ÇEŞİTLİ SINIR ŞARTLARININ ÇELİKLERİN SOĞUMASINA ETKİLERİ*

Alper YILMAZ, Tuncay YILMAZ ve Orhan BÜYÜKALACA
Ç.Ü., Makina Mühendisliği Bölümü, Adana / Türkiye

ÖZET : *Metalik malzemeler, özellikle çelikler, endüstride çeşitli ısıl işlemlere tabi tutulurlar. Bu işlemlerde soğuma zamanının hesaplanması gereklidir ve işlem süresince malzemelerin fiziksel özellikleri sıcaklıkla çok fazla değişmektedir. Bu çalışmada, çeliğin soğumasında zorlanmış, doğal konveksiyon ve radyasyon gibi farklı sınır şartları araştırılmış ve bu durumların proses üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. İlgili diferansiyel denklemler ve sınır şartları için diskretizasyon eşitlikleri yazılmış ve bunlar iteratif olarak çözülmüştür. Sayısal hesaplamaların sonuçları çeşitli çelikler için ayrı ayrı grafikler halinde gösterilmiştir.*

INFLUENCE OF DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS ON COOLING OF STEELS

ABSTRACT : *Metallic materials, especially steels, are undertaken to different heat treatment processes in industry. For these processes, cooling times should be determined. However, physical properties of these materials depend very strongly on temperature. In this study, different boundary conditions, forced, free convection and radiation, in cooling of steels are investigated and influence of these conditions on the cooling calculations are evaluated. Discretization equations are written for the governing differential equations and the boundary conditions and they are solved iteratively. The results from the numerical calculations are presented in the form of graphs for chosen steels.*

* Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir. Proje No : FBE.2002.D109

1. GİRİŞ

Son yıllarda düşük maliyetli ve daha iyi özelliklere sahip çelik üretimi ihtiyacı artmaktadır. Bundan dolayı malzemelerde ısıl işlemin gerçekçi koşullarda teorik olarak hesaplanması ciddi bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu hesaplamalarda farklı sınır şartları ve sıcaklığa bağlı fiziksel özellikler kullanılmalıdır.

Endüstride metal malzemeler, özellikle çelikler, çeşitli ısıl işlemlerden geçirilmektedirler. Bu işlemlerde soğuma zamanlarının bilinmesi çok önemlidir. Fakat malzemelerin fiziksel özellikleri çok kuvvetli bir biçimde sıcaklığa bağlıdır ki bu hesaplamalar yapılırken mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışmada, çeşitli çelikler için gerekli görülen fiziksel özellikler literatürden [1] bulunmuş ve sayısal çözümlemelerde kullanılmak için eşitlikler halinde ifade edilmiştir. Çeliklerin soğumasında etkili serbest ve zorlanmış konveksiyon ve radyasyon gibi çeşitli sınır şartları incelenmiş ve bunların soğuma işlemine etkileri araştırılmıştır. Sınır şartları ve diferansiyel denklemler için yazılan diskretizasyon denklemleri iteratif olarak çözülmüştür. Sonuçlar grafikler şeklinde verilmiş, çeşitli sınır şartlarının çeliklerin soğumasına etkileri irdelenmiştir.

2. DİFERANSİYEL DENKLEMLER

Malzeme içindeki sıcaklık dağılımı için Fourier diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi yazılır [2,3,4]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) \tag{1}$$

burada ρ, c, k, sırasıyla, malzemenin yoğunluğu, özgül ısısı ve ısı iletim katsayısıdır. Aşağıdaki parametrelerin tanımlanmasıyla,

$$\rho^* = \rho / \rho_n \tag{2}$$

$$c^* = c / c_n \tag{3}$$

$$k^* = k / k_n \tag{4}$$

$$r^* = r / R \tag{5}$$

$$t^* = \frac{a_n . t}{R^2} \tag{6}$$

$$a^* = \frac{a}{a_n} \tag{7}$$

$$\theta = \frac{T - T_f}{T_i - T_f} = \frac{T - T_f}{\Delta T_f} \tag{8}$$

(1) diferansiyel denklemi (9) denklemi şeklini alır.

$$\frac{\rho^* c^*}{k^*}\frac{\partial \theta}{\partial t^*} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^{*2}} + \left(\frac{1}{r^*} + \frac{1}{k^*}\frac{\partial k^*}{\partial r^*} \right)\frac{\partial \theta}{\partial r^*} \tag{9}$$

Burada T_i ve T_f sırasıyla başlangıç ve akışkan sıcaklıklarıdır. Yukarıdaki denklemlerde, ρ_n, c_n, k_n ve a_n sırasıyla malzemenin T_n referans sıcaklığındaki yoğunluğu, özgül ısısı, ısı iletim katsayısı ve ısıl yayınım katsayısıdır. Eşitlik (9)

$$\frac{1}{a^*}\frac{\partial \theta}{\partial t^*} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^{*2}} + \left(\frac{1}{r^*} + \frac{1}{k^*}\frac{\partial k^*}{\partial r^*} \right)\frac{\partial \theta}{\partial r^*} \tag{10}$$

şeklinde de yazılabilir.

3. BAŞLANGIÇ VE SINIR ŞARTLARI

Eşitlik (10)'u çözebilmek için başlangıç ve sınır şartlarına ihtiyaç vardır. Başlangıç şartları

$$t = 0 \quad : \quad T = T_i \tag{11}$$

$$t^* = 0 \quad : \quad \theta = 1 \tag{12}$$

şeklindedir. Silindirik yüzeyden uniform soğuma olduğundan ve böylece sıcaklık dağılımı simetrik olacağından dolayı, silindirik malzemenin merkezi için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$r = 0 \quad : \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \tag{13}$$

$$r^* = 0 \quad : \quad \frac{\partial \theta}{\partial r^*} = 0 \tag{14}$$

Bunun dışında, radyasyon dahil konvektif soğuma için silindirik malzemenin yüzeyinde aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$r = R \quad : \quad -k\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R} = h\left(T_s - T_f\right) \tag{15}$$

$$r^* = 1 \quad : \quad k^*\frac{\partial \theta}{\partial r^*} = -Bi\left(\theta - \theta_f\right) \tag{16}$$

Bu eşitliklerde h, silindirik malzemenin yüzeyi ile T_f sıcaklığındaki akışkan arasındaki radyasyon dahil, ısı transferi katsayısıdır. T_s silindir yüzey sıcaklığı. Bi ise Biot sayısıdır ve

$$Bi = \frac{h.R}{k_n} \tag{17}$$

şeklinde tarif edilir.

4. ISI TRANSFERİ KATSAYISI h

Toplam ısı transferi katsayısı eşitlik (18) ile tarif edilebilir [5]:

$$h = \left(h_U^3 + h_F^3\right)^{1/3} + h_R \tag{18}$$

burada h_U, h_F ve h_R sırasıyla, ortalama zorlanmış konveksiyon, serbest konveksiyon ve radyasyonla ısı transferi katsayılarıdır. Rayleigh sayısı çok küçük değilse, serbest

konveksiyonla ısı transferi katsayısı h_F aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [5]:

$$h_F = A_F\, k\left[\frac{g}{\nu^2}\beta\left(T_s - T_f\right)\mathrm{Pr}\right]^{1/3} \tag{19}$$

$$h_F = A_F\, k\left[\frac{g}{\nu^2}\beta\,\Delta T_f\,\mathrm{Pr}\right]^{1/3}\left(\frac{T_s - T_f}{\Delta T_f}\right)^{1/3} \tag{20}$$

$$h_F = h_{oF}\,\theta_s^{1/3} \tag{21}$$

Burada h_{oF} ve θ_s aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$h_{oF} = A_F\, k\left[\frac{g}{\nu^2}\beta\,\Delta T_f\,\mathrm{Pr}\right]^{1/3} \tag{22}$$

$$\theta_s = \frac{T_s - T_f}{\Delta T_f} \tag{23}$$

Yukarıdaki eşitliklerde A_F değeri sabit olmayıp, silindirler için 0.1 ve 0.2 arasında değişmektedir [5]. Hesaplamalarda, dik yüzeylerde türbülanslı serbest konveksiyon [4] için de kullanılan, A_F değeri 0.13 olarak alınmıştır.

Eşitlik (22) ile verilen h_{oF}'nin tanımından, serbest konveksiyonla ısı transferi için Biot sayısı;

$$BIF = \frac{h_{oF}\,R}{k_o} \tag{24}$$

şeklinde tarif edilebilir ve benzer şekilde zorlanmış konveksiyonla ısı transferi için Biot sayısı da aşağıdaki gibi tarif olunur:

$$BIU = \frac{h_U\,R}{k_o} \tag{25}$$

Zorlanmış konveksiyonla ısı transferi katsayısı h_U sabit kabul edilmiştir. Radyasyonla ısı transferi katsayısı için

$$h_R = 4\varepsilon\sigma T_{Af}^3\, f_x \tag{26}$$

eşitliği kullanılabilir [5]. Burada ε ve σ, sırasıyla silindirik malzemenin yayma katsayısı ve Stefan-Boltzman sayısıdır. T_{Af} mutlak akışkan sıcaklığıdır. Eşitlik (26) daha genel olarak

$$h_R = h_{oR}\, f_x \tag{27}$$

şeklinde yazılabilir. h_{oR} ve f_x sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle tanımlanmışlardır:

$$h_{oR} = 4\varepsilon\sigma T_{Af}^3 \tag{28}$$

$$f_x = \left(1 + XT + XT^2 + XT^3\right)/4 \tag{29}$$

Eşitlik (29)'da bulunan XT aşağıda tanımlanmıştır:

$$XT = \frac{T_{As}}{T_{Af}} = \frac{T_s + 273}{T_f + 273} = \frac{T_s - T_f + T_f + 273}{T_f + 273} \tag{30}$$

$$XT = 1 + \theta_s\,\Delta T_f^* \tag{31}$$

Burada ΔT_f^*

$$\Delta T_f^* = \frac{\Delta T_f}{T_{Af}} = \frac{\Delta T_f}{T_f + 273} \tag{32}$$

şeklinde yazılabilir.

Yukarıdaki tanımlamalarla radyasyonla ısı transferi için Biot sayısı aşağıdaki gibidir.

$$BIR = \frac{h_{oR}\,R}{k_o} \tag{33}$$

(3.19) ve (3.20) eşitliklerinden

$$BIR = \frac{h\,R}{k_o} = \frac{\left[\left(h_U^3 + h_F^3\right)^{1/3} + h_R\right]R}{k_o} \tag{34}$$

bağıntısı elde edilir. (21), (24), (25), (27), (33) ve (34) eşitlikleri kullanılarak, bir toplam Biot sayısı tanımlanabilinir:

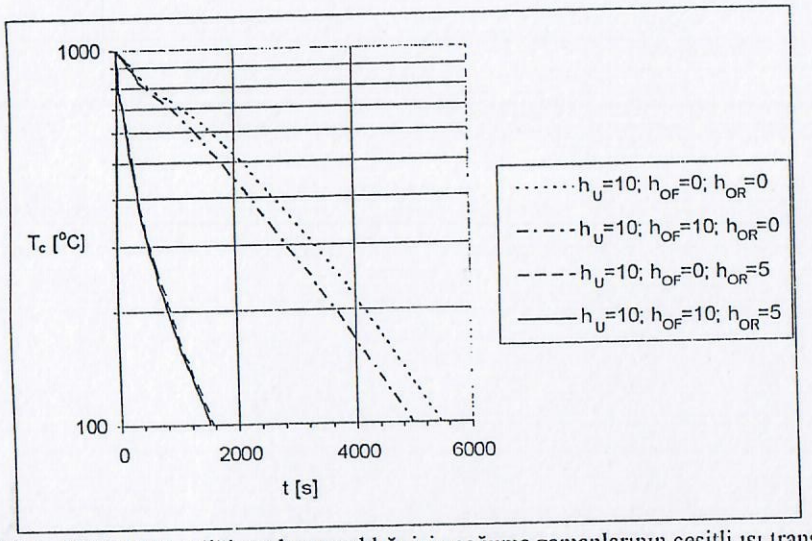
$$Bi = \left(BIU^3 + BIF^3\theta_s\right)^{1/3} + BIR\, f_x \tag{35}$$

5. SONUÇLAR

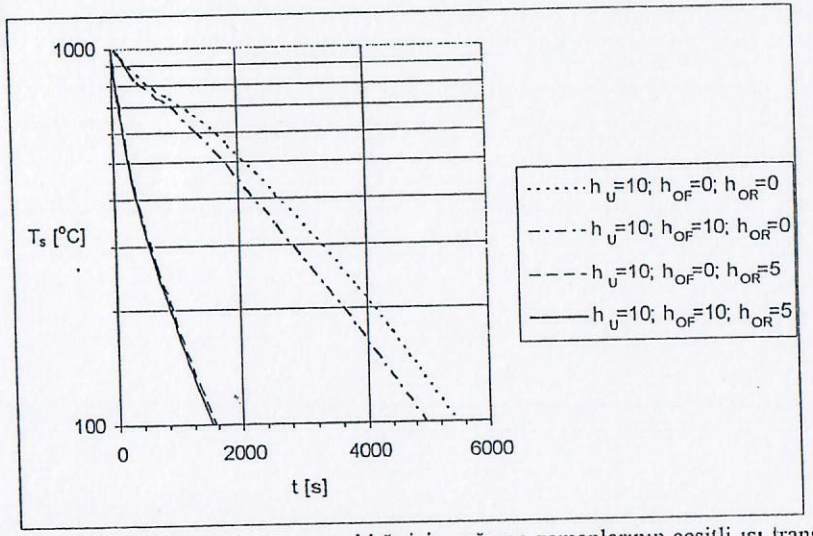
Şekil 1-8'de çeşitli ısı transferi sınır şartları altında belli h_u'lar için çeşitli çeliklerin merkez ve yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi verilmiştir. Bu şekillerdeki eğriler değişken fiziksel özellikler kullanılarak çizilmiştir. Zorlanmış konveksiyonla ısı transferi katsayısı (h_u) parametre olarak alınmış ve ısı transferinin daha iyi anlaşılabilmesi için 10-100 arasında değiştirilmiştir. Bu işlemin çok daha iyi kavranabilmesi için serbest konveksiyon ve radyasyonla ısı transferi sınır şartları da dikkate alınmıştır.

Bu şekillerden AISI 304 çeliğinin ANSI 1025 çeliğine göre biraz daha hızlı soğuduğu görülmektedir. Bir başka nokta ise malzemede oluşan hemen hemen uniform sıcaklık profilidir ki bu durum zaten düşük zorlanmış konveksiyonla ısı transferi katsayısından dolayı beklenmektedir. Bu şekillerden çıkarılabilecek bir başka genel sonuç ise serbest konveksiyonun diğer ısı transferi sınır şartlarına gore etkisinin çok az olduğudur.

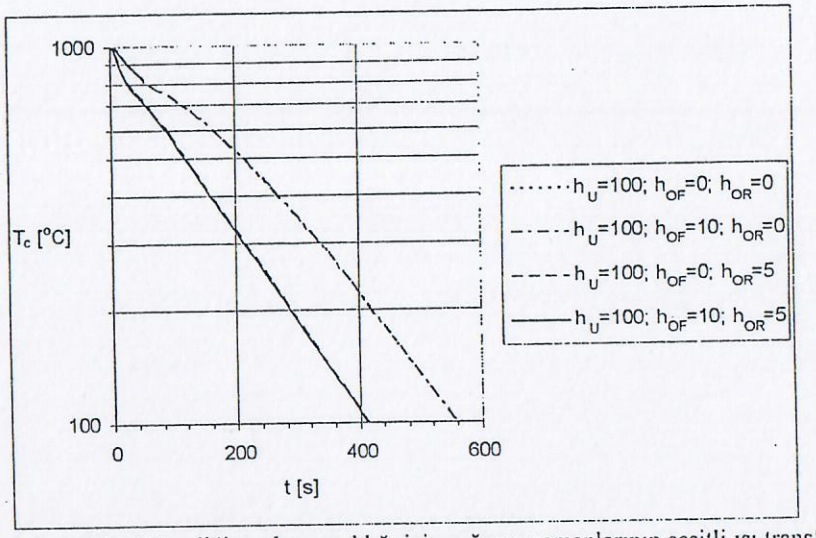
Şekiller 1-4 ve 5-8'de sırasıyla ANSI 1025 ve AISI 304 çelikleri için merkez ve yüzey sıcaklıkları h_u=10 ve h_u=100 için verilmiştir. Bu şekillerin karşılaştırılmasından serbest konveksiyonun diğer ısı tansferi sınır şartlarına göre daha az etkisinin olduğu açıkça görülmektedir. Bir diğer sonuç ise h_u=10'da zorlanmış konveksiyonun soğuma zamanına etkisinin h_u=100'deki gibi fazla olmadığıdır. Bu şekillerdeki eğriler radyasyonla ısı transferinin olduğu ve olmadığı diye 2 ayrı gruba ayrılabilirler. Görüldüğü üzere, soğuma zamanı radyasyonla ısı transferinin olduğu durumlarda olmadığı durumlara göre 3 kat azalmıştır. Eğer diğer iki ısı transferi sınır şartı (zorlanmış konveksiyon ve radyasyon) var ise serbest konveksiyonla ısı transferi ihmal edilebilir.



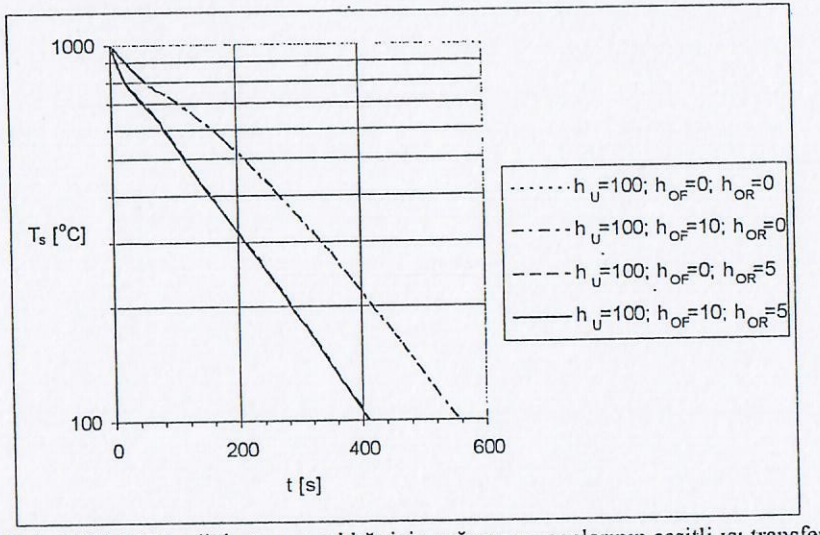
Şekil 1. ANSI 1025 çeliği merkez sıcaklığı için soğuma zamanlarının çeşitli ısı transferi sınır şartları altında karşılaştırılması (h_U=10)



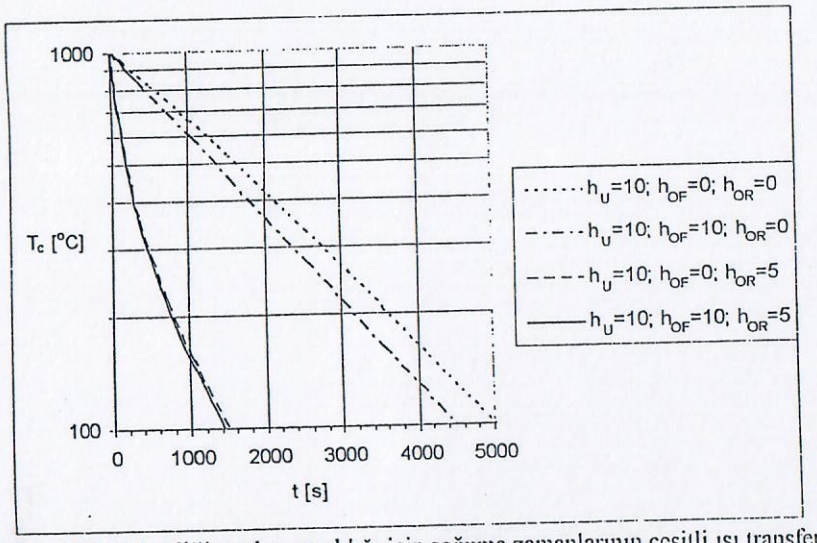
Şekil 2. ANSI 1025 çeliği yüzey sıcaklığı için soğuma zamanlarının çeşitli ısı transferi sınır şartları altında karşılaştırılması (h_U=10)



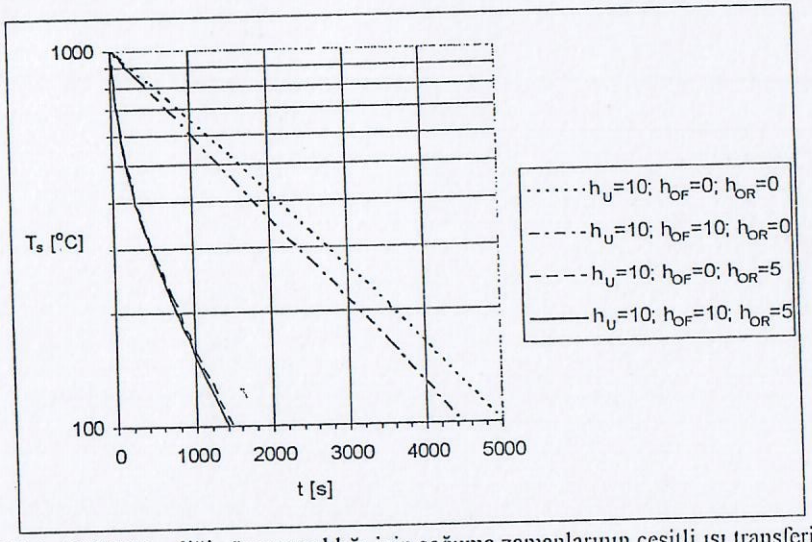
Şekil 3. ANSI 1025 çeliği merkez sıcaklığı için soğuma zamanlarının çeşitli ısı transferi sınır şartları altında karşılaştırılması (h_U=100)



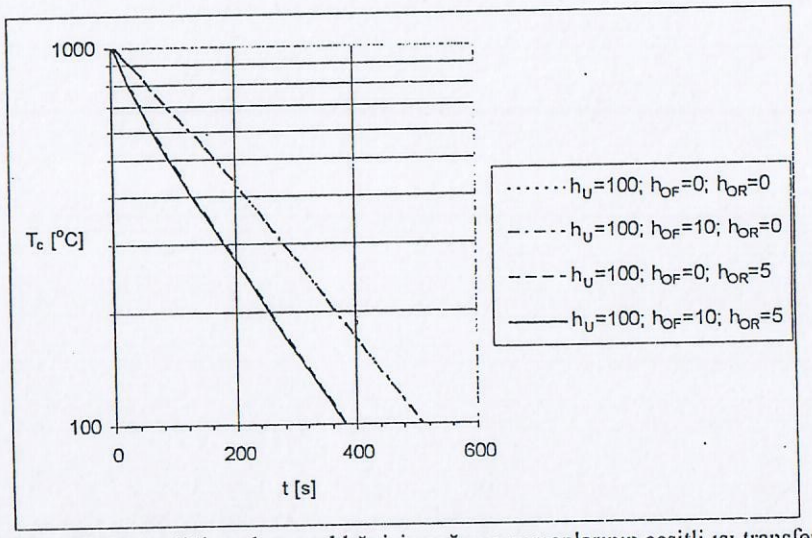
Şekil 4. ANSI 1025 çeliği yüzey sıcaklığı için soğuma zamanlarının çeşitli ısı transferi sınır şartları altında karşılaştırılması (h_U=100)



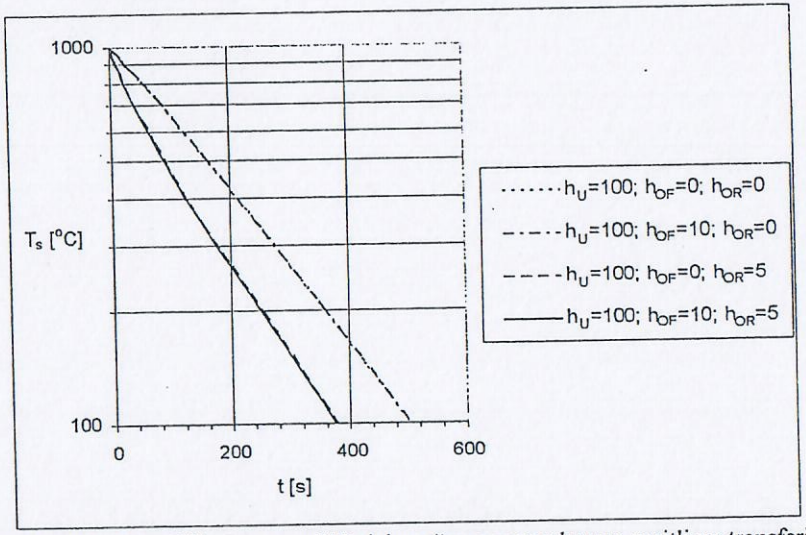
Şekil 5. AISI 304 çeliği merkez sıcaklığı için soğuma zamanlarının çeşitli ısı transferi sınır şartları altında karşılaştırılması (h_U=10)



Şekil 6. AISI 304 çeliği yüzey sıcaklığı için soğuma zamanlarının çeşitli ısı transferi sınır şartları altında karşılaştırılması (h_U=10)



Şekil 7. AISI 304 çeliği merkez sıcaklığı için soğuma zamanlarının çeşitli ısı transferi sınır şartları altında karşılaştırılması (h_U=100)



Şekil 8. AISI 304 çeliği yüzey sıcaklığı için soğuma zamanlarının çeşitli ısı transferi sınır şartları altında karşılaştırılması (h_U=100)

6. REFERANSLAR

1. *ASM Metals Reference Book, 2nd Ed., American Society for Metals, 1983.*

2. *Gebhart,B., "Heat conduction and mass diffusion", Mc-Graw Hill, New York, 1993.*

3. *Çengel,Y.A., "Heat transfer: A practical approach", Mc-Graw Hill, New York, 1998.*

4. *Yılmaz,T., "Teorik ve Uygulamalı Isı Transferi," 1mci baskı, Papatya Yayıncılık, 1999.*

5. *Yılmaz,A., "Cooling of cylindrical steels under different boundary conditions", Doktora İlerleme Raporu, Makina Mühendisliği Bölümü, Çukurova Üniversitesi, 2003.*