

# OTO CAM TEMPERLEME İŞLEMİNDE ISITMA VE SOĞUTMA SICAKLIKLARININ ANİ SOĞUTMA SÜRESİNE VE PARÇACIK SAYISINA ETKİSİ

**Mehmet AKÇAY\***, **Yakup SEKMEN\*\***, **Mustafa GÖLCÜ\***

\*Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, DENİZLİ/TÜRKİYE

\*\*Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, KARABÜK/TÜRKİYE

[makcay@pau.edu.tr](mailto:makcay@pau.edu.tr), [ysekmen@yahoo.com](mailto:ysekmen@yahoo.com), [mgolcu@yahoo.com](mailto:mgolcu@yahoo.com)

(Geliş/Received: 19.09.2013; Kabul/Accepted: 10.01.2014)

## ÖZET

Cam temperleme işleminde, ısıtma ve ani soğutma aşamalarının hassas bir şekilde kontrol edilmesi ve uygulanması, temper kalitesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada; özel olarak tasarlanmış prototip cam temperleme ünitesinde oto cam temperleme işlemi gerçekleştirilmiş, ısıtma ve soğutma sıcaklıklarına göre ani soğutma süresi ve parçacık sayısındaki değişim incelenmiştir. Standartların dışına çıkmadan, cam temperleme sürecindeki enerji tüketimini minimum seviyede tutulabilmek için uygulanması gereken temperleme şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Üç farklı ortalama yüzey sıcaklığına ( $T_h=620, 650$  ve  $680^\circ\text{C}$ ) kadar ısıtılan camlar, daha sonra dört farklı ortalama yüzey sıcaklığına ( $T_c=70, 250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ ) düşünceye kadar ani olarak soğutulmuştur. Nozul ile cam yüzeyi arasındaki mesafe  $H$ , nozul eksenleri arasındaki mesafe  $S$  olmak üzere;  $2 \leq H/D \leq 8$ ,  $S/D=4$  ve Reynolds sayısı  $Re=20000$  alınmıştır. Yapılan çalışmaya göre; camın ısıtma sıcaklığının yüksek olması, parçacık sayısının da yüksek olmasına neden olurken, soğutma sıcaklığının yüksek olması ise parçacık sayısının düşük olmasına neden olmuştur. Soğutma sıcaklıkları  $T_c=70, 250$  ve  $300^\circ\text{C}$  için ani soğutma süreleri arasında oldukça yüksek bir fark olmasına rağmen, parçacık sayıları arasındaki farkın düşük olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Oto cam temperleme, Hava jetleri, Temper kalitesi

## THE EFFECT OF HEATING AND COOLING TEMPERATURES ON RAPID COOLING TIME AND PARTICLE NUMBER IN AUTO GLASS TEMPERING PROCESS

### ABSTRACT

In terms of tempering quality, controlling and applying of heating and rapid cooling processes are very important in the glass tempering process. In this study, auto glass tempering process was implemented in the prototype glass tempering unit which was designed specifically, exchange of cooling time and particle number was investigated according to heating and cooling temperatures. Without going out of standards, it was aimed to determine the tempering conditions which are needed to keep the energy consumption at minimum in glass tempering process. Glasses that were heated to three different average surface temperatures ( $T_h=620, 650$  and  $680^\circ\text{C}$ ) were rapidly cooled to four different average surface temperatures ( $T_c=70, 250, 300$  and  $400^\circ\text{C}$ ). The distance between the nozzle and the glass surface is  $H$ , the distance between the nozzle axes is  $S$ . It was considered  $2 \leq H/D \leq 8$ ,  $S/D=4$  and Reynolds number  $Re=20000$ . According to the study; while higher heating temperature of the glass resulted in higher particle number, higher cooling temperature resulted in lower particle number. Although there are quite high differences between the sudden cooling times for cooling temperatures  $T_c=70, 250$  and  $300^\circ\text{C}$ , particle numbers are close to each other.

**Keywords:** Auto glass tempering, Air jets, Tempering quality.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz koşulları, fertleri, işletmeleri ve ülkeleri ihtiyaçlarını en ekonomik ve verimli şekilde karşılamaya zorlamaktadır. Tasarruf amacıyla mevcut sistemlerin işletme parametreleri optimize edilerek enerji tüketimleri azaltılmaya veya aynı enerji ile daha fazla üretim yapılmaya çalışılmaktadır. Bu amaçla, cam temperleme sürecinde de temper kalitesine etki eden fırın sıcaklığı, soğutma sıcaklığı, nozul dizilişi, Reynolds sayısı, nozul eksenleri arası mesafe, cam-nozul arası mesafe gibi parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Birçok endüstriyel alanda şeffaflığı ve estetik görünüşünden dolayı yaygın bir şekilde kullanılan cam, esneme kabiliyetinden yoksun ve son derece kırılabilir bir malzemedir [1,2]. Cam malzemesinin basınç, darbe ve ısıya karşı dayanımını artırmak için “temperleme” denilen bir takım ısı işlemleri uygulanmaktadır [3]. Temperleme, materyalin tavlama sıcaklığının üzerinde ısıtılması ve daha sonra hızlı bir şekilde soğutulması işlemine denilmektedir [4].

Temperleme işlemi ile cam yüzeyinde kalıcı basma gerilmeleri oluşturularak dayanımının artırılması sağlanmaktadır [1]. Temperli cama dayanımı veren yüzeydeki basma gerilmesidir [5]. Normal bir camın mukavemeti, temperleme işlemi sonucunda yaklaşık olarak 4-5 kat artmaktadır [5,6]. Temperleme işlemi cam için yapılan son işlemdir ve temperli camın üzerinde herhangi bir delme, kesme vb. işlemler yapılamamaktadır. Temperli camlar kolay kırılmamakta, kırıldığında ise kesici kenarları olmayan, insanlara daha az zarar verecek küçük parçalara ayrılmaktadırlar [7, 8].

Temperli camlar, otomobillerde, trenlerde, uçaklarda, gemilerde, mimari yapılarda ve çeşitli diğer uygulamalarda kullanılmaktadır [4, 9]. Temperli camın kalitesi, büyük ölçüde temperleme işlemi süresince camdan transfer edilen ısıya bağlıdır ve bu işlem de çarpan hava jeti dizileri tarafından gerçekleştirilmektedir [10]. Temperleme sürecinde, camın yapısındaki kalıcı gerilmeler ani soğutma aşamasında oluşturulmaktadır. Temperli cam içerisindeki kalıcı gerilmelerin üniform olmayan dağılımı, camda temper lekelerinin, göz kamaştırıcı parıltıların ve istenmeyen parçacık yapılarının oluşumuna neden olabilmektedir [11]. Bu nedenle cam temperleme sürecinde, ısıtma aşamasının yanında ani soğutma aşamasının da önemle takip edilmesi gerekmektedir.

Konuyla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; Gölcü vd. (2012), yumuşama noktasına kadar ısıtılan farklı büyüklüklerdeki camların, karşılıklı yerleştirilmiş dairesel hava jetleri ile ani olarak soğutulması işleminde meydana gelen ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Nozul-cam arasındaki mesafe olan H/D oranı

$1 \leq H/D \leq 10$ , iki nozul eksenleri arası mesafe olan S/D oranı  $2 \leq S/D \leq 10$  alınmış ve Reynolds sayısı  $Re=30000$ 'de sabit tutulmuştur. Çalışmada en yüksek ortalama Nusselt değeri  $S/D=2$ 'de,  $H/D=4$  oranında 123,3 ve en düşük ortalama Nusselt değeri ise  $S/D=10$ 'da  $H/D=10$  oranında 58,6 olarak elde edilmiştir [12].

Akçay vd. (2011), oto cam temperleme sürecinin ani soğutma aşamasında, cam yüzeyinde meydana gelen ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Soğutma süresi boyunca nozulların birbirine zıt yönde aşağı-yukarı hareket etmeleri sağlanmıştır. En düşük soğutma süresi  $H/D=2$ 'de 51,5 s, en yüksek soğutma süresi ise  $H/D=10$ 'da 73 s olarak ölçülmüş olup, %41,74'lük bir artış belirlenmiştir. En yüksek ortalama Nu sayısı  $H/D=2$  oranında 83,0, en düşük ortalama Nu sayısı ise  $H/D=10$ 'da, 46,3 olarak hesaplanmış olup %44,21'lik bir azalma olduğu açıklanmıştır [13].

Cirillo and Isopi (2009), cam temperleme işleminde ısı transfer katsayısının sayısal olarak değerlendirilmesi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Isı transferi katsayısını hesaplayabilen matematiksel model oluşturmada kullanılan, bir CFD simülasyon matrisi tasarlamışlardır. Çalışmada, cam temperleme işleminde kullanılan hava jetlerinin boyutları ve süreç parametreleri araştırılmıştır. Düz plaka sıcaklığı  $640^{\circ}\text{C}$ , jet çapı 4 ve 8 mm, havanın nozul çıkış hızı 110 ve 140 m/s, jetler arası mesafe 40 ve 60 mm, nozul yüksekliği ise 20 mm ve 60 mm olarak alınmıştır [14].

Sözber ve Yao (2004), cam temperleme işleminde su buharı ilavesi ile basınçlı hava tüketimini ve dolayısıyla da enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Ani soğutma işlemi sırasında yüksek hızlı hava jetleri kullanmışlardır. Su buharı ilavesi ile 2 mm kalınlığındaki cam plakaların temperlenebilmesi için hava basıncında yaklaşık olarak %29, 3 mm ve 4 mm kalınlığındaki cam plakalar için ise yaklaşık olarak %50 oranında bir azalma olduğu belirtilmiştir. Sistem için gerekli olan basınçlı hava ihtiyacının önemli bir şekilde düşülmesi ile ince ve düşük maliyetli temperli camların elde edilebileceği ifade edilmiştir [4].

Monnoyer ve Lochegnies (2008), termal cam temperleme işleminde çarpan hava jetiyle soğutma işlemi ile ilgili deneysel ve nümerik çalışma yapmışlardır. Dört farklı Reynolds sayısında ( $Re=11000, 22000, 33000, 4000$ ) çalışılmış, deneysel ve nümerik hesaplama için en uygun ısı taşınım katsayısı değeri  $210 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak elde edilmiştir. 90 saniye soğutma süresindeki ortalama bağıl hatayı minimum %1,8, maksimum %4 olarak hesaplamışlardır. Nu sayısının Re sayısının bir üssü ile orantılı olarak değiştiği açıklanmıştır. Elde edilen ısı transferinin literatüre göre daha düşük olduğu

görülmüş ve bu durumun sebebi olarak da büyük H/D oranı ve güçlü çapraz akışlar gösterilmiştir [10].

Büyükyıldız (2007) tarafından yapılan çalışmada, cam temperleme işleminde kullanılan bir temperleme fırınının kontrolü tasarlanmış, örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Temperleme fırınının otomasyonunda PLC kullanılmış, ayrıca SCADA yazılımı yardımıyla ilgili parametreler izlenmiştir. 3 mm kalınlığındaki cam tencere kapağı, 100, 105, 110 ve 120 s süresince ısıtılmış ve 4, 10, 15, 20 s süresince de ani olarak soğutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, cam kapak kırılarak 10 cm<sup>2</sup>'lik bir alan içerisinde kalan cam parçacık sayısı belirlenmiştir. Isıtma ve soğutma zamanındaki artışa paralel olarak parçacık sayısının da arttığı, maksimum parçacık sayısının ısıtma zamanı 120 s ve soğutma zamanı 20 s'de elde edildiği görülmüştür [8].

Jambunathan vd. (1992), türbülanslı çarpan jetlerin ısı transferi özelliklerini belirlemek için yapılmış olan deneysel çalışmaları incelemiştir. Çalışmada, deneysel sonuçlarda farklılığa yol açan nozul geometrilerinin ayrıntıları, ölçüm teknikleri, boyutsuz değişkenlerin tanımlanma şekilleri belirtilmiştir. İncelenen veriler kullanılarak Nusselt (Nu) sayısı için bir korelasyon elde edilmiş ve korelasyon; Reynolds (Re) sayısı, nozul-plaka mesafesi (H/D) ve durgunluk noktasından uzaklığın (x/D) bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir [15].

San ve Lai (2001), düz bir plakanın soğutulması üzerine yaptıkları çalışmada, soğutma işlemi için sınırlandırılmış dairesel hava jetleri kullanmışlardır. İki nozul arasındaki mesafenin yerel Nusselt sayısı üzerine etkisini araştırmışlardır. Plaka üzerinde yüzey ısı akısı 1500 W/m<sup>2</sup> olarak sabit alınmıştır. Farklı Reynolds sayılarında (10000≤Re≤30000) ve S/D oranlarında (4≤S/D≤16) incelemeler yapılmıştır. H/D=2 için optimum S/D=8, H/D=3 için S/D=12, H/D=5 için S/D=6 elde edilmiştir. H/D=4 için Re=30000 iken optimum S/D=12; Re=20000 iken iki optimum S/D değeri S/D=6 ve 12 elde edilmiştir. Re=10000 iken ise optimum S/D=6 elde edilmiştir [16].

Yapılan bu çalışmada; oto cam temperleme işlemi ele alınmış, farklı ısıtma (T<sub>h</sub>) ve soğutma (T<sub>c</sub>) sıcaklıklarında, farklı H/D oranlarında ve sabit Reynolds (Re) sayısında, ani soğutma süresi ve parçacık sayısındaki değişim deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, standartları karşılamak şartıyla, cam temperleme işleminde enerji tüketiminin minimum seviyede tutulabilmesi için uygulanması gereken temperleme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneylerde 6 mm kalınlığında ve S/D=4 oranına uygun boyutlardaki (83,1x96 mm) cam numuneleri kullanılmıştır. Ani soğutma ünitesinde 8 mm iç çapında ve 80 mm boyunda, düz, dikışsız, pürüzsüz alüminyum borudan

yapılmış karşılıklı olarak yerleştirilmiş, S/D=4 oranına sahip üçgen dizilişli toplam 16 adet nozul kullanılmıştır. Üç farklı ortalama yüzey sıcaklığına (T<sub>h</sub>=620, 650 ve 680°C) kadar ısıtılan cam, daha sonra dört farklı ortalama yüzey sıcaklığına (T<sub>c</sub>=70, 250, 300 ve 400°C) düşünceye kadar ani olarak soğutulmuştur. Elde edilen temperli camlar kırılarak parçacık sayıları belirlenmiştir. Nozul ile cam yüzeyi arasındaki mesafe H, nozul eksenleri arasındaki mesafe S olmak üzere; 2≤H/D≤8 ve Reynolds sayısı 20000 alınmıştır.

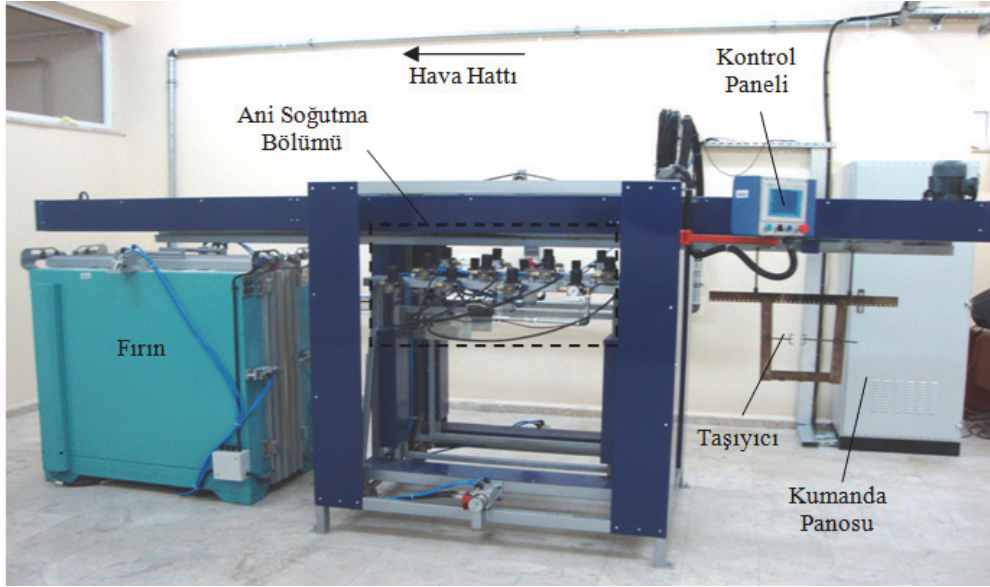
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

Deneylerde, S/D=4 oranına sahip, üçgen dizilişli nozul sistemine uygun ölçülerde (83,1x96 mm) ve 6 mm kalınlığında cam kullanılmıştır. 48 farklı deneyin yapıldığı çalışma, iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, camın fırın içersisinde üç farklı ortalama yüzey sıcaklığına kadar (T<sub>h</sub>=620, 650 ve 680°C) ısıtılması ve daha sonra da ani soğutma ünitesinde, Re=20000 değeri ve H/D=2,4,6 ve 8 oranlarına göre, dört farklı ortalama yüzey sıcaklığına (T<sub>c</sub>=70, 250, 300 ve 400°C) düşünceye kadar ani olarak soğutulması işlemleri için geçen süreler belirlenmiştir. İkinci bölümde ise birinci bölümde belirlenen, her bir ısıtma ve soğutma sıcaklıkları için minimum ve maksimum soğutma sürelerinin elde edildiği H/D oranlarına göre cam temperleme işlemi gerçekleştirilmiş, temperli camların parçacık sayıları belirlenmiştir.

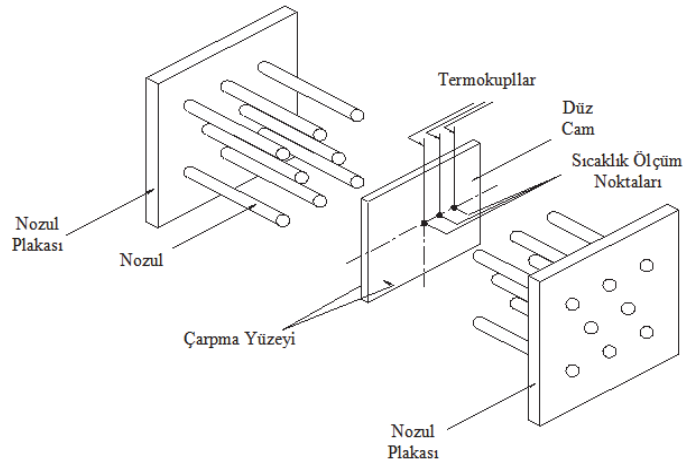
### a) Deneysel Düzenegi (Experimental Setup)

Camın ısıtılması işleminde 10 kW gücünde, 0,38 m<sup>3</sup> iç hacime sahip elektrikli bir fırın kullanılmıştır. Fırın içi sıcaklık değişimini ölçmek için 1200°C sıcaklığa dayanabilen 3 adet DIN 43710 standardına göre üretilmiş NiCr-Ni termokupl kullanılmıştır. Ani soğutma ünitesinde kullanılan soğutma havasının sağlanmasında, 30 kW gücünde, 5,1 m<sup>3</sup>/min debide ve 7 bar çalışma basıncında vidalı kompresör ve 5 m<sup>3</sup> hacime sahip basınçlı hava tankı kullanılmıştır. Soğutma ünitesine gelen havanın toplam debisi DN 40 Testo 6443 marka debimetre ile ölçülmüştür. Her bir nozuldan eşit debide ve basınçta hava üflenmesini sağlamak amacıyla da DN15 Testo 6441 debimetre kullanılmıştır. Şekil 1'de deneysel çalışma için özel olarak tasarlanan prototip cam temperleme ünitesi ve ani soğutma bölümünün şematik gösterimi verilmiştir.

Temperleme işleminin başlangıcından bitimine kadar cam yüzey sıcaklıklarının ölçülmesinde 0,81 mm tel çapında, 3,45 mm dış çapında, fiberglas kaplamalı, (-18°C)-(+1100°C) çalışma sıcaklığı aralığında ölçüm yapabilen K tipi (KH-08541-23) flexible termokupllar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan deney düzenegi hakkında ayrıntılı bilgi Ref [17]'de açıklanmıştır.



a)



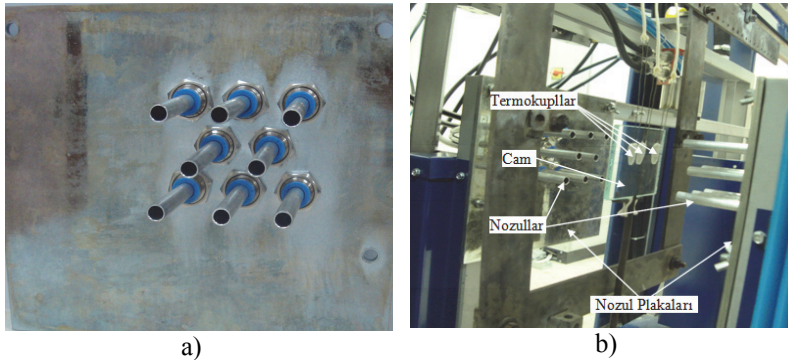
b)

**Şekil 1.** a) Prototip oto cam temperleme ünitesi (Prototype auto glass tempering unit), b) Ani soğutma bölümünün şematik gösterimi (Schematic view of the rapid cooling section)

Ani soğutma işleminde 8 mm iç çapında ve 80 mm boyunda, düz, dikişsiz, pürüzsüz alüminyum borudan yapılmış karşılıklı olarak yerleştirilmiş üçgen dizilişli toplam 16 adet nozul kullanılmıştır. Fırından çıkan yüksek sıcaklıktaki cam, nozul plakalarının arasına girmekte ve soğuyuncaya kadar her iki yüzeyine hava

jetleri çarpmaktadır. Soğutma süresi boyunca nozul plakaları sabittir.

Şekil 2'de  $S/D=4$  oranına sahip üçgen dizilişli nozul plakası ve cam ile nozul plakalarının ani soğutma bölümündeki konumu gösterilmiştir.



a)

b)

**Şekil 2.** a)  $S/D=4$  oranına sahip nozul plakası (Nozzle plate for  $S/D=4$ ) b) Nozul plakalarının soğutma ünitesindeki konumu (Position of the nozzle plate on cooling unit)

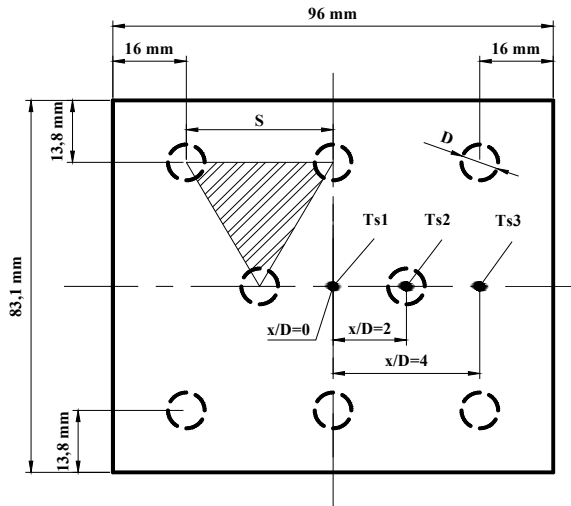
### b) Deneysel Belirsizlikler (Experimental Uncertainty)

Fırın içi sıcaklık değişimini ölçmek için kullanılan DIN 43710 standardına göre üretilmiş NiCr-Ni K tipi termokupulların ölçüm hassasiyeti; 40-333°C arasındaki sıcaklık ölçümlerinde  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  ve 333-1100°C arasındaki sıcaklık ölçümlerinde ise  $\pm 0,75^\circ\text{C}$ 'dir.

Cam yüzey sıcaklıklarının ölçülmesinde kullanılan K tipi flexible termokupulların ölçüm hassasiyeti; (-200°C)-(+285°C) arasındaki sıcaklık ölçümlerinde  $\pm 2,2^\circ\text{C}$ , 285-1250°C arasındaki sıcaklık ölçümlerinde ise  $\pm 0,75^\circ\text{C}$ 'dir. Camın soğutulmasında kullanılan havanın nozuldaki çıkış debisini ölçmek için  $\pm 3\text{ m}^3/\text{h}$  ölçüm hassasiyetine sahip DN15 Testo 6441 akış ölçer kullanılmıştır. Havanın nozuldaki çıkış hızını ölçmek için ise  $\pm 2\text{ m/s}$  ölçüm hassasiyetine sahip Delta OHM HD2134P.1 pitot tüpü kullanılmıştır.

### c) Ölçüm İşlemi ve Hesaplama Yöntemi (Measurement Process and Calculation Method)

Temperleme süreci boyunca, camın sıcaklık değişimleri anlık olarak kaydedilmiştir. Termokupl ile sıcaklık aktarımı 0,5 s aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Termokupullar, cam yüzeyine yüksek ısı iletim katsayısına sahip yapıştırıcı (Omega® CC High Temperature Cement) ile yapıştırılmıştır. Deneylerde kullanılan camın yüzeyindeki sıcaklık ölçüm ve jet çarpma noktaları Şekil 3'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Cam yüzeyindeki sıcaklık ölçüm ve jet çarpma noktaları (Temperature measurement and jet impingement points on the glass surface)

Camın geometrik merkezinden itibaren aynı eksen üzerine farklı  $x/D$  (0, 2 ve 4) oranlarında termokupullar yapıştırılarak üç farklı noktadan sıcaklık ölçümü yapılmaktadır.  $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$  ve  $T_{s3}$  bu noktadaki sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. Bu sıcaklıkların ortalaması alınarak, ısıtma ve ani soğutma süreçleri için cam ortalama yüzey sıcaklığı elde edilmektedir.

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

#### a) Sıcaklık Değişimi (Variation of Temperature)

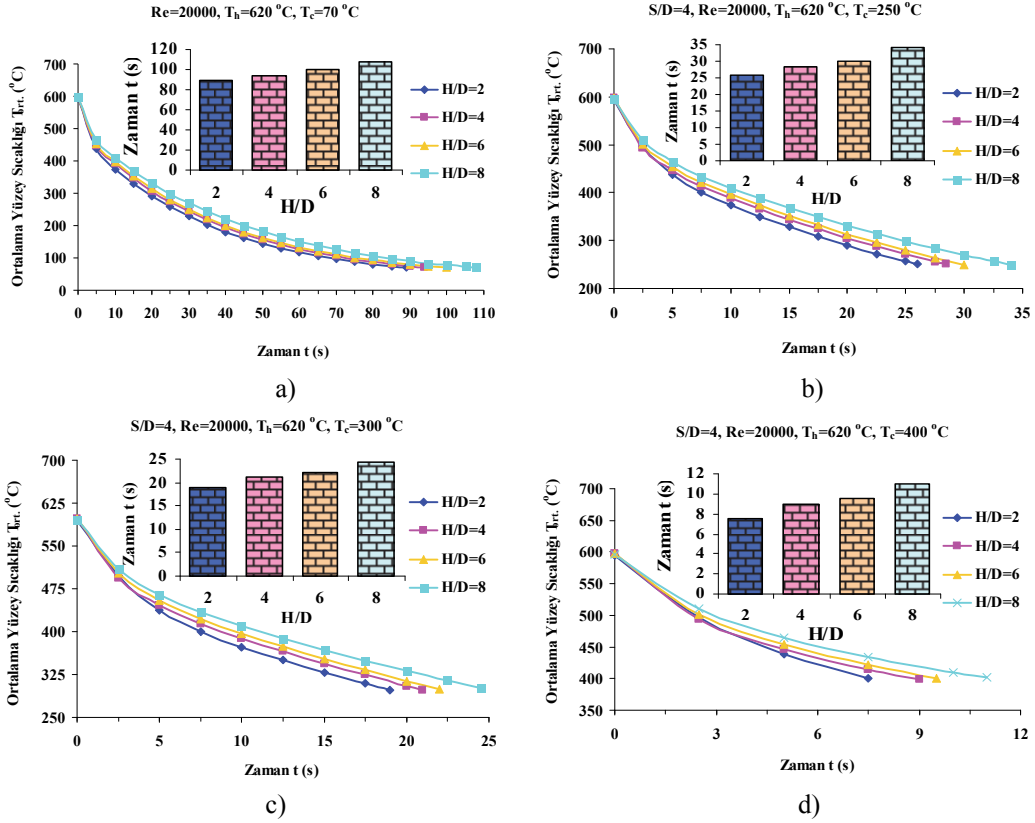
Günümüzde geleneksel olarak gerçekleştirilen cam temperleme işleminde, öncelikli olarak temperleme fırınlarında yumuşama noktasına kadar (yaklaşık 700°C) ısıtılan cam, daha sonra ani soğutma ünitesinde yaklaşık olarak 70°C'ye düşünceye kadar ani olarak soğutulmaktadır. Yapılan bu çalışmada ise üç farklı ortalama yüzey sıcaklığına ( $T_h=620, 650$  ve  $680^\circ\text{C}$ ) kadar ısıtılan cam,  $H/D=2,4,6$  ve 8 oranlarına ve  $Re=20000$  değerine göre dört farklı ortalama yüzey sıcaklığına ( $T_c=70, 250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ ) düşünceye kadar ani olarak soğutulmuştur. Temperleme işlemi boyunca camın ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi anlık olarak takip edilmiş ve her bir ısıtma ve soğutma sıcaklığını elde etmek için geçen süreler kaydedilmiştir.

750°C sıcaklığındaki fırının içerisine gönderilen camın, ortalama yüzey sıcaklığının  $T_h=620, 650$  ve  $680^\circ\text{C}$ 'ye ulaşması için geçen süreler sırasıyla 158, 186 ve 222 s olarak elde edilmiştir. Camın ortalama yüzey sıcaklığının  $T_h=620^\circ\text{C}$ 'den  $T_h=650^\circ\text{C}$ 'ye artırılması için ısıtma süresinde; %17,72 oranında artış olurken,  $T_h=650^\circ\text{C}$ 'den  $T_h=680^\circ\text{C}$ 'ye artırılması için ısıtma süresinde; %19,35 oranında artış olmuştur. Her iki durumda sıcaklık artışının eşit ( $30^\circ\text{C}$ ) olmasına rağmen, ısıtma sürelerindeki artış oranının eşit olmadığı, yüksek sıcaklıklar için ısıtma süresindeki artış oranının daha fazla olduğu görülmüştür.

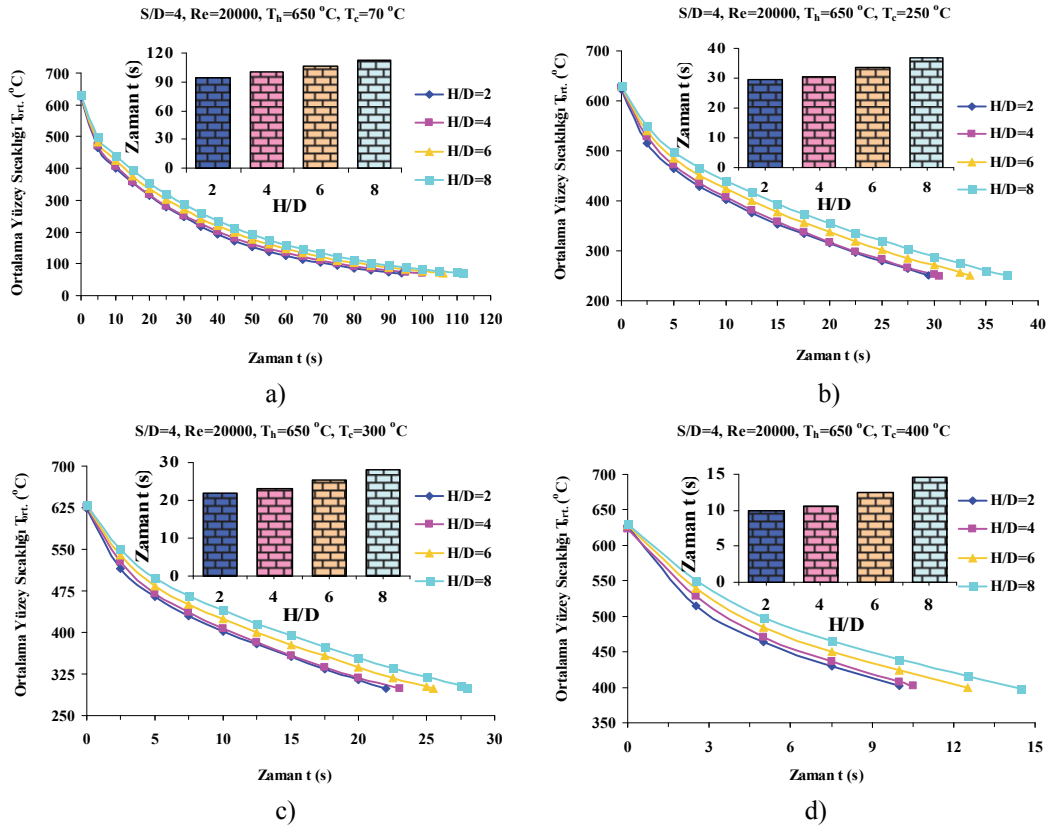
Ortalama yüzey sıcaklığı  $T_h=620^\circ\text{C}$  oluncaya kadar ısıtılmış olan camın daha sonra  $T_c=70, 250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ 'ye ani olarak soğutulması işleminde, cam ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak  $H/D$  oranıyla değişimi Şekil 4'te verilmiştir.

Şekil 4'te görüldüğü üzere,  $H/D$  oranındaki artışa paralel olarak ani soğutma süresinin de arttığı görülmüştür. Soğutma sıcaklıkları  $T_c=70, 250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$  için minimum soğutma süreleri  $H/D=2$  oranında sırasıyla; 89,0, 26,0, 19,0 ve 7,5 s olarak elde edilirken, maksimum soğutma süreleri ise  $H/D=8$  oranında sırasıyla; 108,0, 34,0, 24,5 ve 11,0 olarak elde edilmiştir.  $H/D=2$  oranında elde edilen soğutma süreleri göz önüne alındığında, camın ortalama yüzey sıcaklığının  $T_c=250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi için geçen sürelerin  $T_c=70^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi için geçen süreye göre sırasıyla; %70,79, 78,65 ve 91,57 oranında daha kısa olduğu görülmüştür.

Şekil 5'te, ortalama yüzey sıcaklığı  $T_h=650^\circ\text{C}$  oluncaya kadar ısıtılmış olan camın daha sonra  $T_c=70, 250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ 'ye kadar ani olarak soğutulması işleminde, cam ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak  $H/D$  oranıyla değişimi verilmiştir.



Şekil 4. Cam ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak H/D oranıyla değişimi (Variation of the average surface temperature of the glass based on time for H/D ration) ( $T_h=620^\circ\text{C}$ )



Şekil 5. Cam ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak H/D oranıyla değişimi (Variation of the average surface temperature of the glass based on time for H/D ration) ( $T_h=650^\circ\text{C}$ )

Şekil 5'te görüldüğü üzere, soğutma sıcaklıkları  $T_c=70, 250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$  için minimum soğutma süreleri  $H/D=2$  oranında sırasıyla; 94,0, 29,5, 22,0 ve 10,0 s olarak elde edilirken, maksimum soğutma süreleri  $H/D=8$  oranında sırasıyla; 112,0, 37,0, 28,0 ve 14,5 s olarak elde edilmiştir.

$H/D=2$  oranında elde edilen soğutma süreleri göz önüne alındığında, camın ortalama yüzey sıcaklığının  $T_c=250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi için geçen sürelerin  $T_c=70^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi için geçen süreye göre sırasıyla; %68,62, 76,60 ve 89,36 daha kısa olduğu görülmüştür.

Şekil 6'da ise, ortalama yüzey sıcaklığı  $T_h=680^\circ\text{C}$  oluncaya kadar ısıtılmış olan camın sıcaklığının  $T_c=70, 250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi işleminde, cam ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak  $H/D$  oranıyla değişimi verilmiştir.

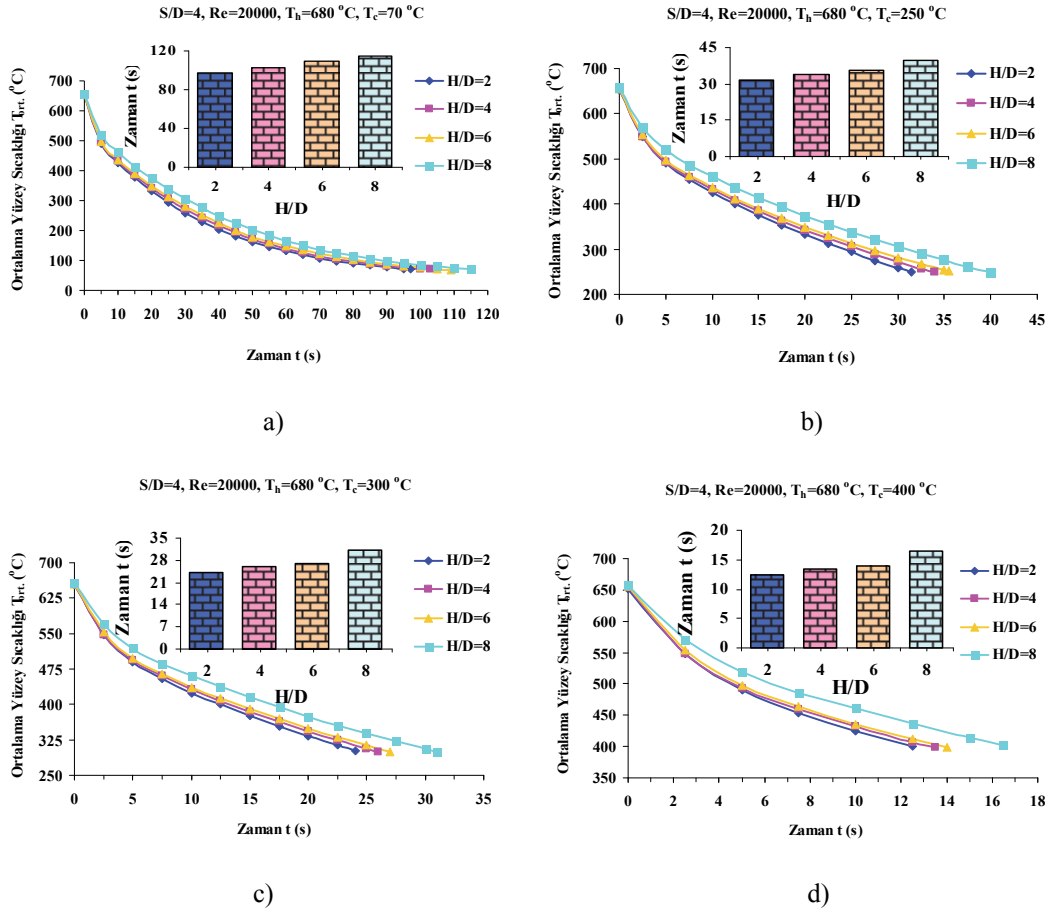
Şekil 6'da görüldüğü üzere, soğutma sıcaklıkları  $T_c=70, 250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$  için minimum soğutma süreleri  $H/D=2$  oranında sırasıyla; 97,0, 31,5, 24,0 ve 12,5 s olarak elde edilirken, maksimum soğutma süreleri ise  $H/D=8$  oranında sırasıyla; 115,0, 40,0 31,0 ve 16,5 s olarak elde edilmiştir.

$H/D=2$  oranında elde edilen soğutma süreleri göz

önüne alındığında, camın ortalama yüzey sıcaklığının  $T_c=250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi için geçen sürelerin  $T_c=70^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi için geçen süreye göre sırasıyla; %67,53, 75,26 ve 87,11 daha kısa olduğu görülmüştür.

Şekil 4-6'dan görüldüğü üzere, ani soğutma işleminde camın ortalama yüzey sıcaklığı zamana bağlı olarak hızlı bir şekilde azalmaktadır. Camın ısıtma sıcaklığının yüksek olması ani soğutma süresinin artmasına neden olurken, soğutma sıcaklığının yüksek olması ise ani soğutma süresinin azalmasına neden olmuştur. Ayrıca  $H/D$  oranının da ani soğutma süresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, artan  $H/D$  oranıyla ani soğutma süresinin de arttığı görülmüştür. Bu durum için, nozul ile cam yüzeyi arasındaki mesafenin artmasının, cam yüzeyinden transfer edilen ısı miktarını düşürdüğü ve dolayısıyla da soğutma süresinin artmasına neden olduğu söylenebilir. Ani soğutma süresinin uzun olması, ani soğutma süresince tüketilen hava miktarını artırmakta ve ayrıca üretim kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır.

Üç farklı ortalama yüzey sıcaklıklarına kadar ısıtılan camın daha sonra dört farklı ortalama yüzey sıcaklığına ani olarak soğutulması işlemi için geçen süreler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 6. Cam ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak  $H/D$  oranıyla değişimi (Variation of the average surface temperature of the glass based on time for  $H/D$  ration) ( $T_h=680^\circ\text{C}$ )

**Tablo 1.** Her bir ısıtma ve soğutma sıcaklıklarının elde edildiği süreler (Times for each heating and cooling temperatures)

Isıtma Sıcaklığı $T_h$ (°C)		$T_h=620^\circ\text{C}$	$T_h=650^\circ\text{C}$	$T_h=680^\circ\text{C}$
Isıtma Süresi (s)		158,0	186,0	222,0
Soğutma Sıcaklığı $T_c$ (°C)	H/D	Ani Soğutma Süresi (s)		
$T_c=70^\circ\text{C}$	2	89,0	94,0	97,0
	4	94,0	100,0	103,0
	6	100,0	106,0	109,0
	8	108,0	112,0	115,0
$T_c=250^\circ\text{C}$	2	26,0	29,5	31,5
	4	28,5	30,5	34,0
	6	30,0	33,5	35,5
	8	34,0	37,0	40,0
$T_c=300^\circ\text{C}$	2	19,0	22,0	24,0
	4	21,0	23,0	26,0
	6	22,0	25,5	27,0
	8	24,5	28,0	31,0
$T_c=400^\circ\text{C}$	2	7,5	10,0	12,5
	4	9,0	10,5	13,5
	6	9,5	12,5	14,0
	8	11,0	14,5	16,5

### b) Parçacık Sayısının Değişimi (Variation of the Number of Particles)

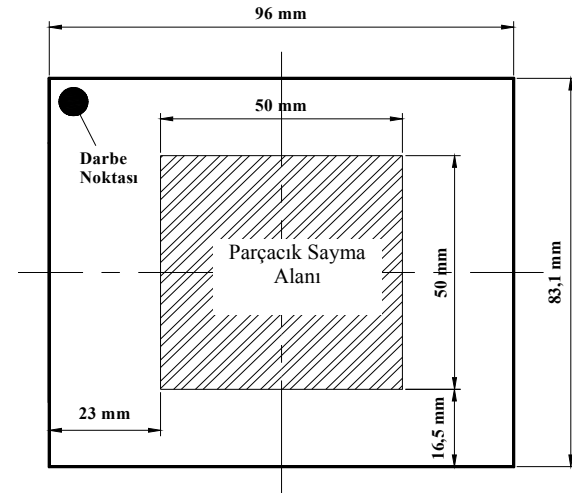
Bu bölümde, her bir temperleme koşulu için belirlenen ısıtma ve ani soğutma süreleri kullanılarak cam temperleme işlemi gerçekleştirilmiş ve parçacık sayılarının belirlenmesi işlemine geçilmiştir. Parçacık sayılarının belirlenmesi işleminde, her bir ısıtma ( $T_h$ ) ve soğutma sıcaklıkları ( $T_c$ ) için minimum ve maksimum soğutma sürelerinin elde edildiği H/D oranları göz önüne alınmıştır. Şekil 4-6 ve Tablo 1'den görüldüğü üzere, her bir ısıtma ve soğutma sıcaklığı için minimum soğutma süresi H/D=2 oranında elde edilirken maksimum soğutma süresi ise H/D=8 oranında elde edilmiştir.

Üç farklı ortalama yüzey sıcaklığına ( $T_h=620, 650$  ve  $680^\circ\text{C}$ ) kadar ısıtılan cam,  $Re=20000$  değerine, H/D=2 ve 8 oranlarına göre dört farklı ortalama yüzey sıcaklığına ( $T_c=70, 250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ ) düşünceye kadar ani olarak soğutulmaktadır. Herhangi bir ortalama yüzey sıcaklığına düşünceye kadar soğutulan cam için daha sonra bir soğutma işlemi uygulanmamakta ve doğal taşınım ile ortam sıcaklığına düşmesi beklenmektedir.

Ortam sıcaklığına düşen temperli camlar şeffaf bir bant ile bantlandıktan sonra sivri uçlu bir çekiç yardımı ile kırılarak parçacık sayıları belirlenmektedir. Her bir deney için üçer adet temperli cam üretilmiş ve ortalaması alınmıştır.

Parçacık sayısının belirlenmesi işleminde, Türk Standartları Enstitüsü tarafından hazırlanan TS 917

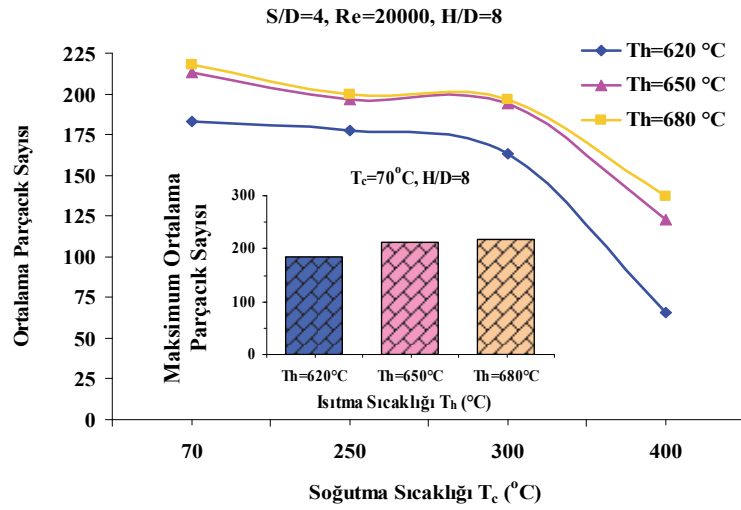
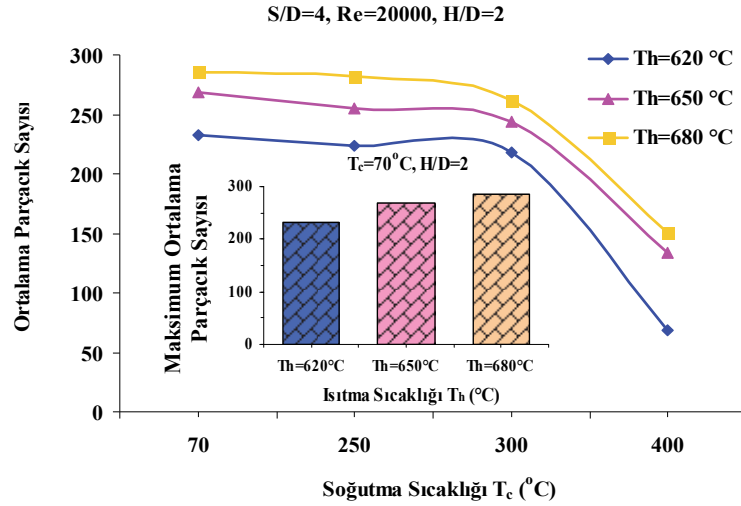
standardı referans alınmıştır. TS 917'ye göre; parçacık sayma işlemi 50x50 mm alan içerisinde yapılmalı ve parçacık sayısı 40'dan az ve 400'den fazla olmamalıdır [18]. Yapılan bu çalışmada parçacık sayma işlemi, Şekil 7'de gösterildiği gibi, camın yüzeyi üzerine çizilen 50x50 mm'lik alan içerisinde gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 7.** Cam yüzeyinde parçacık sayma alanı (Particle counting area on the glass surface)

Ortalama parçacık sayısının soğutma sıcaklığına göre değişimi, H/D=2 ve 8 oranları için sırasıyla Şekil 8 (a) ve (b)'de verilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, H/D oranının 2'den 8'e artırılması durumunda, her bir ısıtma ve soğutma sıcaklıkları için ortalama parçacık sayısında yaklaşık olarak %8-30 oranında azalma





**Şekil 8.** Parçacık sayısının soğutma sıcaklığına bağlı olarak değişimi (Variation of the particle number based on cooling temperature) (a)  $H/D=2$ , (b)  $H/D=8$

meydana gelmiştir. Buna rağmen elde edilen ortalama parçacık sayılarının TS 917 standardı içerisinde (40-400) olduğu görülmüştür.

Isıtma aşamasında, camın ısıtıldığı sıcaklığın yüksek olması, parçacık sayısını artırırken, ani soğutma aşamasında camın soğutulduğu sıcaklığın yüksek olması ise parçacık sayısının düşmesine neden olmuştur. Isıtma sıcaklıkları  $T_h=620, 650$  ve  $680^\circ\text{C}$  için maksimum ortalama parçacık sayısı, soğutma sıcaklığı  $T_c=70^\circ\text{C}$  ve  $H/D=2$  oranında sırasıyla; 232, 268 ve 285 olarak elde edilirken, minimum ortalama parçacık sayısı ise  $T_c=400^\circ\text{C}$  ve  $H/D=8$  oranında sırasıyla; 57, 123 ve 137 olarak elde edilmiştir.

$H/D=2$  oranında elde edilen maksimum ortalama parçacık sayıları göz önüne alındığında, camın  $T_c=70^\circ\text{C}$  yerine  $T_c=250, 300$  ve  $400^\circ\text{C}$ 'ye soğutulması durumunda ortalama parçacık sayısında ısıtma sıcaklığı  $T_h=620^\circ\text{C}$  için sırasıyla; %3,88, 6,03 ve 71,55 oranında azalma olduğu görülmüştür. Isıtma

sıcaklığı  $T_h=650^\circ\text{C}$  için bu azalmanın sırasıyla; %4,85, 9,33 ve 50,00,  $T_h=680^\circ\text{C}$  için ise sırasıyla; %1,05, 8,42 ve 47,02 olduğu görülmüştür.

Her bir ısıtma ve soğutma sıcaklıkları için, maksimum ortalama parçacık sayısı; ısıtma sıcaklığı  $T_h=680^\circ\text{C}$ , soğutma sıcaklığı  $T_c=70^\circ\text{C}$  ve  $H/D=2$  oranında 285 adet olarak elde edilirken, minimum ortalama parçacık sayısı ise ısıtma sıcaklığı  $T_h=620^\circ\text{C}$ , soğutma sıcaklığı  $T_c=400^\circ\text{C}$  ve  $H/D=8$  oranında 57 adet olarak elde edilmiştir.

Camın ortalama yüzey sıcaklığının  $T_h=620^\circ\text{C}$ 'den  $T_h=650^\circ\text{C}$ 'ye artırılması için ısıtma süresinde %17,72 oranında artış olurken bu sıcaklıklarda elde edilen en yüksek ortalama parçacık sayısında ise %15,52 oranında artış meydana gelmiştir. Yine camın ortalama yüzey sıcaklığının  $T_h=650^\circ\text{C}$ 'den  $T_h=680^\circ\text{C}$ 'ye artırılması için ısıtma süresinde %19,35 oranında artış olurken, bu sıcaklıklarda elde edilen en yüksek ortalama parçacık sayısında ise %6,34

oranında artış olmuştur. Görüleceği üzere, camın artan ısıtma sıcaklığı ile birlikte ortalama parçacık sayısı artmakta, ancak  $T_h=650^\circ\text{C}$ 'den sonra bu artış oranı azalmaktadır.

Her bir ısıtma sıcaklığı için, minimum soğutma süresi ve maksimum parçacık sayısının elde edildiği  $H/D=2$  oranına göre; camın ani soğutma aşamasında  $T_c=70^\circ\text{C}$  yerine  $T_c=250^\circ\text{C}$ 'ye kadar soğutulması durumunda, ani soğutma süresinde yaklaşık olarak %67-71 oranında azalma olurken, ortalama parçacık sayısında ise yaklaşık olarak %1-5 oranında azalma meydana gelmiştir.

Benzer şekilde, camın  $T_c=70^\circ\text{C}$  yerine  $T_c=300^\circ\text{C}$ 'ye kadar soğutulması durumunda ani soğutma süresinde yaklaşık olarak %75-79 oranında azalma olurken, ortalama parçacık sayısında ise yaklaşık olarak %6-10 oranında azalma meydana gelmiştir.  $T_c=70^\circ\text{C}$  yerine  $T_c=400^\circ\text{C}$ 'ye soğutulması durumunda ise ani soğutma süresinde yaklaşık olarak %87-92 oranında azalma meydana gelirken, ortalama parçacık sayısında yaklaşık olarak %47-72 oranında azalma olmuştur.

Ortalama parçacık sayısının soğutma sıcaklıkları  $T_c=70$ , 250 ve  $300^\circ\text{C}$  için birbirine oldukça yakın olduğu ve camın ortalama yüzey sıcaklığının özellikle  $250^\circ\text{C}$ 'nin altına düşürülmesinin, parçacık sayısının değişimi üzerinde oldukça düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Farklı ısıtma ve soğutma sıcaklıklarına göre elde edilen ortalama parçacık sayıları Tablo 2'de verilmiştir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada; özel olarak tasarlanmış prototip bir cam temperleme ünitesinde, farklı  $H/D$

oranlarında, farklı ısıtma ( $T_h$ ) ve soğutma sıcaklıklarında ( $T_c$ ), sabit  $S/D$  oranı ve Reynolds sayısında cam temperleme işlemi gerçekleştirilmiş olup, soğutma süresi ve parçacık sayısındaki değişim deneysel olarak incelenmiştir.

Çalışmada, artan  $H/D$  oranı ile birlikte soğutma süresinin de arttığı, ortalama parçacık sayısının ise azaldığı görülmüştür. Her bir ısıtma ve soğutma sıcaklığı için, minimum soğutma süresi ve maksimum parçacık sayısı  $H/D=2$  oranında elde edilirken, maksimum soğutma süresi ve minimum parçacık sayısı ise  $H/D=8$  oranında elde edilmiştir.

Camın ısıtma sıcaklığının yüksek olması, parçacık sayısında artışa neden olurken, soğutma sıcaklığının yüksek olması ise parçacık sayısında azalmaya neden olmuştur. Camın ısıtma sıcaklığının  $T_h=620^\circ\text{C}$ 'den  $T_h=650^\circ\text{C}$ 'ye artırılması durumunda ortalama parçacık sayısında meydana gelen artış oranının, ısıtma sıcaklığının  $T_h=650^\circ\text{C}$ 'den  $T_h=680^\circ\text{C}$ 'ye artırılması durumundaki artış oranından daha yüksek olduğu görülmüştür.

Soğutma sıcaklığının yüksek olması, camın soğutma ünitesinde daha kısa süre kalması ve dolayısıyla daha az soğutma havasının tüketilmesi anlamına gelmektedir. Ani soğutma aşamasında, camın  $T_c=70^\circ\text{C}$  yerine 250 ve  $300^\circ\text{C}$ 'ye soğutulması durumunda, soğutma süresinde oldukça yüksek oranlarda azalma olurken, parçacık sayısındaki değişikliğin ise daha düşük oranlarda olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, parçacık sayısı göz önünde bulundurularak, mümkün olduğunca ısıtma sıcaklığının düşük ve soğutma sıcaklığının da yüksek seviyelerde tutulması, temperleme sürecinin enerji tüketiminde ve üretim kapasitesinde iyileşme sağlayacaktır.

**Tablo 2.** Farklı ısıtma ve soğutma sıcaklıklarına göre ortalama parçacık sayısı (Average particle number according to different heating and cooling temperature)

Isıtma Sıcaklığı $T_h$ ( $^\circ\text{C}$ )	Soğutma Sıcaklığı $T_c$ ( $^\circ\text{C}$ )	Ortalama Parçacık Sayısı	
		H/D	
		2	8
620	70	232	183
	250	223	178
	300	218	163
	400	66	57
650	70	268	213
	250	255	196
	300	243	194
	400	134	123
680	70	285	218
	250	282	199
	300	261	197
	400	151	137

Maksimum ortalama parçacık sayısı, ısıtma sıcaklığı  $T_h=680^\circ\text{C}$ , soğutma sıcaklığı  $T_c=70^\circ\text{C}$  ve  $H/D=2$  oranında 285 adet olarak elde edilirken, minimum ortalama parçacık sayısı ise ısıtma sıcaklığı  $T_h=620^\circ\text{C}$ , soğutma sıcaklığı  $T_c=400^\circ\text{C}$  ve  $H/D=8$  oranında 57 adet olarak elde edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) desteği ile kurulan laboratuarda gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- To, Q.D., He, Q.-C., Cossavella, M., Morcant, K., Panait, A. ve Yvonnet, J., "The Tempering of Glass and the Failure of Tempered Glass Plates with Pin-Loaded Joints: Modelling and Simulation", **Materials and Design**, 29, 943-951, 2008.
- Nielsen, J.H., Olesen, J.F., Poulsen, P.N. ve Stang, H., "Finite Element Implementation of a Glass Tempering Model in Three Dimensions", **Computers and Structures**, 88, 963-972, 2010.
- Eşsiz, Ö., "Teknolojinin Cam Panellerine Getirdiği Yenilikler", **1. Ulusal Çatı ve Cephe Kaplamalarında Çağdaş Malzeme ve Teknolojiler Sempozyumu**, İstanbul, 73-82, 2004.
- Sözbir, N. ve Yao, S.C., "Experimental Investigation of Water Mist Cooling for Glass Tempering" **Atomization and Prays**, 14, 191-210, 2004.
- Kantürer, T., "Otomobil Camı Üretiminde Enerji Yoğun Süreçlerin Optimizasyonu", Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- Anonim, "Seramik ve Cam Teknolojisi, Türkiye'de Cam Sektörü", **Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, MEGEP**, Ankara, 2008.
- Sev, A., Gür, V. ve Özgen, A., "Cephenin Vazgeçilmez Saydam Malzemesi Cam", **2. Ulusal Yapı Malzemeleri Kongresi**, İstanbul, 75-86, 6-8 Ekim 2004.
- Büyükyıldız, A., "PLC Kullanılarak Cam Temperleme Fırınının Otomasyonu", **Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 2(13), 247-256, 2007.
- Lee, K.H. ve Viskanta, R., "Quenching of Flat Glass by Impinging Air Jets", **Numerical Heat Transfer, Part A: Applications**, 33(1), 5-22, 1998.
- Monnoyer F. ve Locheignies D., "Heat Transfer and Flow Characteristics of the Cooling System of an Industrial Glass Tempering Unit", **Applied Thermal Engineering**, 28 (17-18), 2167-2177, 2008.
- Shutov, A.I. ve Sukhanov, V.E., (1997) "A calculation procedure for the nonuniformity parameters air-jet tempered glass", **Gals and Ceramics**, 54(7-8), 237-239.
- Gölcü, M., Yazıcı, H., Akçay, M., Köseoğlu, M.F. ve Sekmen, Y. "Oto Camların Temperlenmesinde Çarpan Hava Jetleri ile Soğutmanın Deneysel İncelenmesi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 27(4), 775-783, 2012.
- Akçay, M., Yazıcı, H., Gölcü, M., Köseoğlu, M.F., ve Sekmen Y., "Experimental Investigation of Heat Transfer in Suddenly Cooling Operation in Auto Glass Tempering Process", **6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium**, Elazığ, 194-199, 16-18 Mayıs 2011.
- Cirillo, F. ve Isopi, G.M., "Glass Tempering Heat Transfer Coefficient Evaluation and Air Jets Parameter Optimization", **Applied Thermal Engineering**, 29, 1173-1179, 2009.
- Janbunathan, K., Lai, E. ve Button B.L., "A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement", **Int. J. Heat and Fluid Flow**, 13(2), 106-115, 1992.
- San, J.Y. ve Lai, M.D., "Optimum Jet-to-Jet Spacing of Heat Transfer for Staggered Arrays of Impinging Air Jets", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 44, 3997-4007, 2001.
- Yazıcı, H., Akçay, M., Gölcü, M., Köseoğlu, M.F. ve Sekmen, Y., "Oto Cam Temperleme Deney Düzeninin Kurulumu ve Isıtma-Soğutma Sürelerinin Tayini için Örnek Bir Uygulama", **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 8(1), 57-68, 2011.
- Türk Standardı, "Emniyet camları ve cam malzemeleri-motorlu nakil araçlarında ve römorklarında kullanılan", **Türk Standartları Enstitüsü**, TS 917, 1999.