

JOMİNY NUMUNESİNDE DENEYSEL VE TEORİK ISI TRANSFERİ İLE SERTLEŞEBİLİRLİK ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehmet ÇAKIR*, **Abdullah ÖZSOY****

Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaat ve Denizcilik Fak. Gemi Makineleri İşletme Müh. Böl. 34349 İstanbul

**Süleyman Demirel Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü 32260 Isparta

mehmetcakir@sdu.edu.tr, ozsoy@tef.sdu.edu.tr

(Geliş/Received: 26.04.2011; Kabul/Accepted: 21.02.2013)

ÖZET

Bu çalışmada, Jominy numunesinde meydana gelen ısı transferi ile sertleşebilirlik arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu amaçla Jominy deney numunesine termokupllar yerleştirilmiş ve numune üzerinde zamana bağlı sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Aynı zamanda sonlu fark yöntemi açık yaklaşım kuramıyla tek boyutlu zamana bağlı ısı transferi ile modellenen numunede sayısal çözüm uygulanmıştır. Deneysel ve teorik hesap sonuçları karşılaştırılmış olup, Jominy deney parametrelerinin farklı varyasyonları için malzemenin ısı iletim katsayısı, difüzyon katsayısı, özgül ısısı, yoğunluk ve ısı taşınım katsayısı gibi özellikler kullanılarak geliştirilen bir matematiksel modelle sertlik derinliğinin tahmin edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Sonlu fark yöntemi, Sayısal ısı transferi, Isı ve sertlik, Zamana bağlı ısı transferi

INVESTIGATION THEORETICALLY AND EMPIRICALLY OF CORRELATION BETWEEN HARDENABILITY AND HEAT TRANSFER FOR JOMINY SAMPLE

ABSTRACT

In this study, correlation between heat transfer on Jominy sample and hardenability is investigated. For this purpose, thermocouples are placed on Jominy sample and recorded dependent time temperature data. Theoretical analyses are estimated by using one-dimensional transient heat transfer equation and finite difference method. Experimental and theoretical conclusions are compared, hardness depth of Jominy sample can be estimated theoretically using by the different variations of Jominy experimental parameters that the heat conduction coefficient, diffusion coefficient, specific heat, intensity and heat convection coefficient.

Keywords: Finite difference method, Numerical heat transfer, Heat and hardness, Transient heat transfer

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Jominy uca su verme deneyi, çeliklerin sertleşebilirliğinin ölçülmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu metotta, 25 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda hazırlanan silindirik numuneler, östenitleme sıcaklığına kadar ısıtılır ve dikey durumdaki numuneye alın yüzeyinden basınçlı su verilerek bir soğutma yapılır [1].

Jominy numunesinin sertleşebilirliği; soğutma ortamının türü, şiddeti ve numunenin ısıl özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Tüm bu parametrelerin değişimi ile deney yapılarak karşılaştırılacak olursa, binlerce numune harcanacak ve zaman israfı olacaktır. Bu yüzden Jominy su verme deneyi için bilgisayar programları geliştirilmiş ve farklı parametrelerin

kombinasyonuyla farklı çözümler sağlanmıştır [2]. Isı iletim ve taşınım katsayısı, difüzyon katsayısı gibi malzemeye ait ısıl özellikler Jominy deneyinde sıcaklıkla değişmekte ve malzemede gerilme ve sertlik derinliğini etkilemektedir. Jominy numunesinin farklı noktalarında, soğuma anındaki sıcaklık değerleri kaydedilirse, su verme ucundan iç kısma doğru mesafenin artmasıyla sıcaklık eğrilerinde bir düşüş görülür [3,4]. Jominy numunesinde ısı transferi, dikey eksende ve yarıçapta incelenirse, ısı iletim katsayısı numune içinde iki boyutlu olarak bir değişim gösterir [5]. Aynı zamanda, su verme ortamının ısı taşınım katsayısı ile sertleşebilirlik arasında doğrudan bir ilişki söz konusudur [6]. Numunenin ısı iletim katsayısının soğuma anında sıcaklıkla değişimi, sertlik derinliğinin belirlenmesinde bir tahmin belirtir [7].

Dolayısıyla bu çalışmada, Jominy numunesinin ısı özellikleri ile sertleşebilirlik arasındaki ilişkiyi belirtmek amacıyla, deneysel ve teorik olarak ısı transfer modeli kurulmuştur. Herhangi bir deney yapmaksızın numunenin ısı özellikleri ile sertliğin tahmin edilebilmesi üzerine bir araştırma yapılmıştır.

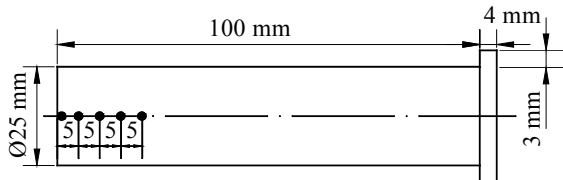
2. DENEYSEL UYGULAMA (EXPERIMENTAL APPLICATION)

Deney numuneleri, Tablo 1’de verilen bileşime sahip AISI 1050 çeliğinden 32 mm çapında silindirik olarak 120 mm uzunluğunda hazırlandı. Numuneler AISI 1050 çeliğinin dönüşüm sıcaklığının 40 °C üzerinde olan 860 °C’de 30 dakika normalize edildi ve havada soğutuldu.

Tablo 1: AISI 1050 çeliğinin kimyasal bileşimi (%)
(Composition of AISI 1050 steel specimen (wt.%))

C	0.50	Mo	0.01
Mn	0.64	Ni	0.07
Si	0.24	Al	0.014
P	0.010	Cu	0.16
S	0.005	Sn	0.011
Cr	0.12	Fe	98,22

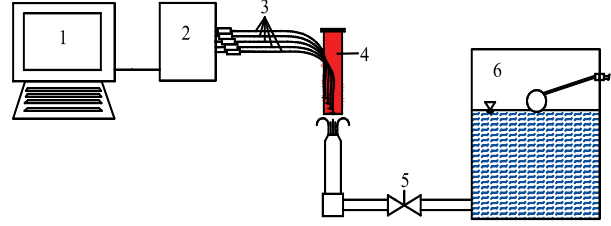
Daha sonra numuneler, tornada Jominy boyutlarında (25 mm çap ve 100 uzunluk) flanşlı olarak hazırlandı. Şekil 1’de görüldüğü gibi dikey eksen üzerinde, uçtan itibaren iç kısma doğru, 3 mm derinliğinde ve 1 mm çapında, 5 mm aralıklarla delikler açıldı. Açılan bu deliklere 1,5 mm çapında K tipi termokupullar yerleştirildi ve Almemo 5990-2 model sinyal okuyucuya bağlandı. TS 1381 EN ISO 642 standardında belirtilen şekilde hazırlanan numuneler, üzerinde bulunan termokupullarla beraber ısı işlem fırınında 840 °C’ye kadar ısıtıldı. Su borusu ucundaki akma basıncının deney numunesi olmadığı durumlarda 65 mm su sütunu olması sağlandı. Su borusunun ucu ve sertleştirilecek deney parçası ucu arasında 12,5 mm bir mesafe olacak şekilde Şekil 2’de verilen deney düzeneğinde soğutuldu. Soğuma anında termokupullar vasıtasıyla zamana bağlı olarak alınan sıcaklık verileri, sinyal okuyucuya aktarıldı ve bir bilgisayara kaydedildi [8].



Şekil 1. Jominy numunesi termokupl bağlantı noktaları (mm) (State of thermocouples in Jominy specimen)

Su verilen numuneler soğutulduktan sonra sertlik ölçümü için hazırlandı. Numunenin sertlik

derinliğinin belirlenebilmesi için, dikey ekseninde 0,4 mm derinliğinde taşlanan numunelerin Rockwell C cihazıyla sertlikleri ölçüldü.



Şekil 2. Jominy deney düzeneği şeması (1-Bilgisayar, 2-Veri Okuyucu, 3-Termokupullar, 4-Numune, 5-Küresel Vana, 6-Su tankı) (Test setup as show in the scheme)

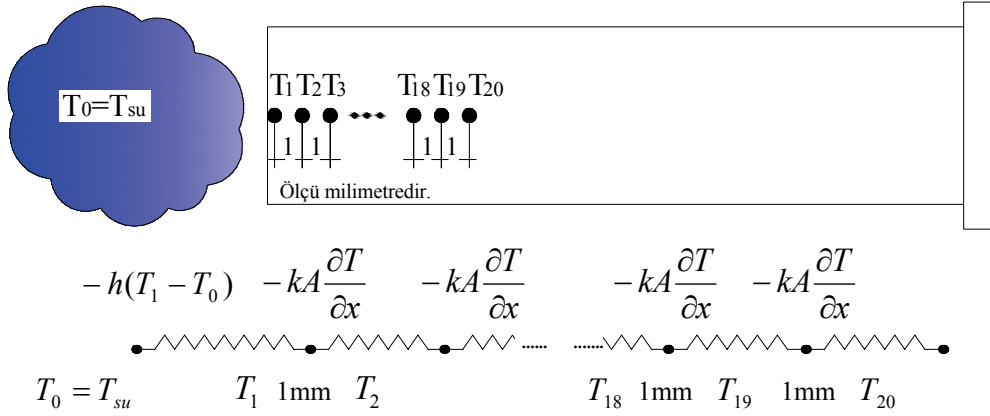
3. ZAMANA BAĞLI ISI TRANSFER MODELİ (MODEL OF TRANSİENT HEAT TRANSFER)

Zamana bağlı ısı transferi problemlerinin sayısal çözümleri belli sınır şartlarıyla geçerlidir [9]. Çalışmada, sonlu farklar yöntemi açık yaklaşım kuramı ile bir sayısal çözüm yapılmış olup, sınır şartları bu yöntem için belirlenmiştir. Zamana bağlı tek boyutlu ısı transfer eşitliği denklem 1 ile verilmiştir.

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

Jominy numunesinin ucundan 20 mm iç mesafeye kadar her 1 mm için bir düğüm noktası Şekil 3’de gösterildiği gibi belirlenmiştir. 20 mm mesafede her 5 mm’deki termokupullarla gerçek ölçüm değerleri alınmıştır. Isı transfer modelinde ise toplam eşit 20 mm mesafenin her 1 mm’sinde hesap yapılmış ve aynı noktalar (5 mm aralıklı) karşılaştırılmıştır. Çünkü deneysel ölçümlerdeki ısı transferi tamamen gerçek şartlar olduğu için, matematiksel modeli oluştururken gerçeğe en yakın olacak hassasiyette modellenmiş ve aynı noktadaki soğuma hızları karşılaştırılmıştır. İç düğümlerde ısı iletim katsayısı geçerli olup, uç düğüm noktasında ise ısı taşınım katsayısı söz konusudur. Bu şekilde 20 düğüm noktası belirlenmiş olur. 0 ve 1 noktaları arasında Newton’un Soğuma Yasası, diğer düğüm noktaları arasında ise Fourier Yasası uygulanarak sonlu farklar yöntemi açık yaklaşım kuramıyla, Jominy numunesi su verme anı için zamana bağlı tek boyutlu bir ısı transfer modeli kurulmuştur.

Problemin çözümlenebilmesi için malzeme özelliklerinin bilinmesi ve başlangıç sınır şartlarının belirlenmesi gerekir. Tablo 2’de AISI 1050 çeliğinin gerekli fiziksel özellikleri verilmiştir. Denklem 1, sonlu fark yöntemine göre iç düğüm noktaları için çözümlenirse, iç düğüm noktalarında Δt süresi sonunda sıcaklık değeri denklem 2 ile gösterilir.



Şekil 3. Jominy numunesinin bir boyutlu ısı transfer modeli (Model of transient heat transfer for Jominy sample)

Tablo 2. AISI 1050 çeliğinin gerekli fiziksel özellikleri [9] (Physical properties of AISI 1050 steel)

$\rho(kg/m^3)$	7854
$c_p(j/kg^\circ C)$	434
$k(w/m^\circ C)$	60.5
$\alpha.10^6(m^2/s)$	17.7
$h(w/m^2^\circ C)$	6000

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_p^{t+\Delta t} - T_p^t}{\Delta t} = \frac{T_{p+1}^t + T_{p-1}^t - 2T_p^t}{\Delta x^2}$$

$$T_p^{t+\Delta t} = Fo(T_{p+1}^t + T_{p-1}^t) + (1 - 2Fo)T_p^t \quad (2)$$

Burada dikkat edilecek olursa, T_p^t ifadesinin katsayısının $(1 - 2Fo) \geq 0$ olması koşulu

sağlanmalıdır [9]. Yani $Fo \geq \frac{1}{2}$ olması gerekir. Aynı

şekilde uç düğüm noktası için enerji korunum denkleminde göre ve soğutucu ortam ve uç düğüm noktası arasındaki bağlantı kurulursa denklem 3 ile gösterilen eşitlik bulunur.

$$q_{taş} + q_{iletim} = q_{depolanan}$$

$$hA(T_0 - T_s^t) + \frac{kA}{\Delta x}(T_{s-1}^t - T_s^t) = \rho \cdot c_p \cdot A \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{T_s^{t+\Delta t} - T_s^t}{\Delta t}$$

$$T_s^{t+\Delta t} = 2Fo(T_{s-1}^t + BiT_0) + (1 - 2Fo - 2BiFo)T_s^t \quad (3)$$

Burada da çözümün oluşabilmesi için T_s^t ifadesinin katsayısının sıfırdan büyük ya da eşit olması gerekir

[9]. Yani $(1 - 2Fo - 2BiFo) \geq 0$ ise $Fo(1 + Bi) \geq \frac{1}{2}$

olma şartı sağlanmalıdır. Bu denklemin sağlayan en büyük Fo sayısı ve Δt değeri için en hassas çözüm sağlanmış olur. Çalışmada gerçek verilerle bir karşılaştırma yapılacak olması nedeniyle en hassas çözümün bulunabilmesi adına, $\Delta x=1mm$ ve $\Delta t=0,023$ saniye alınarak en uygun Fourier sayısı,

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \Rightarrow Fo = 0,407 \text{ alınmıştır. Aynı şekilde}$$

$$Fo(1 + Bi) \geq \frac{1}{2} \text{ kıstasına ve alınan } \Delta x \text{ değerine}$$

$$\text{göre Biot sayısı da } Bi = \frac{h \Delta x}{k} \Rightarrow Bi = 0,099$$

olarak alınmıştır. Numunenin ilk sıcaklığı $840^\circ C$, soğutma suyu sıcaklığı $18^\circ C$ olarak alınmış olup, gerçek deney başlangıç şartlarına getirilmiştir. Sınır koşulları ve başlangıç şartlarına göre 19 iç düğüm ve 1 uç düğüm noktası için zamana bağlı hesaplamalar yapılmıştır. Gerçek ölçüm noktaları ile karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla su verme ucundan içe doğru 1-5-10-15-20 mm mesafedeki zaman bağlı sonlu fark çözümleri denklem 4-5-6-7-8'de verilmiştir.

$$T_1^{t+\Delta t} = 0,814 \cdot (T_2^t + 1,782) + 0,054 \cdot T_1^t \quad (4)$$

$$T_5^{t+\Delta t} = 0,407 \cdot (T_4^t + T_6^t) + 0,186 \cdot T_5^t \quad (5)$$

$$T_{10}^{t+\Delta t} = 0,407 \cdot (T_9^t + T_{11}^t) + 0,186 \cdot T_{10}^t \quad (6)$$

$$T_{15}^{t+\Delta t} = 0,407 \cdot (T_{14}^t + T_{16}^t) + 0,186 \cdot T_{15}^t \quad (7)$$

$$T_{20}^{t+\Delta t} = 0,407 \cdot (2T_{19}^t) + 0,186 \cdot T_{20}^t \quad (8)$$

Numune fırından çıkarılıp, 3 saniye içinde Jominy deney yerine konulduğunda tüm noktalardaki sıcaklıklar T_1, T_5, T_{10}, T_{15} ve $T_{20} = 840^\circ C$ 'dir. Su verme başladıktan sonra numune hızla soğurken numunenin malzeme özellikleri kullanılarak elde edilen 4, 5, 6, 7 ve 8 denklemlerinden numune için bir boyutlu geçici rejim ısı transfer modeli kurulmuştur.

Her bir $t+1$ zamanındaki sıcaklık önceki t zamanındaki sıcaklık değeriyle Denklem 1'deki zamana bağlı bir boyutlu ısı transfer denklemi yardımıyla ilişkilendirilmiştir. Örneğin;

$t = 0$ için $t + 1 = 1$, yani 1. saniyede numunenin 1mm mesafesinde,

$$T_1^{t+1} = 0,814 \cdot (T_2^t + 1,782) + 0,054 \cdot T_1^t \quad (4)$$

$$T_1^1 = 0,814 \cdot (840 + 1,782) + 0,054 \cdot 840 \quad (9)$$

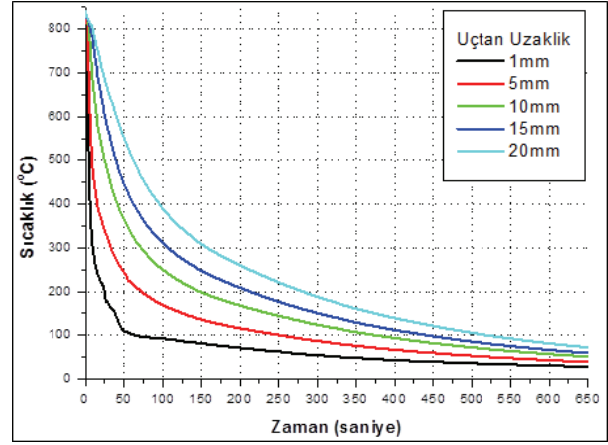
$$T_1^1 = 730,57^\circ\text{C}$$

değerine gelir. Yani soğuma başladıktan 1 saniye sonra numune üzerinde uçtan 1mm mesafedeki nokta $T_1^t = 840^\circ\text{C}$ 'den $T_1^{t+1} = 730,57^\circ\text{C}$ 'ye soğumuş olur. Tüm noktalarda ilgili denklemler kullanılarak numunenin oda sıcaklık değerine kadar soğumasının ısı transfer modeli kurulmuş olur.

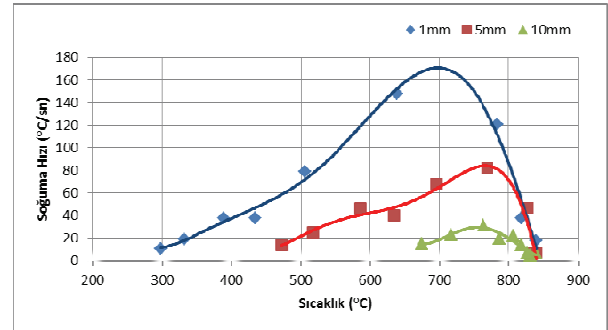
4. DENEYSEL VE TEORİK ANALİZ (EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS)

Bu çalışmada, Jominy deney numunesinin soğuma anındaki ısı transfer olayları deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. Isı transferinin sertleşebilirlikle ilişkisi ve soğuma hızının sertlikle değişimi incelenmiştir. Deneyler sonucu numunenin dikey eksenini boyunca yerleştirilen termokupllar sayesinde Şekil 4'deki zamana bağlı soğuma eğrileri elde edilmiştir. Su verme ucundan iç kısma doğru ilerledikçe zamanla sıcaklık düşüşü yavaşlamaktadır. Örneğin, 50. saniyede su verme ucundan 1 mm mesafede sıcaklık 100°C iken 5 mm'de 230°C , 10 mm'de 350°C , 15 mm'de 445°C ve 20 mm'de 550°C 'dir. Soğumanın ilk anlarında ısı hızla su verilen uçtan transfer olmakta ve yüksek sıcaklıktan dolayı numune içinde iç kısımdan uca doğru bir ısı gradyanı oluşmaktadır. Ölçüm yapılan noktalardaki zamana bağlı değişen sıcaklıklar bir grafik halinde gösterilirse, Şekil 5 ile verilen soğuma hızı - sıcaklık grafiği elde edilir.

Şekil 5'de Jominy Deneyinde su verilen uçtan iç kısma doğru 1-5-10 mm mesafelerinde ölçülen soğuma hızlarının sıcaklıkla değişimi verilmiştir. 10 mm'den sonraki noktalarda soğuma hızında belirgin bir artış olmamakta ve soğuma hızı sabit olmaktadır. Uç noktadan iç kısımlara doğru soğuma hızında bir azalma görülür. Yazdı ve diğerleri de çalışmalarında Jominy numunesi için su verme ucundan iç kısma doğru bir sıcaklık düşüşü ve soğuma hızında azalmanın olduğunu belirtmişlerdir [3]. Şekil 5 incelendiğinde, soğumanın ilk anlarında soğuma hızı sıfırdan yukarı doğru artmakta ve bir noktadan sonra tekrar düşüşe geçmektedir. Örneğin, 1 mm eğrisinde numune sıcaklığı 840°C de soğuma hızı sıfırken numune 700°C 'ye geldiğinde pik değere ulaşmakta ve bu noktadan sonra sürekli bir düşüş izlemektedir.

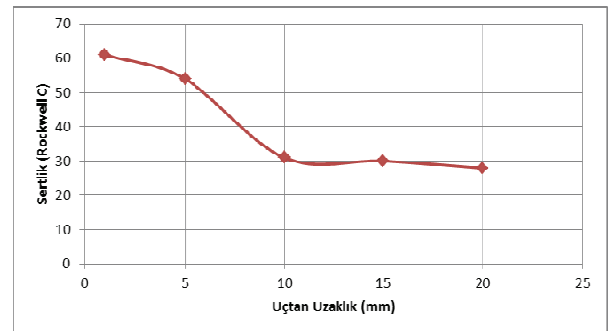


Şekil 4. Deneysel veriler ile ölçülen zamana bağlı soğuma eğrileri (The cooling curves experimentally measured)



Şekil 5. Soğuma hızının sıcaklıkla değişimi (Change of cooling rate by using temperature)

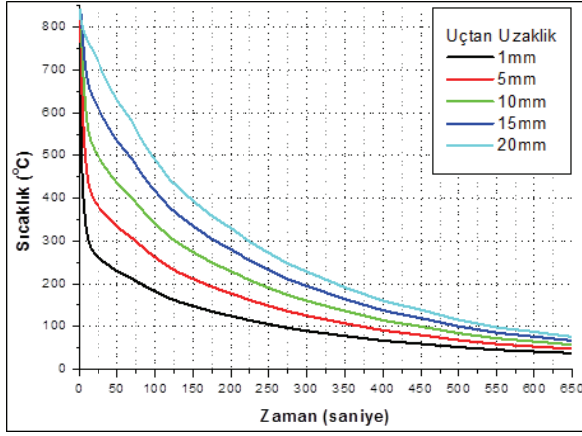
Jominy deneyinden maksat su vermenin sertliğe etkisini incelemektir. Bu nedenle soğuma anında zamana bağlı sıcaklık ölçümü yapılan noktaların sertlik değerleri Şekil 6'da verilmiştir.



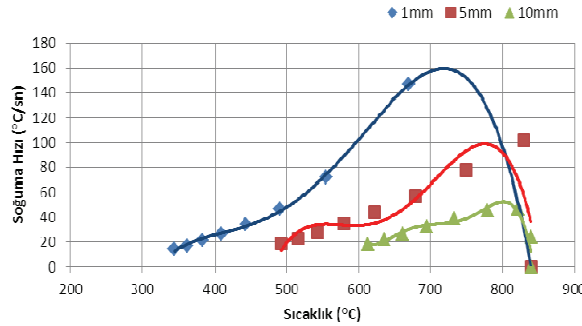
Şekil 6. AISI 1050 çeliğinin ölçülen Jominy sertlik eğrisi (Jominy hardness curve for AISI 1050 steel)

Numune ucunda en yüksek sertlik değeri görülmekte olup, değeri 61 RC sertliktir. 10 mm'de ise sertlik 31 RC değerine kadar azalır. Bu noktadan sonra ise soğuma hızlarına benzer olarak sabit bir şekilde azalarak bir ilerleme görülür. Soğuma hızının maksimum olduğu noktada sertlik de en yüksektir.

Şekil 5 ve 6 incelenirse, sertlik değeri ile soğuma hızı arasında bir bağlantının olduğu açıkça görülmektedir. Numunenin ısı özellikleri ve sonlu farklar yöntemi açık yaklaşım kuramı ile her hangi bir deney yapmaksızın sadece matematiksel olarak bulunan soğuma eğrileri ve soğuma hızının numune sıcaklığı ile değişimi Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir.



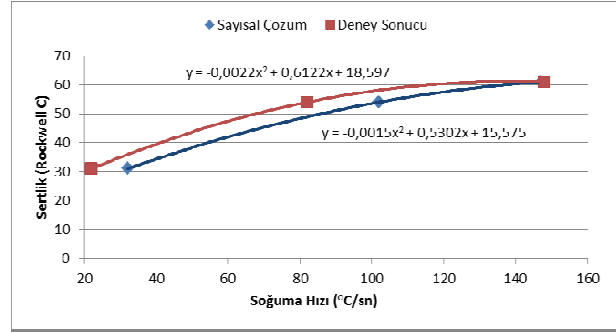
Şekil 7. Sonlu farklar yöntemiyle hesaplanan zamana bağlı soğuma eğrileri (The cooling curves theoretically measured by using finite difference method)



Şekil 8. Sonlu fark yöntemi ile hesaplanan soğuma hızının sıcaklıkla değişimi (Change of cooling rate by using temperature and finite difference method)

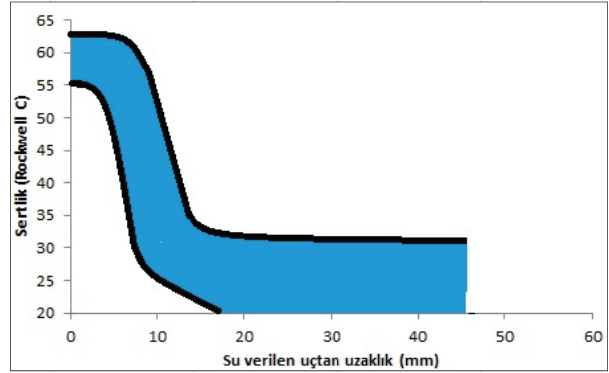
Şekil 7’de matematiksel model ile hesaplanan soğuma eğrileri incelenirse, deneysel yöntemle karşılaştırmak adına 50. saniyede su verme ucundan 1 mm mesafede sıcaklık 230 °C iken 5 mm’de 335 °C, 10 mm’de 440 °C, 15 mm’de 530 °C ve 20 mm’de 710 °C olduğu görülür. Malzeme içinde sertlik oluşumu için geçerli süre ilk 10 saniyede tamamlanmaktadır. Bu yüzden 50. saniyedeki aralarında oluşan sıcaklık farkları sertleşebilirlik açısından engel teşkil etmez. Deneysel veriler ve matematiksel olarak hesaplanan değerlerin birbirleri ile benzer soğuma özelliği gösterdiği görülmektedir. Soğuma hızı grafikleri yaklaşık olarak tüm noktalarda aynıdır. Soğuma eğrileri de birbirleri ile uyum içindedir. Yani sonlu farklar yöntemi ile modellenen ısı transferi gerçek ısı transferiyle uyum içindedir. Deneysel ve teorik çözüm kullanılarak

soğuma hızı ve sertlik arasında bir bağlantı kurulursa Şekil 9’da verilen grafik elde edilir.



Şekil 9. Sertlik ve Soğuma hızı ilişkisi (Correlation between hardness and cooling rate)

Deneysel soğuma hızı-sertlik eğrisi ile teorik olarak bulunan soğuma hızı-sertlik eğrileri birbirleri ile uyumludurlar. Şekil 10’da AISI 1050 çeliği için literatürdeki sertlik eğrisi verilmiştir.



Şekil 10. AISI 1050 çeliğinin sertleşebilirlik bandı [10] (Hardenability tape for AISI 1050 steel)

Şekilden de görüleceği üzere AISI 1050 çeliğinin sertliği bir bant şeklinde olup, teorik olarak uygulanan işlem sonucu bulunan sertlik tahmini bu bant içerisinde kalmaktadır. Yani numunenin ısı özellikleri yardımıyla sertleşebilirlik arasındaki bağlantıyı kullanarak deney yapmaksızın sertliği tahmin edebilecek şekilde bir matematiksel ısı transfer modeli ile olumlu sonuç alınmıştır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada Jominy numunesinde deneysel ve teorik ısı transferinin sertlik derinliğine etkisi araştırılmış olup, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Büyük kütleli ve karmaşık geometrili makine parçalarının sertleştirilmesinde, malzeme ısı özellikleri ve soğutma ortam koşullarının farklı bileşimlerinde sertlik derinliğini istenilen kademeye getirmek için çok fazla deney yapılması gereklidir. Fakat bu çalışma sonucu,

herhangi bir deney yapmaksızın malzemenin ısı iletim katsayısı, difüzyon katsayısı, özgül ısı, yoğunluk ve ısı taşınım katsayısı gibi özelliklerini kullanarak sayısal bir model oluşturulmuş ve sertlik derinliğinin tahmin edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

- Soğuma eğrileri ve soğuma hızı malzemenin sertleşebilirliği hakkında bir tahmin yapmamızı sağlar. Bu çalışma sonucu ise, sonlu fark yöntemi kullanılarak elde edilen soğuma hızı verileri sayesinde sertlik değerlerinin tahmini sağlanmıştır. Genel bir tahminden sayısal bir tahmin değerine ulaşılmıştır.
- Sonlu fark yöntemi açık yaklaşım kuramında bazı ön kabuller yapılarak ve sınır şartları konularak hesaplama yapılması gereklidir. Jominy deneyi için oluşturulan matematiksel ısı transfer modelinin deney verileriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Numune, sonlu fark yöntemi açık yaklaşım kuramıyla tek boyutlu zamana bağlı ısı transfer denklemiyle başarılı bir şekilde matematiksel olarak modellenmiştir.

SEMBOLLER

α	Difüzyon katsayısı (m^2/sn)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
t	Zaman (saniye)
x	Uzunluk (m)
A	Alan (m^2)
ρ	yoğunluk (kg/m^3)
c_p	Sabit basınçta özgül ısı ($j/kg^{\circ}C$)
h	Isı taşınım katsayısı ($w/m^2^{\circ}C$)
k	Isı iletim katsayısı ($w/m^2^{\circ}C$)
q	Isı enerjisi (watt)
Fo	Fourier sayısı
Bi	Biot sayısı
RC	Rockwell C sertlik

Alt İndisler

p	nokta (iç düğüm)
s	yüzey noktası (düğüm)

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu makale Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 1571-YL-07 numaralı "Su Verme Isıl İşleminde Çelik-Ortam Arasındaki Isı Transferinin İncelenmesi" isimli proje kapsamında hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. Anonim, Çelik Ucuna Su Verilerek Sertleşebilirlik Deneyi (Jominy deneyi), TS 1381 EN ISO 642 (ICS 77.040.99), TSE 15s., Ankara, 2001.
2. Smoljan B., Numerical Simulation of Steel Quenching, **Journal of Materials Engineering and Performance**, Volume 11, No 1, 75-79, 2002.
3. Yazdi, A. Z., Sajjadi, S. A., Zebarjad, S. M., Nezhad, S. M. M., Prediction of Hardness At Different Points of Jominy Specimen Using Quench Factor Analysis Method, **Journal of Materials Processing Technology**, 11134, 1-6, 2008.
4. Çakır M., Özsoy A., Investigation of the Correlation between Thermal Properties and Hardenability of Jominy Bars Quenched with Air-water Mixture for AISI 1050 Steel, **Material and Design**, Volume 32, Issue 5, 3099-3015, 2011.
5. Masson, P. L., Loulou, T., Artioukhine, E., Comparison between Two Methods For Estimating the Convection Heat Transfer Coefficient During A Metallurgical Jominy End-Quench Test, **4th International Conference on Inverse Problems in Engineering**, Rio de Janeiro, Brezilya, 2002.
6. Smoljan B., Prediction of Mechanical Properties and Microstructure Distribution of Quenched and Tempered Steel Shaft, **Journal of Materials Processing Technology**, 175, 393-397, 2006.
7. Masson P.L., Loulou T., Artioukhine, E., Rogeon P., Carron D., Quemener J. J., A Numerical Study for the Estimation of a Convection Heat Transfer Coefficient During a Metallurgical Jominy End-Quench Test, **International Journal of Thermal Sciences**, Volume 41, 517-527, 2002.
8. Çakır M., 2008. **Su Verme Isıl İşleminde Çelik-Ortam Arasındaki Isı Transferinin İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
9. Incropera F. P., DeWitt D. P., **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, (4th ed.), New York, 1996.
10. Gülenç, B., **M.K.E. Kurumu Çeliklerinin Sertleşebilirliklerinin Tayini**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987.