

# TOZ METAL SİLİNDİRİK BİR PARÇANIN SU VERME İŞLEMİNDE GÖZENKLİLİĞİN SOĞUMA EĞRİLERİNE ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Abuzer ÖZSUNAR\* ve Gökçe PEKER\*\*

\*Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Gazi Üniversitesi, 06570 Maltepe-Ankara

\*\*DSİ Devlet Su İşleri,06100, Bakanlıklar-Ankara.,

[ozsunar@gazi.edu.tr](mailto:ozsunar@gazi.edu.tr), [peker@dsi.gov.tr](mailto:peker@dsi.gov.tr)

(Geliş/Received: 30.03.2009 ; Kabul/Accepted: 19.11.2009)

## ÖZET

Bu çalışmada, toz metalürjisi ile üretilmiş gözenekli paslanmaz çelik silindirlere su verilmesi esnasında numunelerde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelenerek, metallerin soğuma eğrileri çizilmiştir. Bu problem FLUENT paket programında modellenmiştir. Problemde ısı taşınım katsayısı, malzemenin ısı iletim katsayısı, malzemenin özgül ısı, suyun özelliklerinin sıcaklıkla değişimi dikkate alınmıştır. Değişen ısı taşınım katsayısı ve iletim katsayısı için C derleyicisinde kullanıcı tanımlı fonksiyon (*User Define Function-UDF*) yazılıp FLUENT'e aktarılmıştır.  $\phi 2.5 \times 3$  ebatındaki parçanın iç bölge, alt-üst yüzey ve dış dikey yüzeydeki değişik noktalardaki soğuma eğrileri çizilmiştir. Ayrıca, % 10, %20 ve %40 gözeneklilik değerleri için karşılaştırma yapılarak gözenekliliğin etkisi ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar sayısal bir çalışmayla karşılaştırılmış ve genel olarak uyum içinde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Su verme, soğuma eğrileri, toz metalürjisi, Fluent (HAD), UDF.

## A NUMERICAL INVESTIGATION TO THE EFFECT OF POROSITY ON THE COOLING CURVES OF THE POWDER CYLINDER SPECIMEN FOR QUENCHING PROCESSES

### ABSTRACT

In this study temperature distributions occurring in samples were analyzed while quenching of the porous stainless steel cylinders produced by Powder Metallurgy. Then cooling curves of the metals were drawn. This problem was modeled in FLUENT software. In the problem, heat transfer coefficient, heat conduction coefficient and the properties of the water are changed with the changing temperature. User defined function (UDF) was written in C compiler for the varying heat transfer coefficient and the heat conduction coefficient then the UDF transferred to the FLUENT software. For size  $\phi 2.5 \times 3$ , different points in inner sides, top-bottom sides and outer sides were analyzed. For 10 %, 20 % and % 40 porosity, cooling curves were compared. Results were compared with other numerical studies and generally it is seen that they are compatible with the other studies.

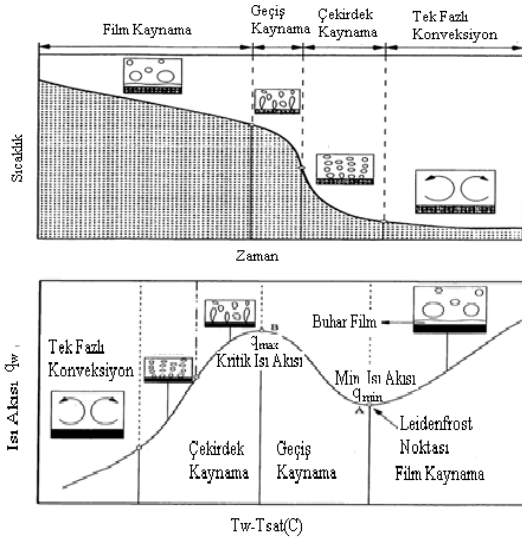
**Keywords:** Quenching, cooling curves, powder metallurgy, Fluent (CFD), UDF.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde toz metalürjisi ile üretilen parçaların yaygın kullanım alanları vardır. Bu yöntem özellikle otomotiv sektörü olmak üzere pek çok alanda küçük ve karmaşık parçaların imalatına oldukça elverişlidir. Toz metalürjisi ile üretilmiş gözenekli yapıdaki metal parçalara geleneksel ısı işlemler uygulanabilir. Isıl

işlemlerin amacı metallerin mekanik özelliklerini istenilen şekilde değiştirmektir. Bu ısıl işlemlerin başında metallerin aşınma dayanımını da artırmak için yapılan su verme işlemi gelir. Bu işlemde metallere ergime sıcaklıklarının altındaki yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp su banyosuna içerisinde hızlı bir şekilde soğutulur. Soğutma sonucu metallerde sert bir içyapı elde edilir [1,2]. En uygun su verme ortamı yüksek sıcak-

lık aralıklarında, iyi soğutma özelliği olan ve parçaya istenilen sertleşmenin olduğu dönüşüm sıcaklıklarında çatlamalara meydan vermeyecek kadar bir soğutma hızı sağlanmış olanıdır. Su verme işlemlerinde genellikle soğutucu akışkan olarak su kullanılsa da diğer akışkanlar (yağ, hava) da kullanılmaktadır. Genel olarak sıcak bir metalin su verme işleminde farklı soğutma mekanizmaları oluşmaktadır. Şekil 1'de soğutucu akışkan olarak su kullanılan ve daldırma



**Şekil 1.** Metal parçaya su verme işleminde tipik soğuma eğrisi (a) sıcaklık değişimi (b) ısı akısı [6] ((a) schematic of cooling curve for a metal and (b) Typical four boiling regimes [6])

yoluyla su verme işlemine ait tipik bir kaynama eğrisi görülmektedir. Burada, film kaynama, geçiş kaynaması çekirdek kaynama ve tek fazlı konveksiyon olmak üzere dört farklı soğuma rejimi oluşmaktadır. Şekilde soğuma sıcaklığı ve ısı transferi arasındaki bağıntı açıkça görülmektedir. Film kaynama ya da buhar film aşaması, soğutucu akışkanın parça yüzeyinde hızla buharlaştığı kısımdır. Bu aşamada iletim ve ışımla ısı transferi etkindir. Buharlaşan kabarcıklar ısı transferinin artmasını engeller ve yalıtım rolü üstlenir ve bu nedenle bu kademe uzun sürer [3]. Eğer, soğutucu akışkan bir karıştırıcı tarafından hareketli hale getirilirse bu süre kısalmıştır [4]. “A noktası” film kaynamanın sonudur ve geçiş kaynamanın başlangıcıdır ve bu nokta Leidenfrost sıcaklığı olarak adlandırılır. Bu bölgede hem film kaynama hem de kabarcıklı kaynama oluşur ve kritik ısı akısının oluştuğu noktada ise kabarcıklı kaynama başlar. Bu aşamada film kaynama sırasında oluşan buhar kabarcıkları çökeler ve ısı transferinde hızlı bir artış olur ve metal parçanın sıcaklığı hızla azalır [5].

Metal parçanın sıcaklığı, soğutucu akışkanın kaynama sıcaklığına geldiğinde son kademe olan tek fazlı taşınım ile ısı transferi oluşmaya başlar. Burada kaynama sona erer ve sadece iletim ve taşınım ile ısı transferi etkin olur.

Literatürde su verme esnasında ısı transfer mekanizmalarını inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Karaaslan [7], yaptığı analitik çalışmada toz metalurjisi ile üretilen alüminyum, demir ve karbon çelik silindirlerin su ile soğutulmasını incelemiştir. Bu çalışmada ısı iletim denklemini analitik yöntem ile çözüp metallerin soğuma eğrilerini çizmiştir. Gözenekliliğin soğuma eğrilerini nasıl etkilediğini araştırmıştır. Yılmaz [8], toz metalurjisi ile üretilen alüminyum, bakır, demir ve düşük karbonlu çelik malzemeler üzerinde çalışmış, ısı iletim denklemini sayısal olarak çözümlenmiştir. Sayısal olarak kontrol hacmi enerji korunumu kanununu kullanarak cebrik denklemleri elde etmiştir. Denklemleri çözmek için FORTRAN programını kullanmıştır. Ardından soğuma eğrilerini elde edip gözenekliliğin bu eğrilere etkisini araştırmıştır. Bir başka çalışma ise deneysel çalışmadır. Yılmaz [9], hava atomizasyon yöntemi ile üretilen alüminyum, bakır, bronz, paslanmaz çelik ve demir tozları kalıpta sıkıştırıp ardından sinterleyerek test numunelerini oluşturup laboratuvar koşullarında su verme işlemini gerçekleştirmiştir. Ardından ısı çiftleri kullanıp sıcaklıkları ölçerek soğuma eğrilerini çizmiş ve gözenekliliğin soğumaya olan etkisini araştırmıştır.

Su verme işleminde ısı transferi analizi ve soğutma eğrilerinin elde edilmesi için metal parçanın ısı iletkenliğinin bilinmesi gerekmektedir. Gözeneklilik malzemenin ısı iletkenliğinin yanında birçok özelliğini etkilemektedir. Literatürde, gözenekli malzemelerin ısı iletkenliğinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur. Aivazov ve Domashnev [10], sıcak iletkenlik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Oda sıcaklığında, çeşitli gözeneklilikteki, sıcak şekillendirilmiş titanyum nitrür parçalarının elektriksel direnç ve ısı iletkenlikleri üzerine ölçümler yapmışlardır. Koh ve Fortini [11], matris yapısına bakılmaksızın, ısı iletimi katsayısının doğrudan gözeneklilikle ilişkilendirilebileceğini görmüşler ve düzeltilmiş, Wiedemann-Franz-Lorenz bağıntısının gözenekli malzemeler içinde geçerli olduğunu bulmuşlardır. Howard ve Koczak [12], toz metal demir, paslanmaz çelik ve bronzun ısı iletkenliği üzerinde analizler yapmışlardır. Odelevski [13], kübik bir yapı için gözenekliliğin fonksiyonu olarak ısı iletkenliği tanımlamış, Veinberg [14] ise küresel gözenekler içeren gözenekli malzemenin ısı iletimi katsayısı için analitik bağıntı elde etmişlerdir. Koh ve Fortini, Aivazov ve Domashnev geliştirdiği toz geometrisinden bağımsız ifadeyi istatistiksel analiz yardımıyla

$$\frac{k}{k_s} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + 11\varepsilon^2} \quad (1)$$

şeklinde boyutsuz formda tanımlamışlardır. Burada,  $k$  gözenekli malzemenin ısı iletkenliği  $\varepsilon$  gözeneklilik  $k_s$  ise saf malzemenin ısı iletkenliğidir. Referans sıcaklıktaki ısı iletkenlik kullanılarak herhangi bir sıcak-

İktaki saf metalin ısı iletkenliği aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\frac{k_s}{k_{ref}} = 1 + \alpha(T - 373) \quad (2)$$

Burada, “ $\alpha$ ” 373 K ve 1273 K aralığında gözeneklilikten bağımsız ve paslanmaz çelik için değeri 0.00089 K<sup>-1</sup> dir. Denklem (1) ve (2) kullanılarak, gözenekli malzemenin ısı iletkenliği, saf malzemenin ısı iletkenliği referans verileri kullanılarak hesaplanır.

Chi [15], kaynama ısı transferi katsayısını ( $h$ ), soğutucu akışkan ve metalin yüzey sıcaklığı farkına ( $\Delta T = |T_s - T_{sat}|$ ), kaldırma kuvveti ( $g(\rho_l - \rho_v)$ ), soğutucu akışkanın gizli ısısına ( $h_{fg}$ ), yüzey gerilimine ( $\sigma$ ), karakteristik uzunluğa ( $L$ ) ve soğutucu akışkanın termofiziksel özelliklerine bağlı olarak ( $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\mu$ ,  $k$ ),

$$h = h[\Delta T, g(\rho_l - \rho_v), h_{fg}, \rho, L, c_p, \mu, k] \quad (3)$$

Şeklinde tanımlamış ve buradaki değişkenlerden dört boyutsuz grup ortaya çıkararak

$$\frac{hL}{k} = f \left[ \frac{\rho g (\rho_l - \rho_v) L^3}{\mu^2}, \frac{c_p \Delta T}{h_{fg}}, \frac{c_p \mu}{k}, \frac{g(\rho_l - \rho_v) L^2}{\sigma} \right] \quad (4)$$

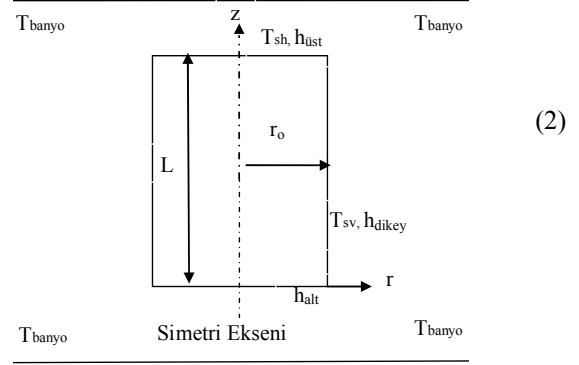
veya

$$Nu_L = f \left[ \frac{\rho g (\rho_l - \rho_v) L^3}{\mu^2}, Ja, Pr, Bo \right] \quad (5)$$

olarak düzenlemiştir. Literatürde kabarcıklı kaynama, tam gelişmiş kabarcıklı kaynama, geçiş kaynaması ve film kaynaması ile ilgili çalışma ve geliştirilen bağıntılar detaylı bir şekilde verilmektedir [15-21]. Bu çalışmada toz metalurjisi ürünlerinden silindirik paslanmaz çelik kullanılmıştır. FLUENT paket programında modellenmiştir. Isı taşınım katsayısı ve ısı iletim katsayısı için C programlama dilinde bir UDF oluşturularak FLUENT paket programına aktarılmıştır. FLUENT sayısal çözümünden sonra ise elde edilen verilerle soğuma diyagramları çizilmiştir, soğuma eğrilerine gözenekliliğin etkileri araştırılmıştır.

## 2. SAYISAL YÖNTEM (NUMERICAL METHOD)

Bu çalışmada küresel gözenekler içerdiği varsayılan silindirik paslanmaz çelik bir metalin 850 K sıcaklıktan su banyosuna bırakıldığı kabul edilerek, ısı transfer mekanizması incelenerek, soğuma eğrileri çizilmiştir (Şekil 2) [22]. Problem, Fluent paket program kullanılarak çözüm elde edilmiş; ısı iletim, taşınım ve ışınım katsayıları, metalin özgül ısısı, ayrıca sıcaklıkla değişen suyun termo fiziksel özellikleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için, “C++” paket program kullanılarak gerekli formüller tanımlanması amacıyla bir alt program yazılmış ve Fluent



**Şekil 2.** Problemin sınır şartları ve hesaplama alanının şematik olarak gösterimi (Schematic illustration of the computational domain and boundary conditions)

paket programının *Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (UDF)* özelliğinden faydalanılarak yazılan program Fluent’e aktarılmıştır. Problem çözülürken önce GAMBIT programında geometrik şekil çizilmiş ve sistem fiziksel olarak tanımlanmıştır. Daha sonra yeterli sayıda hücreye bölünerek (mesh atılmış) ve oluşturulan model Fluent’e aktarılmıştır. Fluent’te ise gerekli sınır şartları verilerek problem çözdürülmüştür [22, 23].

### **Kabuller:**

1. Banyo içindeki su durağandır,
2. Banyo sıcaklığı sabittir,
3. Çevre basıncı 1 atm,
4. Banyo yeterince büyüktür,
5. Radyal yönde sıcaklık değişimi yoktur.
6. Paslanmaz çelik tozundan üretilen numune, gözenekler küresel ve homojen olarak dağılmıştır.
7. Gözenekli malzemenin ısı iletkenliği toz geometrisinden bağımsızdır [10].

Şekil 2’de görüldüğü gibi, silindirik kordinatlarda sistem iki boyutlu olarak hücelere bölünerek (diskritize edilerek) su verme işlemi sonlu hacimler yöntemi kullanılarak problem çözülmüştür. Üç boyutlu ve zamana bağlı (kararsız durum) genel iletim denklemi şu şekilde yazılır [24]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Taşınım ve ışınım sınır şartı olarak alınmıştır. Radyal yönde sıcaklık değişimi ihmal edilerek Eş (6) yeniden yazılırsa

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Eş. (7) sonlu hacimler yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülür. Denklem için başlangıç ve sınır şartları aşağıda verilmiştir.

Başlangıç şartı:

$$T(r, z, 0) = T_i \quad (8)$$

Sınır şartları:

$$\frac{\partial T(0, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z}(r, L, t) = h_{üst} [T(r, L, t) - T_{banyo}] \quad (10)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z}(r, -L, t) = h_{alt} [T(r, 0, t) - T_{banyo}] \quad (11)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r}(r_o, z, t) = h_{dikey} [T(r_o, z, t) - T_{banyo}] \quad (12)$$

Isı taşınım katsayısı zamanla değişmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi ısı transfer mekanizması  $\Delta T_e$  sıcaklık farkıyla değişmektedir.  $\Delta T_e < 5$  K olduğunda doğal taşınım ile kaynama,  $5 < \Delta T_e < 30$  K aralığında kabarcık kaynaması,  $30 < \Delta T_e < 200$  K aralığında geçiş kaynaması ve  $\Delta T_e > 200$  K aralığında film kaynama ısı transfer mekanizması oluşmaktadır. Bu bilgiler ışığında film sıcaklığı ve akışkan özellikleri hesaplandıktan sonra, doğal taşınım katsayısı, silindir alt yüzey, üst yüzey ve dik yüzey için Rayleigh sayısı hesaplanmıştır.

### Silindir Dik Yüzey:

1. Öncelikle aşağıda verilen, film sıcaklığı ( $T_f$ ) ve ısı genleşme katsayısı hesaplanmıştır( $\beta$ )

$$T_f = (T_s + T_{banyo})/2 \quad (13)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{(T_s - T_{banyo})/2} \quad (14)$$

daha sonra, film sıcaklığında doymuş su özellikleri hesaplanmıştır ( $Pr_f, \nu_f, k_f$ ). Atmosfer basıncındaki su özellikleri sıcaklığa bağlı olarak polinom haline, Mathematica paket programı kullanılarak getirilmiştir.

2. Rayleigh sayısı hesaplanmıştır,

$$Ra_v = [g\beta(T_s + T_{banyo})\delta_v^3 Pr] / \nu^2 \quad (15)$$

burada,  $\delta_v$  karakteristik uzunluktur.

$$\prod_n = \frac{Ra_v}{(1 + \frac{0.492}{Pr_f})} \quad (16)$$

3. Boyutsuz katsayı  $\Pi_n$  hesaplanmış ve boyutsuz sayı dikkate alınarak  $C$  ve  $n$  katsayıları seçilmiştir.

$$C=0.67, n= 1/4, 10^4 \leq \Pi_n \leq 10^9 \quad (17)$$

$$C=0.15, n=1/3, 10^9 \leq \Pi_n \leq 10^{12} \quad (18)$$

4. Nusselt sayısı ve film katsayısı hesaplanmıştır.

$$Nu = C \prod_n \quad (19)$$

$$\frac{h\delta_v}{k_f} = C \prod_n \quad (20)$$

$$h_{dikey} = \frac{C \prod_n k_f}{\delta_v} \quad (21)$$

### Yatay Yüzeyler:

Dik yüzeyde olduğu gibi önce, film sıcaklığı( $T_f$ ), ısı genleşme katsayısı( $\beta$ ), doymuş su özellikleri ( $Pr_f, \nu_f, k_f$ ), ve Rayleigh sayısı( $Ra_h$ ) hesaplanmış. Sonra, Rayleigh sayısı dikkate alınarak( $Ra_h$ ), Nusselt sayısı ve  $h_{üst}$ ,  $h_{alt}$  hesaplanmıştır.

Yatay üst yüzey için:

$$Nu = 0.54 Ra_h^{1/4}, 10^4 < Ra < 10^7 \quad (22)$$

$$Nu = 0.54 Ra_h^{1/3}, 10^7 < Ra < 10^{11} \quad (23)$$

$$h_{üst} = \frac{0.54 Ra_h^{1/4} k_f}{\delta_h}, 10^4 < Ra < 10^7 \quad (24)$$

$$h_{üst} = \frac{0.54 Ra_h^{1/3} k_f}{\delta_h}, 10^7 < Ra < 10^{11} \quad (25)$$

Yatay alt yüzey için:

$$Nu = 0.27 Ra_h^{1/4}, 10^5 < Ra < 10^{11} \quad (26)$$

$$h_{alt} = \frac{0.27 Ra_h^{1/4} k_f}{\delta_h}, 10^5 < Ra < 10^{11} \quad (27)$$

### Malzeme Özellikleri:

Boyut:  $r_o=1.25$ ,  $L=3$  cm

Yoğunluk:  $\rho=7900$  kg/m<sup>3</sup>

Yayıcılık:  $\epsilon=0.19$

Yüzey-akışkan katsayısı:  $C_{s,f}=0.0130$ ,  $n=1$  [16,17]

Isı iletim katsayısı ve özgül ısı katsayısı:

$$k = 8.62257 + 0.0239893T - 0.0000117245T^2 + 4.5082 * 10^{-9} T^3 \quad (28)$$

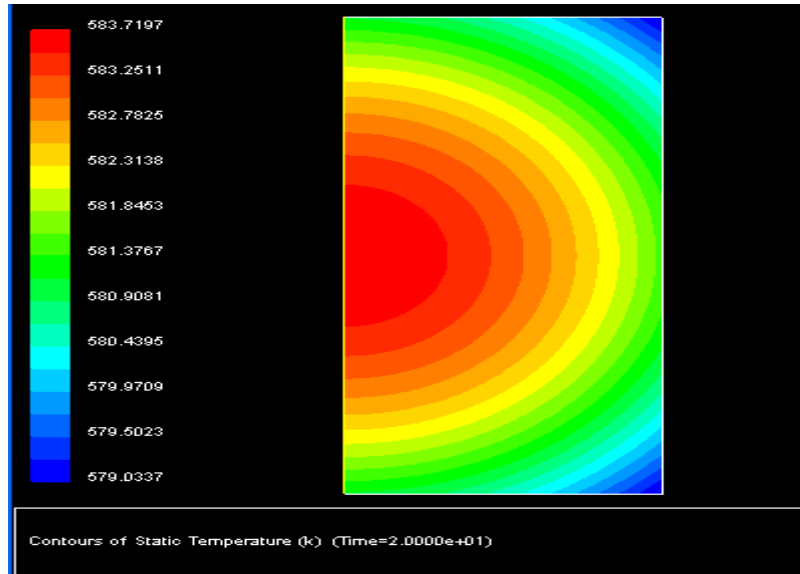
$$c = 267.619 + 1.0093T - 0.0000119211T^2 + 5.26298 * 10^{-7} T^3 \quad (29)$$

**Grid Bağımsızlığı:**

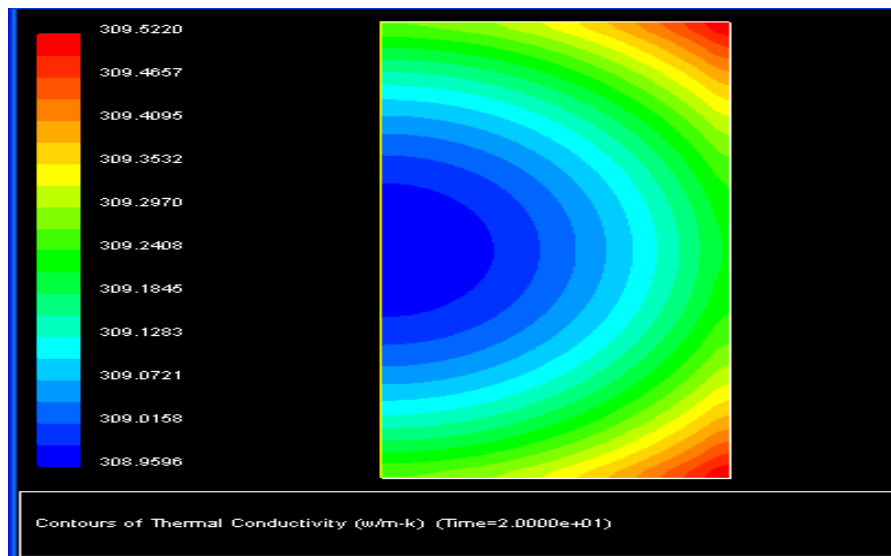
Problemimizde özellikle çekirdek kaynamada yakınsamanın rahatça sağlanabilmesi için yoğun bir mesh yapısı kullanılmıştır. 2,5x3 cm'lik numunelerde 25x60'lık, 2,5x5 cm'lik numunelerde 25x100'lük mesh yapısı kullanılmıştır. Bu mesh yapılarıyla 0,5x0,5 mm'lik kontrol hacimleri oluşturulmuştur. Mesh sayısı artırılarak yapılan çözüm sonucu hesaplanmış ve yeterli hassasiyetin sağlandığı gözlenmiştir. Bağımlı değişkenler için yakınsama kriterleri  $10^{-5}$  den daha küçük değerler elde edilmiştir.

**3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)**

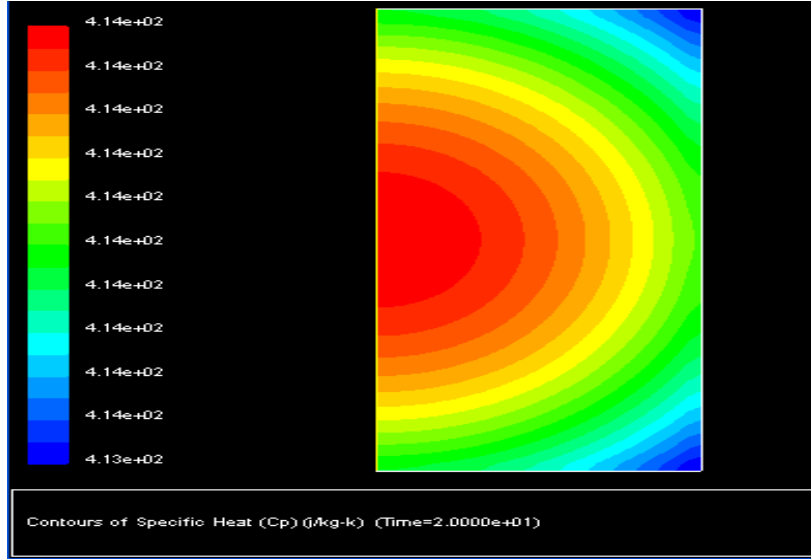
Gözeneklilik oranı % 20,  $\phi 2,5 \times 3$  cm boyutundaki toz metal paslanmaz çelik numune 850 K sıcaklığa çıkarıldıktan sonra 298 K sıcaklığındaki su banyosuna bırakılarak su verme işlemi sırasında ısı transferi ve soğuma eğrileri incelenmiştir. Ayrıca, soğuma işlemi sırasında farklı zamanlardaki iletim katsayısı ve özgül ısı değerleri için kontur grafikleri çizilmiştir. İstenilen herhangi bir zaman adımı için silindirik numune üzerindeki sıcaklık, ısı iletim katsayısı ve özgül ısı değerlerini gösteren kontur grafikleri verilmiştir (Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5). Beklenildiği gibi ısı iletim katsayısı ve özgül her noktadaki sıcaklık farklı olduğu için



**Şekil 3.**  $\phi 2,5 \times 3$  cm boyutunda, 850K ilk sıcaklığında, %20 gözenekliliğe sahip paslanmaz çelik numunenin 298K sıcaklığındaki banyoya atıldıktan 20 s sonraki sıcaklık dağılımını gösteren kontur grafiği (For size  $\phi 2.5 \times 3$  cm, stainless steel specimen specific heat values contour graph ( $t=20$  s, at first temperature 850K, bath temperature 298 K, porosity 20 %))



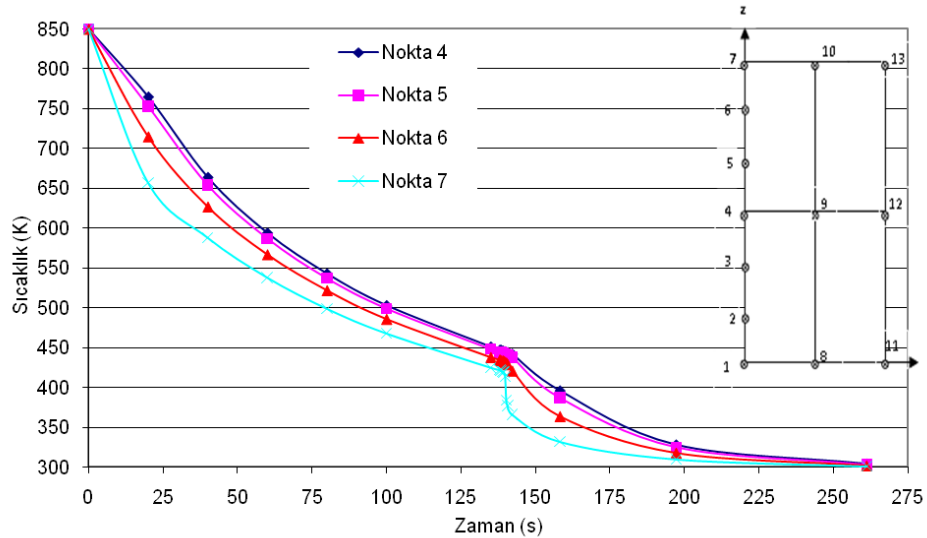
**Şekil 4.**  $\phi 2.5 \times 3$  cm boyutunda, 850 K ilk sıcaklığında, %20 gözenekliliğe sahip paslanmaz çelik numunenin 298 K sıcaklığındaki banyoya atıldıktan 20 sn sonraki ısı iletim katsayısı dağılımını gösteren kontur grafiği (For size  $\phi 2.5 \times 3$  cm, stainless steel specimen thermal conductivity contour graph ( $t=20$  s, at first temperature 850K, bath temperature 298 K, porosity 20%))



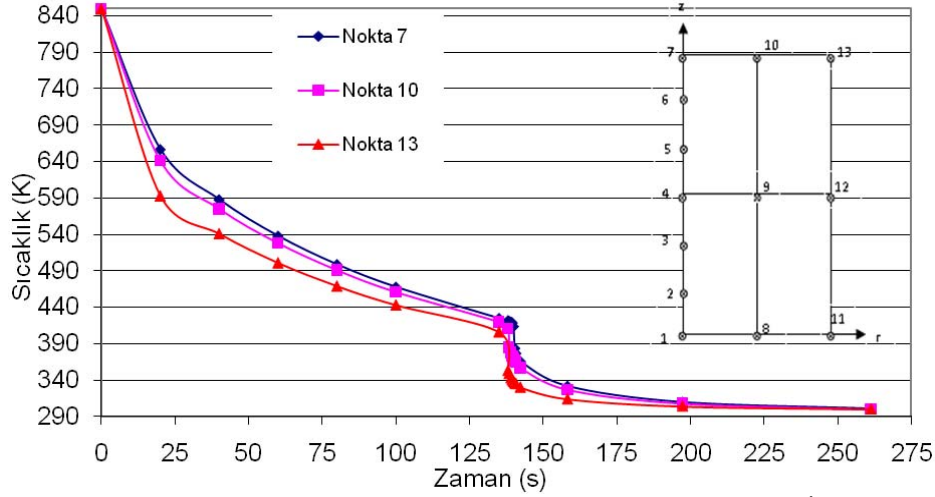
**Şekil 5.**  $\phi 2.5 \times 3$  cm boyutunda, 850 K ilk sıcaklığında, %20 gözenekliliğe sahip paslanmaz çelik numunenin 298 K sıcaklığındaki banyoya atıldıktan 20 sn sonraki özgül ısı dağılımını gösteren kontur grafiği (For size  $\phi 2.5 \times 3$  cm, stainless steel specimen specific heat values contour graph ( $t=20$  s, at first temperature 850K, bath temperature 298 K, porosity 20%))

silindirin bütününde üniform (düzgün) bir dağılıma sahip değildir ve sıcaklık değerleri ise beklenildiği gibi dışa doğru azalmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, silindirik parçanın merkezinden dışarı doğru sıcaklık dağılımının azaldığı, daha 20. saniyede merkezdeki sıcaklık 583 K iken dış kısımdaki sıcaklığın 579 K değerini almaktadır. Benzer şekilde, merkezden dışarı doğru, ısı iletim katsayısı ve özgül ısının değiştiği görülmektedir (Şekil 4 ve Şekil 5). Paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısı oldukça küçük olduğu için noktalar arasındaki sıcaklık farkı belirgin. Şekil 6.'de nokta 4 ve 6, Şekil 7.'de nokta 7 ve 13, Şekil 8.'da nokta 4 ve 12'nin soğuma eğrileri arasındaki farklılık açık bir şekilde görülmektedir. İç bölgedeki noktalar daha sıcak kaldığı ve numunelerin geç soğumalarına neden olduğu görülmektedir. Her üç bölgedeki dış noktalar (nokta 7, 12, 13) için soğuma eğrileri incelenirse, baş-

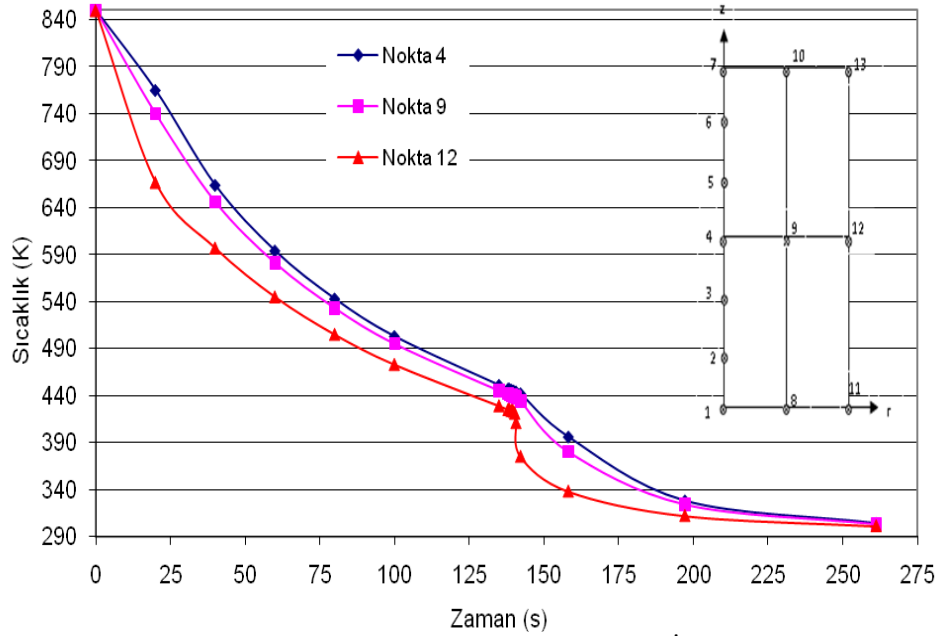
langıçta film kaynamayla ısı transferi gerçekleştiğinden sıcaklık düşüşünün oldukça fazla olduğu görülür. Bunun nedeni film kaynama ve radyasyon etkisiyle hesaplanan ısı taşınım katsayısının büyük olmasıdır. Sıcaklık 573 K'nin altına düşünce ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında radyasyonun etkisi dikkate alınmaz ve yüzey sıcaklığının azalmasıyla ısı taşınım katsayısının büyüklüğü azalır, bu bölge geçiş kaynama bölgesidir. 573 K'nin altında grafiğin eğiminin giderek azaldığı soğuma eğrilerinden görülmektedir. Bir süre sonra ani sıcaklık düşüşünün ortaya çıktığı görülmektedir. Bu evrede ısı taşınım katsayısı aşırı derecede büyüktür (yaklaşık olarak kaynama ısı transferi aşamasının 100 katı kadar) ve çok kısa sürede yüksek miktarda sıcaklık düşüşü meydana gelir, daha sonra doğal konveksiyon aşaması başlar.



**Şekil 6.** Paslanmaz çelik numunede iç noktalardaki(nokta 4, 5, 6 ve 7) soğuma eğrileri (İlk sıcaklık 850 K, Banyo sic. 298 K, Gözeneklilik %20) (In stainless steel specimen, for inside surface(points 4, 5, 6 and 7) cooling curves (First temperature 850 K, Bath temperature 298 K and Porosity 20 %))



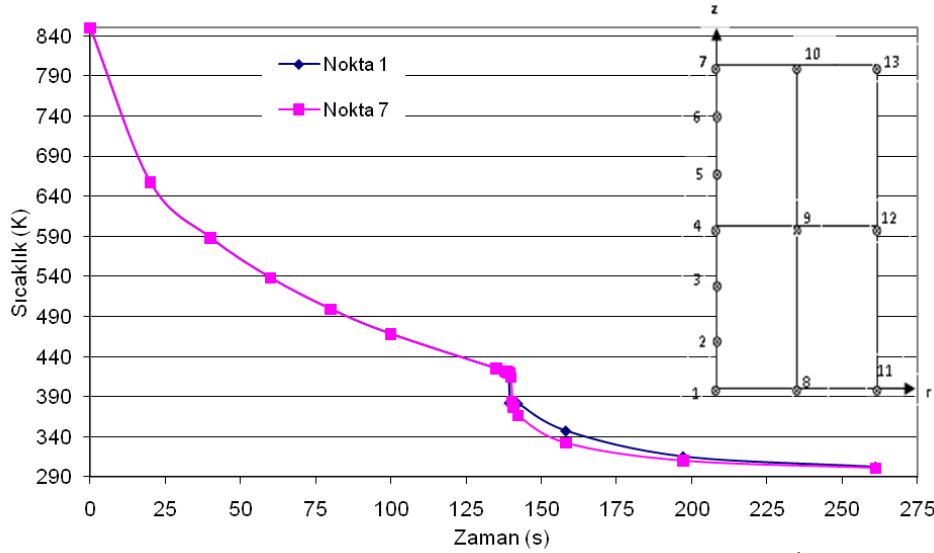
**Şekil 7.** Paslanmaz çelik numunedeki üst yüzeydeki (nokta 7, 10 ve 13) soğuma eğrileri (İlk sıcaklık 850 K, Banyo sıcaklığı 298 K, Gözeneklilik %20) (In stainless steel specimen, for top surface (points 7, 10 and 13) cooling curves (First temperature 850 K, Bath temperature 298 K and Porosity 20 %))



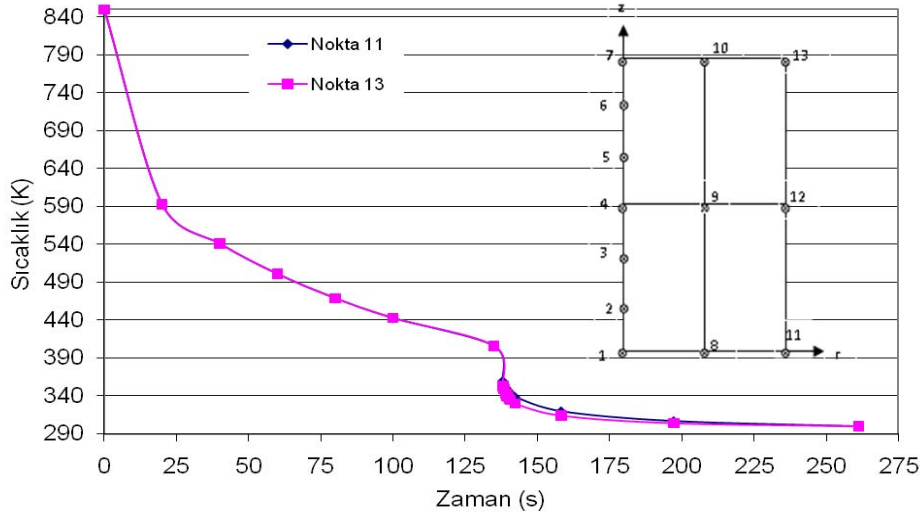
**Şekil 8.** Paslanmaz çelik numunedeki nokta 4, 9 ve 12'nin soğuma eğrileri (İlk sıcaklık 850 K, Banyo sıcaklığı 298 K, Gözeneklilik %20) (In stainless steel specimen, for points 4, 9 and 12 cooling curves (First temperature 850 K, Bath temperature 298 K and Porosity 20 %))

Doğal taşınım aşamasında ısı taşınım katsayısı değeri oldukça düşüktür ve bu nedenle soğuma süresi uzamaktadır. Soğuma eğrileri dikkatlice incelendiğinde doğal taşınım aşamasının sonuna doğru ısı taşınım katsayısı giderek azalmış ve 310 K'den 300 K'e sıcaklığın düşmesi için süre uzamıştır (Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 9). Şekil 6. incelendiğinde nokta 4 ve 5'in soğuma eğrilerinin birbirine oldukça yakın olduğu, nokta 6 ve nokta 7'nin soğuma eğrilerinden ayrıldığı görülür. Ayrıca nokta 4 ve nokta 5'in soğuma eğrileri nokta 6 ve nokta 7'nin soğuma eğrileriyle doğal taşınım aşamasının sonlarına doğru çakışık hale gelmiştir. Nokta 7'de çekirdek kaynama ısı transferinden dolayı meydana gelen ani sıcaklık düşümü de en geç olarak nokta 5 ve nokta 4'te kendini hissettirmiştir.

Şekil 7'de nokta 7, 10 ve 13'ün soğuma grafikleri incelendiği zaman bu noktaların hepsinin dış nokta olmasına rağmen nokta 7'nin daha sıcak olduğu görülmektedir. Bunun nedeni nokta 7'nin silindirin merkezine yakın olmasıdır. Şekil 8.'de nokta 7 ve 10'un soğuma eğrilerinin birbirine yakın olduğu gözlenirken, nokta 13'ün soğuma eğrisi nokta 7 ve nokta 10'unkinden biraz daha ayırık kalmıştır. Bunun nedeni nokta 13'ün her iki taraftan ısı taşınımına açık olmasıdır. İç kesimlerin sıcaklıklarının yüksek dış kesimlerin ise düşük olması sonucu olarak Şekil 8.'de nokta 4 ve 9'un soğuma eğrisi birbirine yakındır, nokta 12'nin grafiği ise daha ayırıktır. İç kesimdeki sıcaklığın fazla olmasının nedeni de paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısının oldukça küçük olmasıdır. Toz metal % 20 gözeneklilikteki paslanmaz çel-



**Şekil 9.** Paslanmaz çelik numunedeki üst ve alt yüzeyin (nokta 1 ve 7) soğuma eğrileri (İlk sıcaklık 850 K, Banyo sıcak. 298 K, Gözeneklilik %20)(In stainless steel specimen, for top and bottom surfaces (points 1 and 7) cooling curves (First temperature 850 K, Bath temperature 298 K and Porosity 20 %))

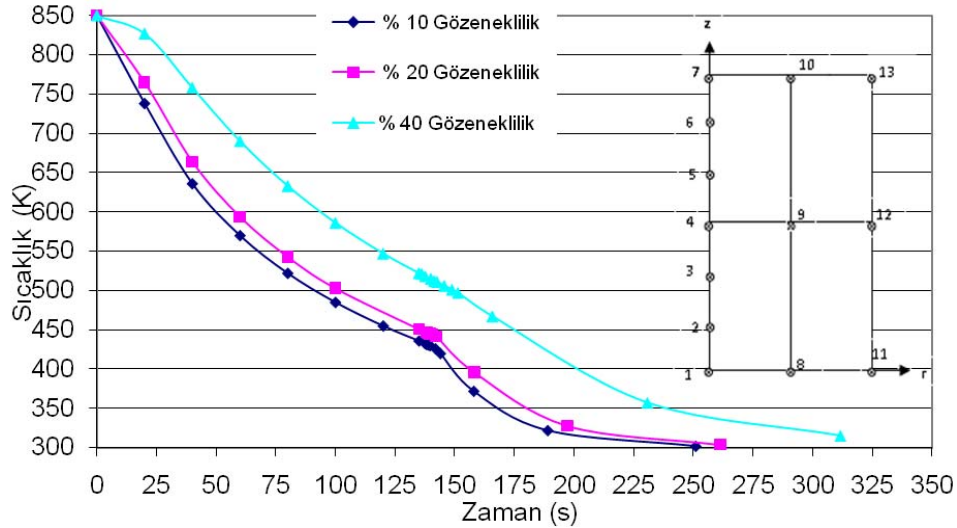


**Şekil 10.** Paslanmaz çelik numunedeki dış yüzeyin (nokta 11 ve 13) soğuma eğrileri (İlk sıcaklık 850 K, Banyo sıcak. 298 K, Gözeneklilik %20)(In stainless steel specimen, for outside surface (points, 11 and 13) cooling curves (First temperature 850 K, Bath temperature 298 K and Porosity 20 %))

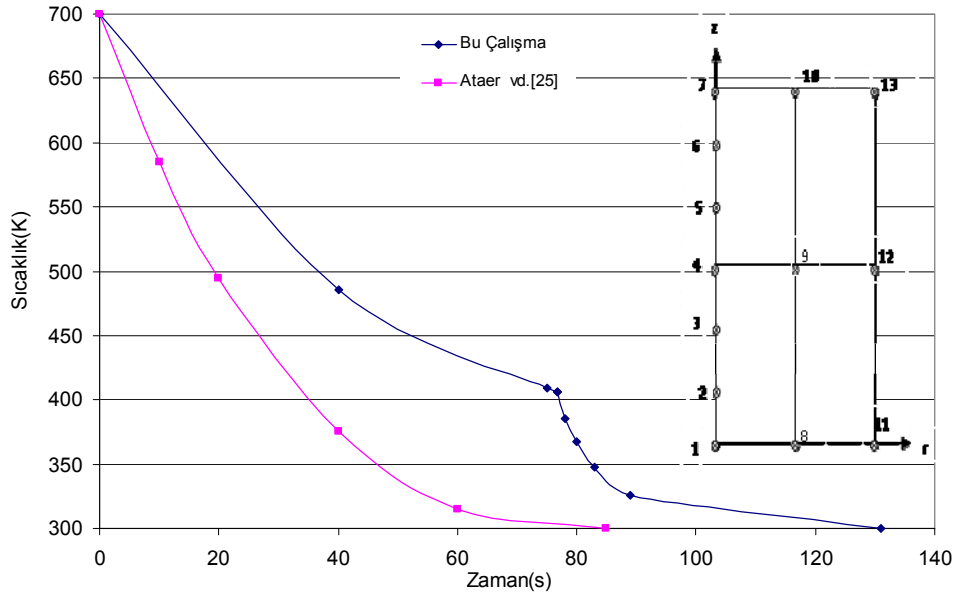
likte nokta 13 için ısı transferi süreleri incelenmiş ve 26 s içinde film kaynama ve radyasyon ısı transferini tamamlamış 137 s'de çekirdek kaynama ısı transferine geçmiş yaklaşık 0,1 sn'de çekirdek kaynama ısı transferini tamamlamış ve 252,23 s sonra banyo sıcaklığına ulaştığı görülmüştür. Şekil 9. ve Şekil 10.'deki soğuma eğrileri incelendiğinde nokta 1-7 ve nokta 11-13'ün çekirdek kaynama sonuna kadar soğuma eğrilerinin çakışık gittiği görülmektedir. Çekirdek kaynamadan sonra soğuma eğrileri ayrılık göstermiştir. Bunun nedeni, alt yüzey ve üst yüzey için ısı taşınım katsayısının (Eş. 24-25 ve Eş. 27) farklı hesaplanmış olmasıdır. Gözenekliliğin artmasıyla ısı iletim katsayısı azalmış ve iç noktalardan dış yüzeylere ısı transferi zorlaşmıştır. Bu nedenle gözenekliliği yüksek olan numunelerde sıcaklık daha yüksek kalmıştır. Gözeneklilik azalınca ısı iletim katsayısı artmış ve ısı transferi kolaylaşmıştır. Bu nedenle

gözenekliliği düşük olan numunelerde sıcaklık daha düşük kalmıştır. Gözenekliliğin artmasıyla soğuma süresinin arttığı Şekil 11.'de açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 11. incelendiğinde nokta 4 için %10 ve %40 gözeneklilik oranları için 20 sn sonra sıcaklıkların, 738 K ve 827 K olduğu görülür. Ayrıca, gözenekliliğin %40'a artması iç bölgeeki sıcaklık arttırmış ve aynı zamanda soğuma süresi de bir hayli artmıştır. % 10'dan % 20 gözenekliliğe geçerken de sıcaklıklar ve soğuma süreleri artmıştır. Ancak bu artış %40 gözeneklilik oranına çıkıldığında kadar fazla değildir. Gözeneklilik arttıkça numunelerin iç noktalarının ısı direnci artmış, ısı iletimi rahat bir şekilde gerçekleşmemiş ve dolayısıyla iç noktalar sıcak kalarak numunelerin soğuma süreleri artmıştır. Soğuma süresi %10 gözeneklilikten %20 gözenekliliğe geçilirken 10 s artarken, %10 gözeneklilikten % 40 gözenekliliğe geçişte 52 s artmıştır.





**Şekil 11.** Paslanmaz çelik numune için farklı gözeneklilik oranlarında soğuma eğrileri (İlk sıcaklık 850 K, Banyo sıc. 298 K)(In stainless steel specimen, for inside surface (point 4) and different porosities cooling curves (First temperature 850 K, Bath temperature 298 K))



**Şekil 12.** Paslanmaz çelik numune için Ataer'ın [25] çalışması ile soğutma eğrisinin karşılaştırılması (İlk sıcaklık 700 K, Banyo sıc. 298 K, Gözeneklilik %20)(In stainless steel specimen, for inside surface (points 4) compare Ataer's study cooling curves (First temperature 700 K, Bath temperature 298 K and Porosity 20 %))

Numunenin boyutlarının küçük, ısı taşınım katsayılarının büyük olmasına rağmen soğuma sürelerinin gözeneklilik arttıkça fark etmesi paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısının çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 12'de Ataer vd. [25]'nin çalışmasıyla bir karşılaştırma verilmektedir. Sunulan çalışmada, dört farklı ısı transferi aşamasına karşılık gelen soğuma eğrisi görülmektedir. Başlangıçta film kaynama ve ışınım ile ısı transferi görülmekte daha sonra 77. saniyeye kadar film kaynama devam etmektedir. Bu bölümde, soğuma grafiğinin eğimi sürekli azalmaktadır. 77. ve 78. saniyede arasında ani bir sıcaklık düşüşü olmaktadır. Bu bölge kabarcıklı kaynamanın başladığını göstermektedir ve ısı taşınım katsayısı

oldukça yüksektir. Bu aşamadan sonra doğal taşınım ile olan ısı transferi başlamış ve 132. saniyede soğuma işlemi tamamlanmıştır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, toz metalurjisi ile üretilmiş gözeneklilik oranı %20 paslanmaz çelik silindire su verilmesi esnasında numune meydana gelen ısı transfer mekanizmaları incelenmiştir. Daha sonra metallerin soğuma eğrileri çizilmiştir. Malzemenin gözenekliliğinin soğuma eğrilerine etkileri incelenmiştir. Problem FLUENT paket programında modellenmiştir. Problemden ısı taşınım katsayısı, malzemenin ısı iletim katsayısı, malzemenin özgül ısı, suyun özellikleri sıcaklıkla değişmektedir. Değişen ısı taşınım katsayısı

ve iletim katsayısı için “C” derleyicisinde kullanıcı tanımlı fonksiyon (User Define Function) (UDF) yazılıp FLUENT’e aktarılmıştır. Gözenekli malzemelerin ısı iletim katsayısını hesaplamak için ampirik formüllerden yararlanılmıştır. Isı iletim katsayısının FLUENT paket programına aktarılması kullanıcı tanımlı fonksiyon yazma yoluyla yapılmıştır. Isı taşınım katsayısının hesaplanmasında da kullanıcı tanımlı fonksiyon yazılmış, FLUENT paket programına aktarmada Define\_Profile makrosu kullanılmıştır. Malzemenin özgül ısı sıcaklığın fonksiyonu haline getirilip FLUENT paket programına girilmiştir.

Yapılan çalışmada, malzeme türü, soğutucu akışkan, gözeneklilik oranı malzeme ilk sıcaklığı ve soğutucu akışkan sıcaklığı değiştirilerek parametrik çalışmaya imkan verebilecek şekilde UDF hazırlanmış ve bu parametrik çalışmanın sonuçları Peker’in [22] çalışmasında verilmiştir. Doğal taşınım, kabarcıklı kaynama, geçiş kaynaması ve film kaynamayla olan ısı transferi aşamaları soğuma eğrilerinde analiz edilmiştir.

Paslanmaz çelik için elde edilen sonuçlarda numunelerde sayısal analiz için belirlenen noktalar arasında büyük sıcaklık farklılıkları meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Bu paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısının düşük olmasından kaynaklanmıştır. Düşük ısı iletim katsayısı ile beraber ısı iletim direnci artmış ve iç noktalar daha sıcak kalmıştır. Bunun sonucu olarak iç ve dış noktaların soğuma eğrileri arasında ciddi farklılıklar meydana gelmiştir. Gözenekliliğin artmasıyla da ısı iletim katsayısındaki düşüğe bağlı olarak numunelerin soğuma zamanları ile iç ve dış noktalar arasındaki sıcaklık farkı oldukça artmıştır. Bunun nedeni gözenekliliğin artmasıyla ısı iletim katsayısındaki düşüştür. Gözeneklilik oranında % 10’dan % 20’ye olan artış  $\phi 2.5 \times 3$  cm boyutta bile soğuma zamanını ve noktalar arası sıcaklık farkını oldukça arttırmıştır.

#### SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

<b>C</b>	: Özgül ısı, J/kg K
<b>C<sub>p</sub></b>	: Sabit basınçta özgül ısı, J/kg K
<b>C<sub>v</sub></b>	: Sabit hacimde özgül ısı, J/kg K
<b>D</b>	: Çap, m
<b>E</b>	: Enerji, J/kg, $E=h+(p/\rho)+v^2/2$
<b>Gr</b>	: Grashof sayısı
<b>h</b>	: Isı taşınım katsayısı, W/m <sup>2</sup> K
<b>h<sub>conv</sub></b>	: Konveksiyon ısı taşınım katsayısı, W/m <sup>2</sup> K
<b>h<sub>fg</sub></b>	: Gizli ısı, J/kg K
<b>h<sub>fg</sub></b>	: Düzeltilmiş gizli ısı, J/kg K
<b>h<sub>rad</sub></b>	: Radyasyon ısı taşınım katsayısı, W/m <sup>2</sup> K
<b>k</b>	: Isı iletim katsayısı, W/m K
<b>k<sub>f</sub></b>	: Doymuş sıvı halindeki ısı iletim katsayısı, W/m K
<b>k<sub>s</sub></b>	: Katı ortamın ısı iletim katsayısı, W/m K
<b>Nu</b>	: Nusselt sayısı
<b>P</b>	: Yatay yüzey çevresi, m
<b>Pe</b>	: Peclet sayısı, $puL/\Gamma$

<b>Pr</b>	: Prandtl sayısı, $\nu/\alpha$
<b>q<sub>s</sub></b>	: Isı akısı, W/m <sup>2</sup>
<b>Ra</b>	: Rayleigh sayısı, $g\beta(T_s-T_\infty)\delta^3Pr/\nu^2$
<b>T</b>	: Sıcaklık, K
<b>T<sub>banyo</sub></b>	: Banyo sıcaklığı, K
<b>T<sub>i</sub></b>	: İlk sıcaklık, K
<b>T<sub>s</sub></b>	: Yüzey sıcaklığı, K
<b>T<sub>sat</sub></b>	: Doyma sıcaklığı, K
<b><math>\alpha</math></b>	: Isıl yayıcılık katsayısı, m <sup>2</sup> /s
<b><math>\beta</math></b>	: Hacimsel ısıl genleşme katsayısı, 1/K
<b><math>\epsilon</math></b>	: Gözeneklilik, (%)
<b><math>\epsilon_{ışınım}</math></b>	: Yayıcılık
<b><math>\sigma</math></b>	: Stefan-Boltzmann sabiti, W/ m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
<b><math>\rho</math></b>	: Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>
<b><math>\mu</math></b>	: Dinamik viskozite, kg/m s
<b><math>\delta</math></b>	: Karakteristik uzunluk, m
<b><math>\delta_h</math></b>	: Yatay yüzeyler için karakteristik uzunluk, m
<b>A/p</b>	
<b><math>\delta_v</math></b>	: Dikey yüzey için karakteristik uzunluk, m, 2L
<b><math>\nu</math></b>	: Kinematik viskozite, m <sup>2</sup> /s
<b><math>\Delta T_e</math></b>	: Kızma farkı, (T <sub>s</sub> -T <sub>sat</sub> ), K
<b><math>\Pi_N</math></b>	: $\Pi_N=Ra/(1+C_0/Pr)$

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. German, R. M., “**Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri** 1. Basım”, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., Türk Toz Metalurjisi Derneği, Ankara, 8-10, 61-89, 195-198, 235-238, 482-499 (2007).
2. Weissbach, W., “**Malzeme Bilgisi ve Muayenesi** 6. bas.”, Anık, S., Anık, E. S., Vural, M., Birsen Yayınevi, İstanbul, 133-117, 200-201 (1993).
3. Labeish, VG., 1989, “**Heat Removal during liquid cooling of metal**”, steel in the USSR, vol:19, pp. 134-136.
4. Boyer, HE. and Cary, PR., 1988, **Quenching and Control distortion**, ASM International Materials Park, OH.
5. Mackenzie, DS., Totten, GE., and Webster, GM., 1996, “**Quenching fundamentals:heat transfer**”, Proceedings of the Second International Conference on Quenching and the Control of Distortion, edited by Totten GE., Maurice AH., Sjösterm SJ., and Funatani K., November 4-7 Cleveland OH, pp. 329-240.
6. Bejan, A., 1993, **Heat Transfer**, John Wiley&Sons, NewYork.
7. Karaaslan, İ., “**Değişken Sınır Şartlarında Gözenekli Metallerin Soğuma Eğrilerinin Analitik Yaklaşım ile Elde Edilmesi**”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-84 (2005).
8. Yılmaz, K. İ., “**Gözenekli Malzemelerde Soğuma Eğrilerinin Sayısal Yöntemle Elde Edilmesi**”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-90 (2005).
9. Yılmaz, O., “**Gözenekli Malzemelerin Soğuma Eğrilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi**”,

- Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-71 (2006).
10. Aivazov, M. I., Domashnev, I. A., “**Influence of Porosity on the Conductivity of the Hot Pressed Titaniumnitride Specimens**”, Poroshkovaya Metallurgiya (Soviet P/M and Metal Ceramics), 8(9): 51-54 (1968).
  11. Koh, J. C. Y., Fortini, “**Prediction of Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Porous Metallic Materials**”, Int. J. Heat and Mass Transfer, 16, 2013-2021 (1973).
  12. P. Howard, M.J. Koczak, “**How porosity and atmosphere effect the conductivity of P/M parts**”, Int. J. Powder Metall. 17 (1) (1981) 25– 35.
  13. Odelevski, V. I., Zh, **Tekh, fiz.**, Int. J. Powder Metallurgy, 6, 667, (1951).
  14. Veinberg, A.K., Nauk, Dokl. Akad., **Powder Technology**, 3, 543, (1966).
  15. Chi, JWH., 1966, “**Forced Convective Boiling Heat Transfer to Hydrogen**”, J. Spacecraft, vol. 3, pp. 150-152.
  16. Rohsenow, WM., 1951, “**A Method Correlating Heat-Transfer Data for surface Boiling of Liquids**”, Trans. ASME, Vol. 74, pp. 969-976.
  17. Rohsenow, WM., Hartnett, JP. And Ganic EN., 1985, “**Handbook of Heat Transfer Fundamentals**”, 2nd ed., Mc Graw Hill, New York.
  18. Jakob, M., 1949, “**Heat Transfer**”, John Wiley&Sons, New York.
  19. Zuber, N., 1958, “**On the stability of boiling heat transfer**”, Trans. ASME, vol.80, pp. 711-720.
  20. Berenson PJ., 1961, “**Film-Boiling Heat Transfer From a Horizontal Surface**”, J. Of Heat Transfer, vol. 83, pp. 351-358.
  21. Bromley, LA., 1951, “**Heat Transfer in Stable Film Boiling**”, Chem. Eng. Prog., Vol. 46, pp. 221-227.
  22. Peker G., 2008, “**Metal Silindirik Bir Parçanın Su verme İşleminin Sayısal Olarak İncelenmesi**”, Y. Lisans Tezi, Makina Mühendisliği, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
  23. **Fluent Inc. Product Documentation.**
  24. Incropera, FP., De Witt, DP., (1985), “**Fundamentals of Heat and Mass Transfer** 2<sup>nd</sup> ed.”, John Wiley and Sons, New York.
  25. Ataer, OE., Aygün, C., and Uslan, I., 2003, “**A numerical approach to the cooling curves of porous P/M materials for quenching process**”, Powder Technology, vol:137, 159–166.