına ulaşması daha çabuk olmuştur. Diğerleri 40. saniyelerde ulaşırken burada 30.saniyede maksimum farka ulaşılmaktadır. Karşılaştırmada da görüldüğü gibi fark oldukça küçüktür. Bu yöntemin (45 derece), diğer yöntemden (90 derece) daha fazla gerçeğe yaklaştığı da görülmektedir. Bunun nedeni yönel bağımlılığın hesaplamalara ilave edilmesidir.

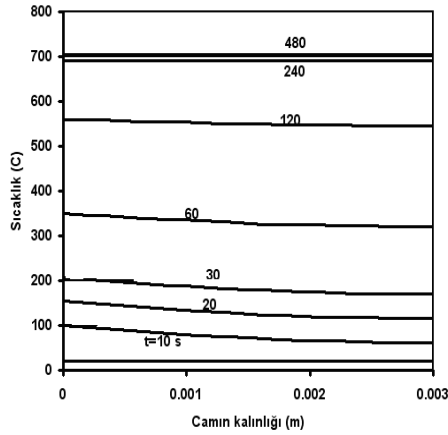
#### 4.4. Isıl Gerilmelerin Analizi (Analysis of the Thermal Stresses)

6,1 mm kalınlığındaki cam için hesaplanan ısıl gerilmeler, aynı kalınlık için 90 derece yaklaşımı ile hesaplanan sıcaklık dağılımı kullanarak

hesaplanmıştır. Bu sıcaklık dağılımı, 20inci saniye için bu sefer yarı cam kalınlığında değil tüm cam kalınlığında aşağıdaki şekilde verilmiştir. Hesaplama kullanılan sabitler; Young modülü, Poisson oranı ve ısıl genleşme katsayıları literatürden alınmıştır [4].

20.s'deki sıcaklık dağılımının seçilmesinin nedeni, 6,1 mm kalınlığındaki camda maksimum sıcaklık farkına bu sürede ulaşılmasıdır. Bu  $T(x)$  fonksiyonu kullanılarak Denklem (50) çözülmüştür. Eşitliğin çözümü için FORTRAN dilinde bir program hazırlanmıştır. Elde edilen gerilme dağılımı Şekil 14'te verilmiştir.

Gerilme ekseninde ki negatif değerler bası bölgesini, pozitif değerler çeki bölgesini göstermektedir. Bu gerilme dağılımı, Karvinen'in [9] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İki sonuç arasında küçümsenmeyecek fark vardır. Bu farkın nedeni karşılaştırılan çalışmada sıcaklık dağılımlarının hangi başlangıç koşulunda, hesaplandığı bilinmemektedir.



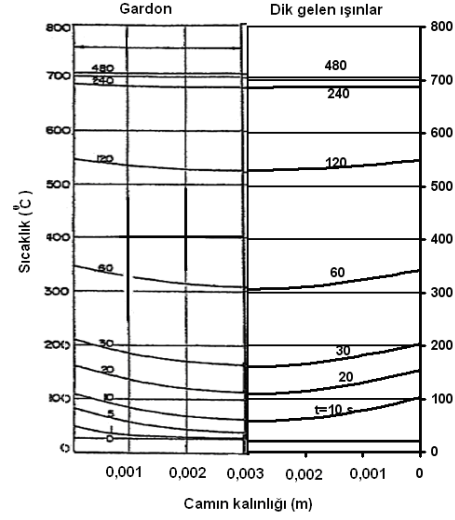
**Şekil 9.** 6,1 mm kalınlığındaki camda sıcaklığın zamanla camın kalınlığı boyunca değişimi (Figure 9. Variation of the temperature along the thickness of glass with the thickness of 6.1 mm)

#### 4.5. Soğuma İşlemi (Cooling Process)

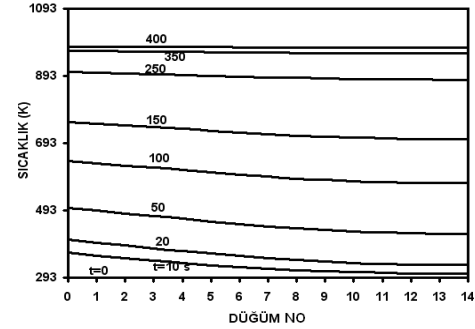
Analizde soğutma işleminde ısıma ile ısı transferinin etkisi ihmal edilmiştir. Soğumayı belirleyen faktör zorlanmış taşınım ile olan ısı aktarım katsayısıdır. Bu değer literatürdeki çalışmalarda 100 Bu çalışmada 280  $W/m^2K$  alınmıştır.  $W/m^2K$  den 3000  $W/m^2K$ 'e kadar alınmaktadır. Soğuma işleminin başlangıcında ortam sıcaklığının 20°C sıcaklıkta olduğu varsayılmıştır. Denklem (51) ve (52) kullanılarak sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

Analizde cam yüzeyinin ve merkez noktasının soğuma eğrileri elde edilmiş ve Şekil 15'de verilmiştir. Camın temperlenmesi ile ilgili olarak ısınma esnasında meydana gelen ısıma ile olan ısı aktarımı ihmal edilemez. Temperleme camın mekanik

mukavemetini artırmayı amaçlar ve bu artışa soğuma işlemi esnasında oluşan gerilmeler neden olur.



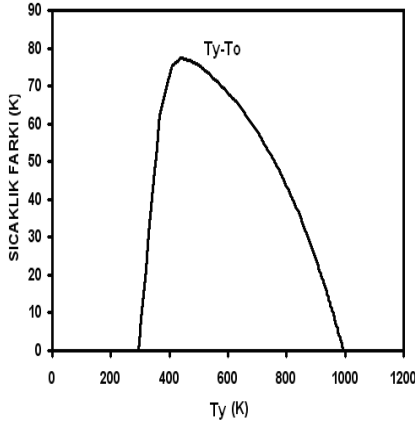
**Şekil 10.** 6,1 mm kalınlığında cam için elde edilen sıcaklık dağılımının, Garson'un çalışması ile karşılaştırılması [8] (Comparison of the results with the results proposed by Garson [8] for the glass of 6.1 mm thickness)



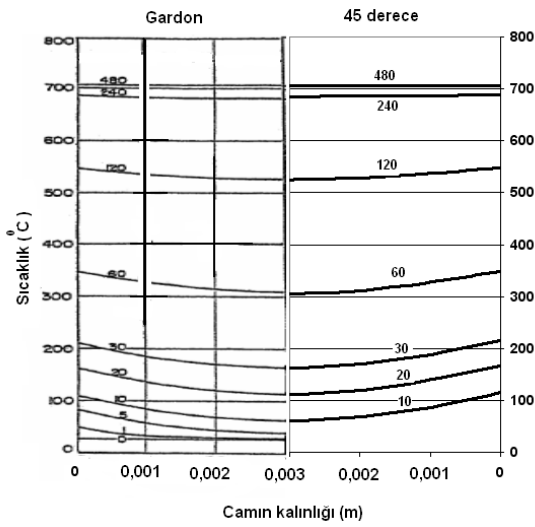
**Şekil 11.** 14 mm kalınlığındaki cam içerisinde sıcaklık dağılımının konumla ve zamanla değişimi (45 derece yaklaşımı) (The variation of the temperature with location at different times for the glass of 14 mm thickness (45 degree approach))

#### 5. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI (DISCUSSION OF THE RESULTS)

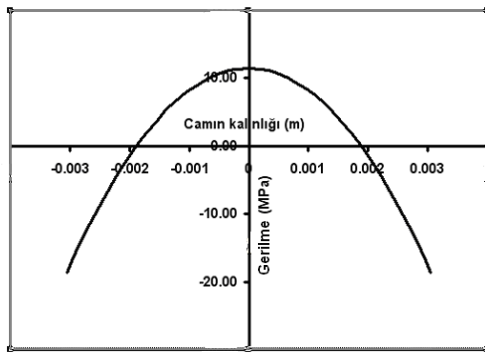
Çalışmada FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu program kullanılarak camın orta düzlem sıcaklığının zamanla değişimi, 6,1mm, 14mm, 20mm kalınlıklarındaki camlar için hesaplanmıştır. Camdaki sıcaklık dağılımı, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmak için 0, 10, 20, 30, 60, 120, 240, 480. saniyelerde hesaplanmıştır. Elde edilen veriler literatürde verilen çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Hazırlanan bilgisayar programı farklı kalınlıklardaki cam içerisindeki sıcaklık dağılımının hesaplanmasında kullanılabilir.



**Şekil 12.** Yüzeysel-merkez sıcaklık farkının yüzey sıcaklığı ile değişimi (Variation of surface midplane temperature difference with surface temperature)



**Şekil 13.** 6,1 mm cam için hesaplanan sıcaklık dağılımının karşılaştırılması (45 derece) (Comparison of results with the results proposed by Gardon for the glass of 6.1 mm thickness)



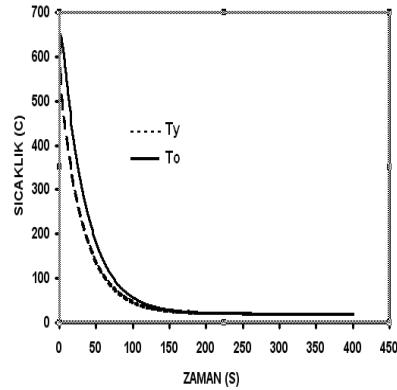
**Şekil 14.** 6,1 mm camın ısıtılması sırasında oluşan gerilme dağılımı (Stress distribution during the heating of the glass of 6.1 mm thickness)

Camın mukavemetinin artırılması ve yüksek sıcaklıklara dayanımı temperleme işlemi ile olur. Camın temperlenmesinde cam sıcaklığı, cam türünün belli olan yumuşama noktası sıcaklığına kadar artırılır. Daha sonra fırından çıkartılır ve hızla

soğutulur. Soğutma işlemi başladıktan sonra camın dış katmanları hızla büzüşür ve rijit hale gelir. Camın iç katmanları akışkan haldedir, sıcaktır ve genişlemeye devam eder.. Sürecin devamında, iç kısımlarda soğuma başlar ve büzüşür. Fakat çevresi rijit bir yapıdadır. Bu durum atık gerilmelerin oluşmasına neden olur. Cam homojen sıcaklığa yaklaştıkça, yüzeyde yüksek basma gerilmeleri ve iç kısımda çekme gerilmeleri oluşur. Sayısal analizden elde edilen sonuçlar Gardon'un sonuçları ile uyum içerisindedir [8].

Camın temperlenmesinde ısıtma işleminde ısıtma ile ısı aktarımı dikkate alınmış fakat soğutma işleminde ihmal edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan tek akı metodunda cam üzerine düşen ısıtma yüzeye dik veya 45° açı ile geliyormuş gibi düşünülmüş ve cam yüzeyindeki yansımalar, ortalama değerler olarak alınmıştır. Bu varsayım literatürde kullanılan bir kabullenmedir.

Camın temperlenmesinde ısıtma işleminde ısıtma ile ısı aktarımı dikkate alınmış fakat soğutma işleminde ihmal edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan tek akı metodunda cam üzerine düşen ısıtma yüzeye dik veya 45° açı ile geliyormuş gibi düşünülmüş ve cam yüzeyindeki yansımalar, ortalama değerler olarak alınmıştır. Bu varsayım literatürde kullanılan bir kabullenmedir.



**Şekil 15.** 6,1mm kalınlığındaki camın soğuma eğrisi (The cooling curve of the glass with 6.1 mm thickness)

## SEMBOLLER

- C** : Özgül ısı (J/kg.K)
- C<sub>2</sub>** : Plank spektral enerji dağılım sabiti (μm.K)
- E** : Enerji (W)
- E** : Young Modülü (Pa)
- h** : Isı taşınım katsayısı (W/m<sup>2</sup>.K)
- I** : Toplam ısıtma yoğunluğu (W/m<sup>2</sup>.t)
- k** : Isı iletim katsayısı (W/m.K)
- L** : Camın kalınlığı (m)
- M** : Konum Parametresi
- n** : Kırılma indeksi
- p** : Zaman parametresi
- q** : Isı akısı (W/m<sup>2</sup>)
- S** : Isıtma kaynak terimi (W)

**t** : Zaman (s)  
**T** : Sıcaklık

#### Yunan Harfleri

**$\alpha$**  : Isıl genleşme katsayısı ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), Isıl yayınım sabiti  
 **$\epsilon$**  : Yayınım sabiti  
 **$\kappa$**  : Soğuruculuk katsayısı ( $\text{m}^{-1}$ )  
 **$\lambda$**  : Dalga boyu ( $\mu\text{m}$ )  
 **$\rho$**  : Yoğunluk ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), Yansıtıcılık  
 **$\sigma$**  : Steffan – Boltzmann sabiti ( $5,67.10^{-8}$   $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}^4$ ), Gerilme  
 **$\tau$**  : Geçirgenlik  
 **$\nu$**  : Poisson oranı  
 **$\xi$**  : Camın üst yüzeyinden aşağıya doğru olan eksen

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Boley, B.A., Weiner, T.J., “Theory of Thermal Stresses”, **Wiley**, 277-279, 1960.
2. Ping, T.H., Lallemand, M., “Transient Radiative-Conductive Heat Transfer in Flat Glasses Submitted to Temperature, Flux and Mixed Boundary Conditions”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Cilt 32 (5), 795-810, 1989.
3. Helene, C., Daudeville, L., “Simulation of Thermal Tempering of a Glass Plate, Inner and

Edge Residual Stresses”, [www.geo.hmg.inpg.fr/publis/thermsal.pdf](http://www.geo.hmg.inpg.fr/publis/thermsal.pdf), 5.10.2000.

4. Gardon, R., “Calculation of Temperature Distributions of Glass Plates Undergoing Heat Treatment”, **Journal of American Ceramic Society**, Cilt 41(6), 200-209, 1958.
5. Field, R.E., Viskanta, R., “Measurement and Prediction of the Dynamic Temperature Distributions in Soda-Lime Glass Plates”, **Journal of American Ceramic Society**, Cilt 73(7), 2047-2053, 1990.
6. Viskanta, R., Lee, K.H., “Effects of Spectral Radiative Properties of Optical Quality Glass”, **2<sup>nd</sup> International Symposium on Radiative Transfer**, Kuşadası, Turkey, 561-578, 1997.
7. Siegel, R., “Transient Effects of Radiative Transfer in Semitransparent Materials”, **International Journal of Engineering Science**, Cilt 36, 1071-1739, 1998.
8. Gardon, R., “Strong Glass”, **Journal of American Ceramic Society**, Cilt 73, 233-246, 1985.
9. Karvinen, R., Rantala, M., “Heat Transfer in Tempering Furnace”, **Glass Processing Days**, Tamper, Finlandiya, 52-55, 1999.